



Grundwissen Elektronik

Release 0.1.6e

Aktualisiert am 02.12.2018

Bernhard Grotz

<http://www.grund-wissen.de>

Dieses Buch wird unter der [Creative Commons License \(Version 3.0, by-nc-sa\)](#) veröffentlicht. Alle Inhalte dürfen daher in jedem beliebigen Format vervielfältigt und/oder weiterverarbeitet werden, sofern die Weitergabe nicht kommerziell ist, unter einer gleichen Lizenz erfolgt, und das Original als Quelle genannt wird. Siehe auch:

[Erläuterung der Einschränkung by-nc-sa](#)
[Leitfaden zu Creative-Commons-Lizenzen](#)

Unabhängig von dieser Lizenz ist die Nutzung dieses Buchs für Unterricht und Forschung (§52a UrhG) sowie zum privaten Gebrauch (§53 UrhG) ausdrücklich erlaubt.

Der Autor erhebt mit dem Buch weder den Anspruch auf Vollständigkeit noch auf Fehlerfreiheit; insbesondere kann für inhaltliche Fehler keine Haftung übernommen werden.

Die Quelldateien dieses Buchs wurden unter [Linux](#) mittels [Vim](#) und [Sphinx](#), die enthaltenen Graphiken mittels [Inkscape](#) erstellt. Der Quellcode sowie die Original-Graphiken können über die Projektseite heruntergeladen werden:

<http://www.grund-wissen.de>

Bei Fragen, Anmerkungen und Verbesserungsvorschlägen bittet der Autor um eine kurze Email an folgende Adresse:

info@grund-wissen.de

Augsburg, den 2. Dezember 2018.

Bernhard Grotz

Inhaltsverzeichnis

Elektronische Bauteile	1
Übersicht über elektronische Symbole	1
Spannungs- und Stromquellen	1
Spannungsquellen mit Gleichspannung	4
Spannungsquellen mit Wechselspannung	5
Stromquellen	6
Exkurs 1: Innenwiderstand realer Spannungsquellen	6
Exkurs 2: Innenwiderstand realer Stromquellen	9
Leitungen	10
Kreuzungen und Verbindungen	10
Die Masse (Ground)	11
Feinsicherungen	11
Schalter	12
Ein-Aus-Schalter	12
Wechselschalter	12
Taster	13
Reedkontakte	13
Relais	14
Widerstände	14
„Normale“ Widerstände	14
Temperaturabhängige Widerstände	17
Fotowiderstände	18
Varistoren	19
Regelbare Widerstände	20
Glühbirnen	21
Kondensatoren	21
„Normale“ Kondensatoren	22
Trimmkondensatoren	26
Elektrolyt-Kondensatoren	26
Elektronenröhren	27
Die Erfindung der Elektronenröhre	27
Elektronenröhren-Dioden	27
Elektronenröhren-Trioden	28
Dioden	29
„Normale“ Dioden	29
Leuchtdioden	31
Photodioden	32
Z-Dioden	33

Transistoren	34
npn-Transistoren	34
pnp-Transistoren	36
Ströme und Spannungen bei bipolaren Transistoren	37
Thyristoren	41
Triacs	42
Diacs	43
Spulen	43
Transformatoren	44
Aufbau und Funktionsweise	44
Exkurs: Schwach- und Starkstrom	45
Quarzoszillatoren	47
Integrierte Schaltkreise	47
Spannungsregler	48
Der NE555-Timer	48
Elektronische Schaltungen	50
Konventionen für das Erstellen von Schaltplänen	50
Netzwerke und Netzwerk-Knoten	51
Die Knotenregel und die Maschenregel	52
Die Knotenregel	52
Die Maschenregel	53
Reihen- und Parallelschaltungen	53
Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen	54
Reihen- und Parallelschaltung von Stromquellen	56
Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren	58
Stern-Dreieck-Umwandlung	59
Mess- und Prüfschaltungen	63
Spannungsmessung	63
Strommessung	64
Widerstandsmessung	65
Grundsaltungen	67
Spannungsteiler	67
Kondensator-Grundfunktion	73
Transistor-Grundsaltungen	74
Kipp-Schaltungen	77
Die bistabile Kippschaltung	77
Die astabile Kippschaltung	79
Die monostabile Kippschaltung	81
Logik-Grundsaltungen	82
NICHT-Schaltungen	82
UND-Schaltungen	83
ODER-Schaltungen	84
XODER-Schaltungen	85
Gleich- und Wechselrichter	85
Gleichrichter-Schaltungen	85
Wechselrichter-Schaltungen	88

Schaltungs-Simulationen mit QUCS	89
Bedienung von QUCS	89
DC-Simulationen	93
Parameter-Sweeps	94
Transient-Simulationen	101
AC-Simulationen	102
Links	102
Elektronik mit Arduinos	103
Aufbau eines Arduino UNO	103
Installation der Arduino-Software	105
Erste Arduino-Programmbeispiele	106
Blinken einer LED	107
Einfache Sensor-Schaltungen	108
Arduino-Programmierung	111
Definition von Variablen	111
INO: Arduino aus einer Shell heraus ansteuern (optional)	113
Links	115
Experimente, Übungsaufgaben und Lösungen	116
Übungsaufgaben	116
Aufgaben zu elektronischen Bauteilen	116
Aufgaben zu elektronischen Schaltungen	118
Lösungen	121
Lösungen zu elektronischen Bauteilen	121
Lösungen zu elektronischen Schaltungen	125
Links	132
Stichwortverzeichnis	135

Elektronische Bauteile

Das Wort „Elektronik“ setzt sich zusammen aus den Worten „Elektrizität“ und „Technik“. Kurz gesagt geht es in der Elektronik somit um technische Anwendungen von Erkenntnissen aus der [Elektrizitätslehre](#).

Elektronische Bauteile sind die Grundkomponenten eines jeden Stromkreises. Mit einigen Grundkenntnissen über die wichtigsten Funktionalitäten lassen sich damit einfache Schaltungen im Eigenbau konstruieren.

Übersicht über elektronische Symbole

In elektronischen Schaltplänen werden die verschiedenen Bauteile durch entsprechende Symbole dargestellt. Die folgende Liste soll – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einen Überblick über einige dieser „Schaltzeichen“ bieten.

Spannungs- und Stromquellen

Damit in einem Stromkreis ein elektrischer Strom fließen kann, muss eine elektrische Spannung anliegen. Umgangssprachlich wird diese von einer „Stromquelle“ bereitgestellt; in der Elektronik unterscheidet man hingegen zwischen „Spannungsquellen“ und „Stromquellen“:

- Eine ideale Spannungsquelle liefert einen konstanten Spannungswert, unabhängig von der Größe der Stromstärke, die der Quelle entnommen wird.
- Eine ideale Stromquelle liefert stets die gleiche Stromstärke; die zum Liefern dieser Stromstärke nötige Spannung wird von der Stromquelle automatisch geregelt.

Beide Typen sind idealisierte Modelle, die es in der Realität so nicht geben kann: Könnte beispielsweise bei einer idealen Spannungsquelle tatsächlich ein beliebig großer Strom entnommen werden, so würde auch die bereitgestellte Leistung gemäß der Formel $P = U \cdot I$ beliebig groß werden. Bei realen Spannungsquellen sinkt daher die Spannung, wie unten im *Exkurs: Innenwiderstand realer Spannungsquellen* näher beschrieben wird, bei zunehmend größeren Stromstärken ab; gleichermaßen können reale Stromquellen keine beliebig großen Spannungswerte liefern, die bei großen Last-Widerständen nötig wären, um die Soll-Stromstärke aufrecht zu erhalten.

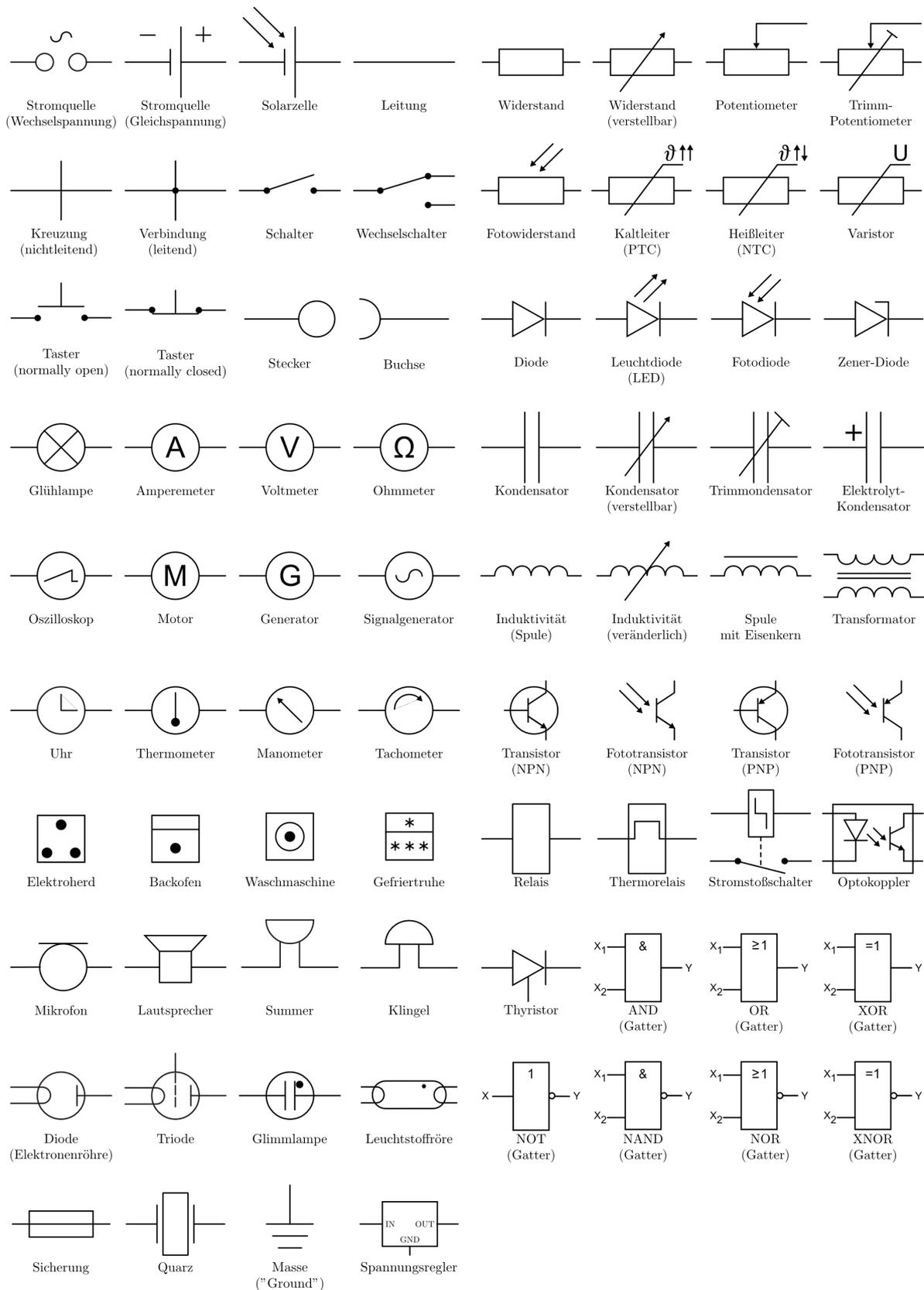


Abb. 1: Übersicht über häufige elektronische Schaltzeichen.

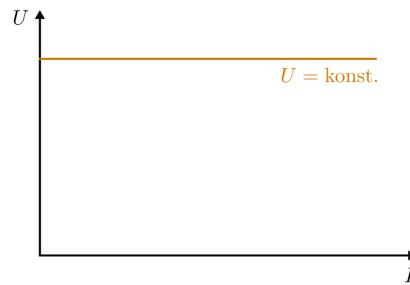


Abb. 2: $U(I)$ -Diagramm einer idealen Spannungsquelle.

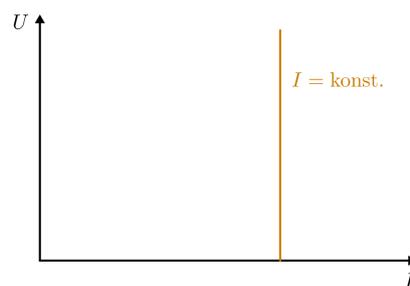


Abb. 3: $U(I)$ -Diagramm einer idealen Stromquelle.

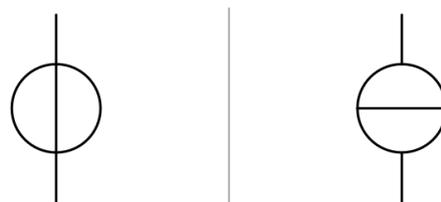


Abb. 4: Schaltzeichen einer idealen Spannungs- beziehungsweise Stromquelle.

Die idealen Modelle werden aufgrund ihrer Einfachheit dennoch verwendet, da sie oftmals die realen Vorgänge bereits gut genug beschreiben können; ergeben sich bei Verwendung dieser einfachen Modelle Widersprüche oder (bei Rechnungen) unrealistische Werte, so müssen diese – wie am am Ende dieses Kapitels näher beschrieben – nachgebessert werden.

Spannungsquellen mit Gleichspannung

Am Minuspol einer Spannungsquelle besteht ein Elektronenüberschuss, am Pluspol ein Elektronenmangel. Beide Zustände werden durch Vorgänge im Inneren der Spannungsquelle erzeugt beziehungsweise aufrecht erhalten.

Batterien

Batterien haben chemische Energie im Inneren gespeichert und sind in der Lage, diese in Form von elektrischer Energie freizusetzen. Entladene Batterien, deren gespeicherte Energiemenge verbraucht ist, müssen an einer Wertstoff-Sammelstelle abgegeben oder in speziell dafür aufgestellte Container geworfen werden.¹ Auf diese Weise können die Bestandteile der Batterie (weitgehend) wieder verwertet werden, und es gelangen zumindest weitaus weniger Giftstoffe in die Umwelt.

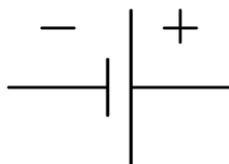


Abb. 5: Schaltzeichen einer Batterie beziehungsweise eines Akkumulators.

Batterien können nicht wieder aufgeladen werden und weisen somit gegenüber Akkumulatoren sowohl aus wirtschaftlicher wie aus ökologischer Sicht erhebliche Nachteile auf. Sie werden normalerweise nur dann in mobilen Bereichen eingesetzt, wenn eine vergleichsweise höhere Speicherkapazität und/oder eine geringfügig höhere Leistungsabgabe zwingend erforderlich sind.

Akkumulatoren

Akkumulatoren (auch „Akkus genannt) sind „wiederaufladbare Batterien“. Beim Aufladen wird elektrische Energie in Form von chemischer Energie durch die Umwandlung von Stoffen im Inneren des Akkus gespeichert. Beim Entladen läuft der chemische Prozess in umgekehrter Richtung ab, und es wird elektrische Energie freigegeben.

Beispiele:

¹ In Deutschland ist jeder Batterien-Händler gesetzlich dazu verpflichtet, entladene Batterien wieder zurück zu nehmen und diese an einer Wertstoff-Sammelstelle abzugeben.

- Blei-Akkumulator:

Im ungeladenen Zustand bestehen die Platten aus Bleisulfat (PbSO_4). Beim Aufladen reagiert die positive Elektrode zu Bleioxid (PbO_2) und die negative Elektrode zu Blei (Pb). Als Elektrolyt wird verdünnte Schwefelsäure verwendet.

Die Spannung je Zelle beträgt etwa 2 V. In handelsüblichen Blei-Akkumulatoren sind meistens sechs Zellen in einer Reihenschaltung miteinander verbunden, so dass an den Anschlüssen eine Spannung von 12 V abgegriffen werden kann.

- Nickel-Eisen-Akkumulator:

Als Elektrolyt wird verdünnte Kali-Lauge verwendet; die Spannung je Zelle beträgt etwa 1,2 V.

Bei geringen Stromstärken können Batterien und Akkumulatoren in guter Näherung als ideale Spannungsquellen angesehen werden.

Netzteile

Für stationäre Anwendungen haben (kabelgebundene) Netzteile mehrere Vorteile gegenüber Batterien oder Akkumulatoren: Sie müssen nicht ausgetauscht werden, und liefern stets zuverlässig (ohne Entladungs-Erscheinungen) die gewünschte Spannung.

Gleichspannungs-Netzteile („DC“ beziehungsweise „Direct Current“) bestehen normalerweise aus einem Transformator, einem (Brücken-)Gleichrichter, einem Spannungsregler und einigen Kondensatoren. Je nach Typ des eingebauten Spannungsreglers liefern Netzteile eine feste oder einstellbare Ausgangs-Spannung.

Spannungsquellen mit Wechselspannung

Haushalts-Steckdosen stellen eine Wechselspannung von 230 V bereit, wobei die zulässige Stromstärke durch Sicherungen meist auf 16 Ampere begrenzt ist – es kann somit eine maximale elektrische Leistung von $230 \text{ V} \cdot 16 \text{ A} = 3680 \text{ W}$ abgegriffen werden. Die elektrische Spannung wird in Kraftwerken mittels Generatoren (oder mittels Solarzellen und Wechselrichtern) erzeugt und – nach einer Spannungsanpassung – über (Hoch-)Spannungsleitungen an die jeweiligen Orte übertragen.



Abb. 6: Schaltzeichen eines Netzteils mit Wechselspannung.

Während elektrische Experimente mit „Netzspannung“ aufgrund der hohen elektrischen Leistung lebensgefährlich (!!) sind, kann die Wechselspannung des Stromnetzes (230 V)

mittels eines Transformators einfach auf eine geringere Spannung eingestellt werden. Je nach Bauweise können sich Transformatoren entweder direkt in den Geräten befinden (beispielsweise in Fernsehgeräten, Radios usw.), oder in Form von separaten Netzteilen vorliegen (beispielsweise bei Notebooks).

Auch für Elektronik-Versuche mit Wechselspannung sollte stets ein geeignetes Wechselspannungs-Netzteil („AC“ beziehungsweise „Alternating Current“) verwendet werden.

Stromquellen

So wie eine ideale Spannungsquelle stets die gleiche Nenn-Spannung liefert, liefert eine ideale Stromquelle stets einen gleichen Nenn-Strom; die dafür benötigte Spannung wird von der Stromquelle automatisch geregelt. Wie sich erahnen lässt, lassen sich in der Praxis reale Stromquellen nur schwerer verwirklichen als Spannungsquellen.

Manche Labor-Netzteile können innerhalb bestimmter Grenzen wahlweise als Strom- oder Spannungsquelle genutzt werden; verwendet man den Stromquellen-Modus, so lässt sich zudem der gewünschte Nenn-Strom einstellen, beispielsweise 1 A. Stellt die Stromquelle dann fest, dass sie aktuell nur 50 mA abgibt, so erhöht sie intern immer weiter ihre Spannung, solange bis sich die gewünschte Stromstärke einstellt oder technische Grenzen erreicht sind.

Exkurs 1: Innenwiderstand realer Spannungsquellen

Wird ein Stromkreis geschlossen, so muss der Strom – unabhängig von der Art der Spannungsquelle – stets auch durch diese selbst hindurch fließen. Reale Spannungsquellen haben hierbei einen eigenen elektrischen Widerstand, den man „Innenwiderstand“ R_i nennt – in Unterscheidung zu den angeschlossenen Verbrauchern, die man unter dem Begriff „Außenwiderstand“ R_a (beziehungsweise „Lastwiderstand“ R_L) zusammenfasst.

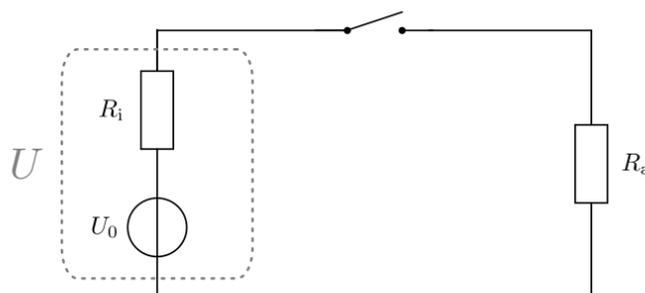


Abb. 7: Modell einer realen Spannungsquelle mit der Leerlaufspannung U_0 und dem Innenwiderstand R_i .

Der Gesamtwiderstand R_{ges} eines Stromkreises ist gleich der Summe aus dem Innenwiderstand der Spannungsquelle und dem Außenwiderstand:

$$R_{\text{ges}} = R_i + R_a$$

Wie bei einer *Reihenschaltung von Widerständen* üblich, fällt ein Teil der Gesamtspannung am Innenwiderstand und der restliche Teil am Außenwiderstand ab. Welcher Anteil der Gesamtspannung am Außenwiderstand abfällt, hängt vom Anteil $\frac{R_a}{R_{\text{ges}}}$ des Außenwiderstands am Gesamtwiderstand ab.² Üblicherweise ist der Außenwiderstand wesentlich größer als der Innenwiderstand, und somit der Anteil des Außenwiderstands am Gesamtwiderstand nahezu 100%; folglich fallen auch fast 100% der Gesamtspannung am Außenwiderstand ab.

Klemmenspannung und Leerlaufspannung

Als „Klemmenspannung“ U einer Spannungsquelle bezeichnet man diejenige Spannung, die zwischen den beiden Klemmen (Anschlüssen, Polen) der Spannungsquelle anliegt; diese Spannung ist mit der Spannung identisch, die über dem Außenwiderstand des Stromkreises abfällt.

Die Klemmenspannung nimmt ihren maximalen Wert an, wenn der Außenwiderstand unendlich groß ist: In diesem Fall fällt nahezu die gesamte Spannung am Außenwiderstand und fast keine Spannung am Innenwiderstand ab. Da bei einem unendlich großen Außenwiderstand allerdings auch kein Strom fließen kann, wird dieser maximale Spannungswert auch „Leerlaufspannung“ U_0 genannt.

Die Leerlaufspannung entspricht also dem Spannungswert einer Spannungsquelle, wenn kein Verbraucher angeschlossen ist. Näherungsweise kann dieser Wert mit einem Voltmeter gemessen werden, da dieses zwar keinen unendlichen, aber doch zu einen sehr großen Widerstandswert hat.

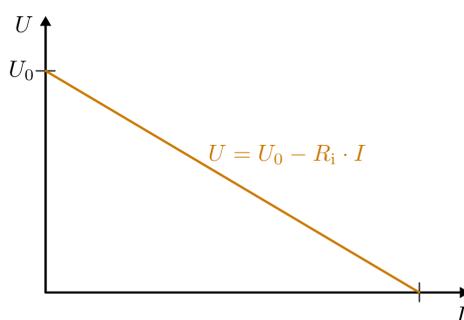


Abb. 8: Diagramm der Klemmenspannung einer Spannungsquelle in Abhängigkeit des Innenwiderstands R_i und der fließenden Stromstärke I .

Wird ein Verbraucher mit einem endlichen Widerstand an die Spannungsquelle angeschlossen, so stellt sich eine Stromstärke $I = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}}$ ein, die sowohl durch den Verbraucher

² Bei diesem Modell einer Spannungsquelle stellen der Innenwiderstand und der Last-Widerstand strukturell einen *Spannungsteiler* dar.

wie auch durch die Spannungsquelle fließt. Am Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle fällt dabei nach dem **Ohmschen Gesetz** die Spannung $U_i = R_i \cdot I$ ab; die Klemmenspannung ist somit um diesen Betrag gegenüber der Leerlaufspannung verringert. Für die Klemmenspannung U gilt in diesem Fall also:

$$U = U_0 - R_i \cdot I \quad (1)$$

Je niedriger der Außenwiderstand eines Stromkreises ist, desto höher ist die Stromstärke I ; dies hat eine Verringerung der Klemmenspannung U zur Folge.

Beispiel:

- Wie groß ist die Klemmenspannung U einer Spannungsquelle im Vergleich zu ihrer Leerlaufspannung U_0 , wenn der Außenwiderstand R_a gleich dem Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle ist?

Ist $R_i = R_a$, so folgt für die die Stromstärke I :

$$I = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_0}{R_i + R_a} = \frac{U_0}{2 \cdot R_i}$$

Setzt man diesen Wert in die obige Formel (1) ein, so ergibt sich für die Klemmenspannung U :

$$U = U_0 - R_i \cdot \frac{U_0}{2 \cdot R_i} = U_0 - \frac{U_0}{2} = \frac{1}{2} \cdot U_0$$

Die Klemmenspannung ist in diesem Fall auf die Hälfte der Leerlaufspannung abgesunken.

Bei einem Kurzschluss sinkt der Außenwiderstand auf nahezu Null ab; die Stromstärke I wird dann nur durch den meist sehr niedrigen Innenwiderstand der Spannungsquelle begrenzt. Die hierbei auftretenden Stromstärken können so groß sein, dass die Spannungsquelle durch die Wärmewirkung des Stroms zerstört werden können; bei einem Kurzschluss besteht also Brandgefahr.

Batterien und Akkumulatoren können bei einem Kurzschluss ihre gesamte gespeicherte chemische Energie innerhalb von wenigen Minuten abgeben. Die Brandgefahr bei Kurzschlüssen wird in praktischen Anwendungsfällen, beispielsweise in Autos, oftmals durch *Feinsicherungen* unterbunden: Die darin verbauten Drähte glühen bei zu hohen Stromstärken rasch durch und unterbrechen dadurch den Stromkreis.

Bei Netzteilen muss vom Hersteller eine Belastungsgrenze angegeben werden, die besagt, welche Stromstärke ein Netzteil über längere Zeit liefern kann. Wird die Belastungsgrenze über einen längeren Zeitraum oder kurzzeitig und dafür sehr deutlich überschritten, so können durch Überhitzungen Kurzschlüsse im Netzteil auftreten, die eine Zerstörung des Netzteils sowie ein „Herausfliegen“ der Hauptsicherung im Verteilerkasten (FI-Schalter oder Schmelzsicherung) zur Folge haben kann. In konkreten Anwendungsfällen ist es also ratsam, lieber ein auch für etwas größere Ströme ausgelegtes Netzteil zu verwenden.

Exkurs 2: Innenwiderstand realer Stromquellen

Ein Näherungsmodell mit einer idealen Quelle und einem Innenwiderstand lässt sich auch für reale Stromquellen aufstellen. In diesem Fall sieht das Ersatzschaltbild folgendermaßen aus:

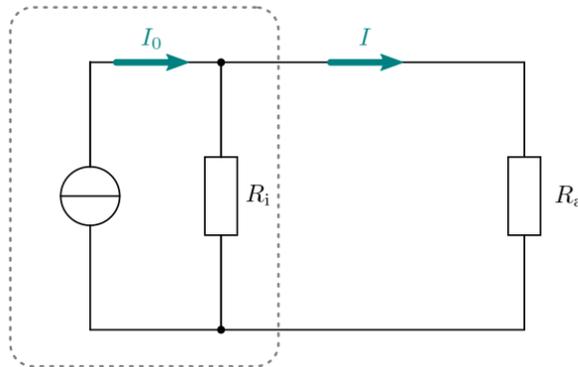


Abb. 9: Modell einer realen Stromquelle mit der Leerlaufspannung U_0 und dem Innenwiderstand R_i .

In diesem Fall teilt sich die von der (idealen) Stromquelle ausgehende Stromstärke auf: Ein Teil fließt über den möglichst hohen Innenwiderstand R_i der Stromquelle, ein Teil über den meist vergleichsweise geringen Last-Widerstand R_a ab. Bezeichnet man mit I_0 die von der idealen Stromquelle gelieferte Stromstärke und mit I die Stromstärke im restlichen Stromkreis, so gilt:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{G_a}{G_i + G_a}$$

Für die am Lastwiderstand anliegende Spannung U gilt nach dem Ohmschen Gesetz wiederum:

$$U = R_i \cdot I_0 - R_i \cdot I \quad (2)$$

Nimmt man wiederum die durch den Last-Widerstand fließende Stromstärke I als Variable an, so kann man den nur für das Innere der Stromquelle relevanten Term $R_i \cdot I_0$ schlichtweg wieder U schreiben, und erhält somit eine Formel, die mit der Gleichung (1) einer Spannungsquelle identisch ist; bei Verwendung von diesem Modell ist somit auch die $U(I)$ -Kennlinie einer realen Stromquelle mit dem einer realen Spannungsquelle identisch.

Der wesentliche Unterschied zwischen einer Spannungs- und Stromquelle liegt darin, auf wie große Außenwiderstände R_a die Quelle ausgelegt ist:

- Eine reale Spannungsquelle hat genau dann keine Verlust-Leistung, wenn der Last-Widerstand R_a unendlich groß ist. Eine Spannungsquelle wird somit bevorzugt im Leerlauf beziehungsweise bei geringen Stromstärken betrieben.
- Eine reale Stromquelle hat keine (innere) Verlust-Leistung, wenn der Außenwiderstand R_a unendlich klein beziehungsweise der Innenwiderstand R_i vergleichsweise unendlich groß ist.

Der Vorteil der beiden obigen Modelle für Spannungs- und Stromquellen liegt darin, dass sich so dargestellte Quellen auch bei unterschiedlichen Werten parallel beziehungsweise in Reihe schalten lassen, ohne dass sich aus praktische Widersprüche ergeben; die Modelle stellen reale Spannungs- und Stromquellen somit ein gutes Stück realistischer dar.

Leitungen

Damit die einzelnen Bauteile eines Stromkreises miteinander verbunden werden können, sind Leitungen nötig. Verbindungskabel bestehen meist aus Kupferdraht, der durch eine isolierende Kunststoffhülle ummantelt ist. In Leiterplatten („Platinen“) befinden sich metallische Leiterbahnen in einem isolierenden Trägermaterial (meistens Glasfasern mit Epoxidharz).

In Schaltplänen werden Leitungen durch gerade oder abgewinkelte Verbindungslinien dargestellt:



Abb. 10: Schaltzeichen einer Leitung.

In Schaltplänen muss der Verlauf der Leitungen, ähnlich wie in Straßenbahn-Plänen, nicht mit dem tatsächlichen Verlauf der Leitungen in einer realen Schaltung übereinstimmen. So können beispielsweise Schaltpläne unter Umständen durch ein zusätzliches Einzeichnen eines Knicks übersichtlicher gestaltet werden, während in der tatsächlichen Schaltung das Kabel an dieser Stelle linear verläuft. Leitungen in Schaltplänen geben also vielmehr an, *dass* Bauteile miteinander verbunden sind, nicht wie sie physikalisch angeordnet sind oder wie lang die Leitungen tatsächlich sind.

Kreuzungen und Verbindungen

Sind – insbesondere bei komplexeren Schaltungen – Leiterkreuzungen unvermeidbar, so wird im Normalfall angenommen, dass kein leitender Kontakt zwischen den sich kreuzenden Leitern besteht.



Abb. 11: Schaltzeichen einer Leitungs-Kreuzung.

Eine leitende Verbindung zweier (oder mehrerer) Leiter wird in Schaltplänen explizit mit einem schwarzen Punkt gekennzeichnet.

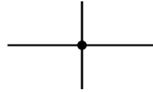


Abb. 12: Schaltzeichen einer Leitungs-Verbindung.

Die Masse (Ground)

Die von einer Stromquelle bereitgestellte Spannung bezieht sich stets auf ein Grundniveau; dieses beträgt normalerweise 0 V und wird als „Masse“ (auch „Ground“ oder „GND“) bezeichnet. Sowohl positive wie auch negative Spannungen, die bei Wechselstrom-Schaltungen auftreten, beziehen sich auf dieses Grundniveau. Bei Gleichstrom-Schaltungen entspricht das Masse-Niveau meist dem negativen Pol der Stromquelle.

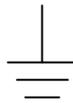


Abb. 13: Schaltzeichen der Masse (GND).

In Schaltplänen sind oft sehr viele Leitungen mit der Masse verbunden. Um Leitungskreuzungen zu vermeiden, die Schaltpläne oftmals unübersichtlich erscheinen lassen, werden oftmals die Leitungen zum Masse-Anschluss „abgeschnitten“ und stattdessen das Masse-Symbol eingezeichnet.

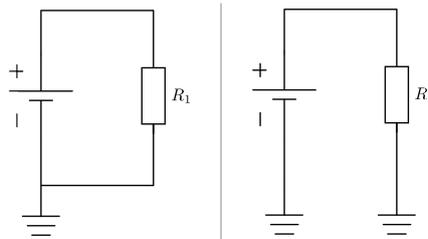


Abb. 14: Unterschiedliche Darstellungsformen für die Verbindung eines Bauteils mit dem Masse-Niveau.

In umfangreicheren Schaltungen wird bevorzugt die zweite Variante gewählt, da sich hierdurch unübersichtliche Leitungen beziehungsweise Leitungskreuzungen vermieden werden können. In einer realen Schaltung müssen alle derartigen „mit Masse verbundenen“ Punkte selbstverständlich auch physisch miteinander verbunden sein.

Feinsicherungen

Feinsicherungen werden eingesetzt, um in einem Stromkreis zu hohe Stromflüsse und damit eine mögliche Beschädigung der Bauteile zu verhindern. Dazu besteht eine

Feinsicherung aus einem sehr dünnen Draht in einer Glashülle, der bei einer zu großen Stromstärke „durchschmilzt“.

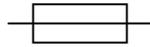


Abb. 15: Schaltzeichen einer Sicherung.

Schalter

Ein Schalter ist ein elektronisches Bauteil, mit dessen Hilfe eine leitende Verbindung zwischen zwei (oder mehreren) Punkten unterbrochen bzw. wiederhergestellt werden kann.

Neben den hier aufgelisteten „klassischen“ Schaltern können auch Transistoren als Schalter eingesetzt werden.

Ein-Aus-Schalter

Umgangssprachlich bezeichnet man mit einem Schalter meist eine Vorrichtung, die einen Stromkreis im „Aus“-Zustand unterbricht und im „Ein“-Zustand schließt.



Abb. 16: Schaltzeichen eines Schalters.

Für Schalter, die im Normalzustand geschlossen sind und bei Betätigung des Schalters geöffnet werden („Öffner“), existiert (meines Wissens nach) kein eigenes Schaltzeichen.

Wechselschalter

Als Wechselschalter wird eine Vorrichtung bezeichnet, die je nach Schalterstellung einen Stromkreis schließt und den (oder die) anderen öffnet.

Wechselschalter zwischen mehreren Stromkreisen werden häufig als Drehschalter in elektronische Geräte eingebaut und dienen als „Programmwähler“, beispielsweise in Waschmaschinen oder Multimetern.



Abb. 17: Schaltzeichen eines Wechselschalters.

Taster

Taster sind Vorrichtungen die, solange sie betätigt werden, einen Stromkreis schließen oder öffnen. Nach Ende der Betätigung kehren sie in ihren Ausgangszustand zurück.

Die meisten Taster sind als „Schließer“ gebaut, d.h. sie sind im Normalzustand geöffnet („normally open“ oder kurz „no“) und schließen den Stromkreis bei Betätigung.



Abb. 18: Schaltzeichen eines Tasters („normally open“).

Die seltenere Taster-Variante stellen die „Öffner“ dar, die im im Normalzustand geschlossen („normally closed“ oder kurz „nc“) sind und den Stromkreis bei Betätigung unterbrechen.



Abb. 19: Schaltzeichen eines Tasters („normally closed“).

Reedkontakte

Ein Reedkontakt besteht aus zwei biegsamen Metall-Streifen, die kontaktlos in ein hohles Glasröhrchen eingebaut sind. Durch ein äußeres Magnetfeld können die beiden Metall-Streifen in Kontakt gebracht werden. Reedkontakte funktionieren somit ebenfalls als Taster, wobei die Betätigung nicht auf mechanische, sondern auf magnetische Weise erfolgt.¹

¹ Ohne Magnetfeld kehrt ein Reedkontakt stets wieder in seine Ausgangsposition zurück

Auch Wechsel-Schalter lassen sich als Reedkontakte konstruieren, wenn der mittlere Metallstreifen im Normalfall mit dem unteren in Kontakt ist und durch Anlegen eines passenden Magnetfelds auf den oberen Metallstreifen „umschaltet“.

Relais

Ein Relais ist ein elektronischer Schalter; die Betätigung findet also nicht mechanisch, sondern durch eine elektrische Spannung beziehungsweise einen Stromfluss statt. Dabei wird bei einer ausreichenden elektrischen Spannung aus einer Spule mit Eisenkern ein Elektromagnet, der einen Reedkontakt als eigentlichen Schalter betätigt. Je nach Bauform lassen sich damit normale Schalter, Wechsel-Schalter sowie Schutz-Schalter konstruieren.

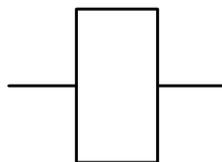


Abb. 20: Schaltzeichen eines Relais.

Widerstände

Das Wort „Widerstand“ hat in der Elektronik eine zweifache Bedeutung. Zum einen wird die den elektrischen Strom hemmende Eigenschaft von Materialien als Widerstand bezeichnet; zum anderen wird mit „Widerstand“ ein speziell zu diesem Zweck gefertigtes Bauteil bezeichnet.

„Normale“ Widerstände

Ein Widerstand besteht normalerweise aus einem isolierenden Porzellan-Körper, der mit einer dünnen Kohle- oder Metallschicht und einem Schutzlack überzogen ist.¹

¹ Früher waren auch Masse- und Drahtwiderstände weit verbreitet.

- Bei Massewiderständen bildet ein stabförmige Körper, der aus einem Gemisch an leitenden und nichtleitenden Stoffen besteht, den Widerstand. Der Widerstandswert hängt von der Art und der Dicke des verwendeten Materials ab.
- Bei einem Drahtwiderstand wird ein langer Draht auf ein isolierendes Keramik-Röhrchen aufgewickelt und an beiden Enden festgeklemmt. Der Widerstandswert hängt von der Art des Metalls, seiner Dicke und seiner Länge ab.

Gegenüber diesen Widerstandstypen haben Schichtwiderstände den Vorteil, dass sie kostengünstiger und in kleineren Bauformen herstellbar sind. Masse- und Drahtwiderstände werden heutzutage nur noch in Hochlast-Bereichen (ab ca. 4 W) eingesetzt, in denen die kleinen Kohle- und Metallschichtwiderstände durch eine zu hohe Wärme-Entwicklung zerstört würden.

Kohleschicht-Widerstände sind meist ockerfarben, Metallschicht-Widerstände blau lackiert. Auf dem Schutzlack ist schließlich der Widerstandswert in Form von farbigen Ringen aufgedruckt, um ihn auch ohne Lupe und von allen Seiten gleichermaßen lesbar zu machen.



Abb. 21: Schaltzeichen eines Widerstandes (allgemein).

Kohle- und Metallschicht-Widerstände unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Toleranz-Werte, d.h. durch die mögliche Abweichung des tatsächlichen Widerstandswertes vom aufgedruckten Wert. Metallschicht-Widerstände lassen sich präziser fertigen und weisen somit eine geringere Toleranz (meist 1%) auf, sind dafür allerdings auch geringfügig teurer. Für die meisten Zwecke reichen im Hobby-Bereich die günstigeren und etwas unpräziseren Kohleschicht-Widerstände (meist 5% oder 10% Toleranz) völlig aus.

Notation von Widerstandswerten

Widerstandswerte werden häufig mit zweierlei Besonderheiten angegeben:

1. Da die Werte von verschiedenen Widerständen sehr unterschiedlich sein können (von rund einem Ohm bis einigen Millionen Ohm), werden Widerstandswerte oft als **Zehnerpotenzen** angegeben, beispielsweise $47\text{ k}\Omega$ statt $47\,000\ \Omega$. Das Ω -Zeichen wird dabei sogar häufig weggelassen.
2. In Schaltplänen ist darüber hinaus als Schreibweise üblich, mögliche Nachkommastellen hinter den Potenzfaktor zu schreiben; ein Widerstandsangabe von $2\text{k}2$ entspricht somit einem Widerstandswert von $2,2\text{ k}\Omega$ bzw. $2\,200\ \Omega$. Auf diese Weise kann ausgeschlossen werden, dass man eine Kommastelle aus Versehen „überlesen“ könnte.

Farb-Codierung

Obwohl die Farben der aufgedruckten Farbringe stets die gleiche Bedeutung haben, unterscheiden sich Kohle- und Metallschicht-Widerstände in der Anzahl der auf ihnen aufgedruckten Ringe. Auf Kohleschicht-Widerständen werden, wie in Tabelle *Farbtabelle (Kohleschicht-Widerstände)* aufgelistet, stets *vier* Ringe aufgedruckt:

- Die ersten beiden Ringe stellen die ersten beiden Ziffern des Widerstandswertes dar.
- Der dritte Ring legt als Multiplikator die Anzahl der Nullen fest.
- Der vierte Ring, der bei Kohleschicht-Widerständen meist silbern oder golden ist, ist etwas nach rechts abgesetzt und gibt den Toleranzwert an; an seinem Abstand

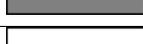
zu den übrigen Ringen kann man sich vergewissern, den Widerstandswert auch von der richtigen Seite her abzulesen.

Tab. 1: Farbtabelle (Kohleschicht-Widerstände)

Farbring	Farbe	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring
		1. Ziffer	2. Ziffer	Nullen	Toleranz
	schwarz	0	0	—	—
	braun	1	1	0	$\pm 1\%$
	rot	2	2	00	$\pm 2\%$
	orange	3	3	000	—
	gelb	4	4	0 000	—
	grün	5	5	00 000	$\pm 0,5\%$
	blau	6	6	000 000	—
	violett	7	7	0 000 000	—
	grau	8	8	00 000 000	—
	weiß	9	9	000 000 000	—
	gold	—	—	—	$\pm 5\%$
	silber	—	—	—	$\pm 10\%$

Auf die präziseren Metallschicht-Widerstände werden, wie in Tabelle *Farbtabelle (Metallschicht-Widerstände)* wiedergegeben, stets *fünf* Ringe aufgedruckt. Der Widerstandswert wird mit vier Ringen dargestellt, wobei die ersten drei Ringe die ersten drei Ziffern des Widerstandswertes darstellen und der vierte Ring als Multiplikator die Anzahl der anzufügenden Nullen angibt. Auf diese Weise sind auch feinere Abstufungen der Widerstandswerte wie beispielsweise $4,7\ \Omega$ darstellbar.

Tab. 2: Farbtabelle (Metallschicht-Widerstände)

Farbring	Farbe	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring	5. Ring
		1. Ziffer	2. Ziffer	3. Ziffer	Nullen	Toleranz
	schwarz	0	0	0	—	—
	braun	1	1	1	0	$\pm 1\%$
	rot	2	2	2	00	$\pm 2\%$
	orange	3	3	3	000	—
	gelb	4	4	4	0 000	—
	grün	5	5	5	00 000	$\pm 0,5\%$
	blau	6	6	6	000 000	—
	violett	7	7	7	0 000 000	$\pm 0,1\%$
	grau	8	8	8	00 000 000	—
	weiß	9	9	9	000 000 000	—
	gold	—	—	—	0,1	$\pm 5\%$
	silber	—	—	—	0,01	$\pm 10\%$

Beispiel:

Ein häufig auftretender Widerstandswert ist 470Ω – ein Widerstand dieser Größe wird beispielsweise benötigt, um eine normale Leuchtdiode an einer 9V-Batterie bzw. einem entsprechenden Akku anzuschließen (siehe *Leuchtdiode mit Vorwiderstand*). Angenommen, dass es sich um einen Kohleschicht-Widerstand handelt, so entspricht die erste Ziffer (4) einem gelben Ring, die zweite Ziffer (7) einem violetten. An den so codierten Wert (47) muss noch eine Null angehängt werden; dies lässt sich erreichen, indem der dritte Ring in brauner Farbe aufgedruckt wird.

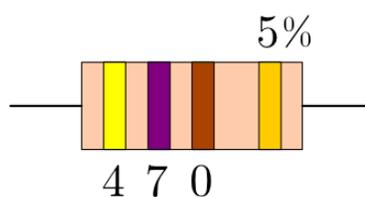


Abb. 22: Farbringe eines 470Ω -Widerstands.

Ist der vierte Ring des Kohleschicht-Widerstandes goldfarben, so ist eine Toleranz von 5% erlaubt – der tatsächliche Wert des Widerstands liegt somit zwischen $446,5\Omega$ und $493,5\Omega$.

Temperaturabhängige Widerstände

Fast alle elektrischen Bauteile weisen bei höheren Temperaturen auch einen meist geringfügig höheren Widerstand auf; es gibt allerdings auch (Halbleiter-)Materialien, bei

denen diese Temperaturabhängigkeit sehr stark ausgeprägt ist. Als spezielle Widerstände werden diese besonderen Materialien häufig als Temperatur-Sensoren eingesetzt.

PTC-Widerstände

Als „Kaltleiter“ oder PTC-Widerstand („PTC“ = „Positive Temperature Coefficient“) werden Stoffe bezeichnet, deren Widerstand bei steigenden Temperaturen zunimmt.

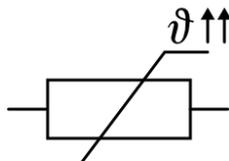


Abb. 23: Schaltzeichen eines Kaltleiters (PTC).

Typische Heißleiter-Werkstoffe sind beispielsweise Kohle, Halbleiter, oder bestimmte Metall-Oxide; sie werden unter anderem als schnelle und robuste Temperaturfühler sowie zur Spannungsstabilisierung verwendet.

NTC-Widerstände

Als „Heißleiter“ oder NTC-Widerstand („NTC“ = „Nositive Temperature Coefficient“) werden Stoffe bezeichnet, deren Widerstand bei steigenden Temperaturen abnimmt.

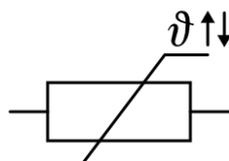


Abb. 24: Schaltzeichen eines Heißleiters (NTC).

Typische Kaltleiter-Werkstoffe sind beispielsweise reine Metalle oder halbleitende Werkstoffe aus Titanat-Keramiken wie BaTiO_3 oder 3eSrTiO_3 ; sie werden unter anderem als Temperaturfühler, Thermostate sowie zur Stromstabilisierung verwendet.

Fotowiderstände

Fotowiderstände – auch „LDR“ (Light Dependend Resistor) genannt – haben, wenn sie voll beleuchtet werden, einen Widerstand von einigen hundert Ω . Bei sinkender Lichtintensität steigt der Widerstand – je nach Bauart – bis auf einige $\text{M}\Omega$ an.

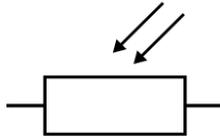


Abb. 25: Schaltzeichen eines Fotowiderstandes.

Die Widerstandsänderung eines Fotowiderstands geschieht vergleichsweise langsam; sie kann mit Hilfe eines Ohmmeters bei verschiedenen Beleuchtungsstärken leicht beobachtet werden. Gleichzeitig sind Fotowiderstände aufgrund ihrer „Trägheit“ nicht für schnelle optische Signalübertragungen (z.B. Infrarot-Fernbedienungen) geeignet. Hierfür werden vielmehr Fotodioden und Fototransistoren eingesetzt.

Varistoren

Als Varistoren (auch „Voltage Dependend Reistor“ oder kurz VDR genannt) bezeichnet man elektrische Widerstände, deren Wert von der anliegenden Spannung abhängig ist.

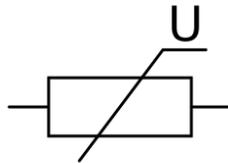


Abb. 26: Schaltzeichen eines Varistors.

Die Kennlinie eines Varistors sieht etwa folgendermaßen aus:

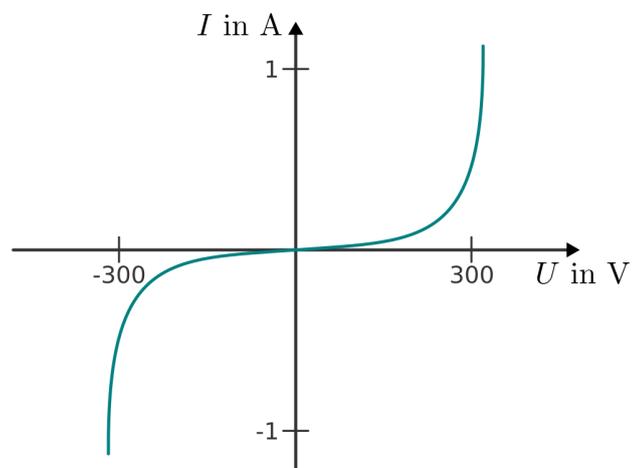


Abb. 27: Strom-Spannungs-Kennlinie eines Varistors.

Bis zu einer Spannung von knapp 300 V haben Varistoren einen sehr hohen Widerstandswert; ab einer derart hohen Spannung jedoch sinkt ihr Widerstandswert erheblich ab. Varistoren werden daher als Überspannungsschutz in Netzteilen und Steckdosenleisten eingebaut, um empfindliche elektronische Geräte wie Computer vor möglichen Spannungsspitzen zu schützen, wie sie beispielsweise bei einem Blitz-Einschlag auftreten können.

Da im Bereich der Hobby-Elektronik aus Sicherheitsgründen nicht mit Netzspannungen experimentiert wird, werden Varistoren in Bastel-Projekten kaum eingesetzt.

Regelbare Widerstände

Ein regelbarer Widerstand ist ein Widerstand, dessen Widerstandswert über einen Schleifkontakt (meist) von null bis zum angegebenen Höchstwert verändert werden kann. Dabei unterscheidet man zwischen auch im laufenden Betrieb regelbaren Potentiometern und fest einstellbaren Trimmwiderständen.

Potentiometer

Ein Potentiometer (kurz: „Poti“) ermöglicht eine Einstellung des Widerstandswertes von außen mit Hilfe eines Drehknopfes oder Schiebers.

Jedes Potentiometer besitzt drei Anschlüsse, wobei zwischen den beiden äußeren Anschlüssen der auf dem Potentiometer angegebene Widerstandswert in voller Höhe auftritt. Wird ein Ende und der mittlere Abgriff des Potentiometers mit dem Stromkreis verbunden, so kann der Widerstand mit Hilfe des Drehknopfes zwischen null und dem maximalen Wert verändert werden.

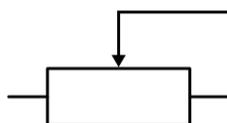


Abb. 28: Schaltzeichen eines Potentiometers.

Potentiometer finden häufig Einsatz als Dreh- bzw. Schieberegler, beispielsweise bei der Einstellung der Lautstärke an einem Radio.

Trimmwiderstände

Ein Trimmwiderstand („Einstellpoti“) kann nur mit Hilfe eines Schraubenziehers justiert werden. Da Trimmwiderstände meist fest verbaute Bestandteile einer Schaltung sind, ist eine Nachjustierung im laufenden Betrieb normalerweise nicht vorgesehen.

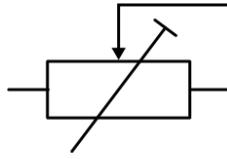


Abb. 29: Schaltzeichen eines Trimmwiderstands.

Hinweis: Zu diesem Abschnitt gibt es *Übungsaufgaben*.

Glühbirnen

Im Jahr 1879 fand [Thomas Alva Edison](#) heraus, dass stromdurchflossene Kohlefäden zwar weißglühend leuchten, jedoch nicht verbrennen, wenn man sie in eine Ummantelung aus Glas steckt und die Luft heraus pumpt. Mit dieser Entdeckung gewann die Elektronik schnell an Bedeutung.

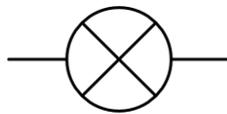


Abb. 30: Schaltzeichen einer Glühlampe.

Kondensatoren

Ein Kondensator ist ein kleiner Ladungsspeicher. Er besteht im wesentlichen aus zwei Metallflächen, die sich im Bauteil – durch einen Isolator voneinander getrennt – gegenüber liegen. Kondensatoren stellen somit technische Verwirklichungen von [Plattenkondensatoren](#) dar.

Kondensatoren werden in elektrischen Schaltkreisen zu vielerlei Zwecken eingesetzt: Sie können beispielsweise elektrische Energie zwischenspeichern, Schwankungen in Gleichspannungs-Netzteilen ausgleichen, Frequenzen filtern oder das Verhalten von Kipp-schaltungen beeinflussen. Sie sind daher als elementares Bauteil in fast jeder Schaltung zu finden.

„Normale“ Kondensatoren

Ohne eine anliegende Spannung verteilen sich die Elektronen im Kondensator gleichmäßig über die Metallplatten und die Verbindungsleitungen. Liegt an einem Kondensator eine Gleichspannung an, so fließen kurzzeitig zusätzliche Elektronen auf die mit dem Minus-Pol verbundene Metallfläche, von der mit dem Plus-Pol verbundenen Metallfläche werden Elektronen weggezogen – die Kondensator-Platten laden sich elektrisch auf.

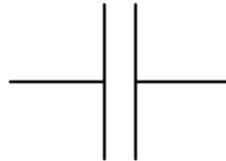


Abb. 31: Schaltzeichen eines Kondensators.

Während sich der Kondensator durch den externen Stromfluss auflädt, erhöht sich die Spannung, die zwischen seinen Metallplatten anliegt – der Kondensator wird selbst zu einer kleinen Spannungsquelle. Allerdings ist die Menge an elektrischer Ladung, die der Kondensator bei einer anliegenden externen Spannung speichern kann, begrenzt.

Definition: Das Verhältnis aus maximal speicherbarer Ladung Q bei einer externen Spannung U wird als Kapazität C des Kondensators bezeichnet:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3)$$

Einheit: Die Kapazität eines Kondensators wird in Farad (F) angegeben.

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}}$$

Beispiele:

- Ein Kondensator, der durch eine Stromstärke von einem Ampere in einer Sekunde auf eine Spannung von einem Volt aufgeladen wird, hat eine Kapazität von einem Farad. Eine derartige Kapazitätsmenge ist enorm hoch.
- Die Werte von normalen Folien- und Keramik-Kondensatoren liegen im Bereich einiger pF- oder nF, maximal einiger μF . Der Kapazitätswert ist auf jedem Kondensator mit der unten genannten Notation aufgedruckt.

$$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F} = \frac{1}{1\,000\,000\,000\,000} \text{ F} = 0,000\,000\,000\,001 \text{ F}$$

$$1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F} = \frac{1}{1\,000\,000\,000} \text{ F} = 0,000\,000\,001 \text{ F}$$

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ F} = 0,000\,001 \text{ F}$$

Notation von Kondensatorwerten

Auf jedem Kondensator ist aufgedruckt, welche Kapazität er besitzt und welche elektrische Spannung maximal an ihm anliegen darf. Die Werte werden – ähnlich wie *Widerstandswerte* – mit folgenden Besonderheiten angegeben:

1. Der Kapazitätswert eines Kondensators, beispielsweise 10 nF, wird in Schaltplänen und auf Bauteilen oft in Klarschrift angegeben (10 n, das „F“ wird weggelassen). Teilweise findet man den Kapazitätswert eines Kondensators jedoch auch in Potenzschreibweise (10^3) aufgedruckt. Hierbei geben die ersten beiden Ziffern den Kondensator-Wert (10) und die dritte Ziffer die *Zehnerpotenz* ($\cdot 10^3$) an. Die Wertangabe bezieht sich dabei auf Pikofarad als kleinste Kapazität handelsüblicher Kondensatoren. Es gilt:

$$1 \text{ nF} = 1\,000 \text{ pF} = 1 \cdot 10^3 \text{ pF}$$

$$1 \mu\text{F} = 1\,000 \text{ nF} = 1 \cdot 10^6 \text{ pF}$$

2. Ähnlich wie bei Widerständen werden Nachkommastellen stets hinter den Potenzfaktor geschrieben; eine Kapazitätsangabe von $2n2$ entspricht somit einem Kapazitätswert von 2,2 nF. Auf diese Weise ist ausgeschlossen, dass man eine Kommastelle aus Versehen „überlesen“ könnte.
3. Nach der Kapazitätsangabe ist auf Kondensatoren meist direkt ein einzelner Buchstabe aufgedruckt, der die Toleranzklasse des Kondensators angibt. *J* bedeutet beispielsweise eine Toleranz von $\pm 5\%$.
4. Schließlich ist noch der Wert der maximalen Spannung aufgedruckt, die an den Kondensator angelegt werden darf (beispielsweise 100 für 100 Volt).

Anschauliches Modell für Kondensatoren

Ein einfaches physikalisches Modell zur Beschreibung von *Stromstärke*, *Spannung* und *Widerstand* ist es, sich einen elektrischen Stromfluss wie einen Wasserstrom vorzustellen. Bleibt man bei diesem Modell, so kann man sich für einen Kondensator etwa folgendes Modell vorstellen: Bilden die Leitungen ein Röhrensystem, so kann man sich einen Kondensator als Hohlzylinder vorstellen, in dem sich ein genau passender, aber frei beweglicher Kolben befindet; dieser soll also einerseits den Hohlzylinder in zwei voneinander getrennte Halbkammern unterteilen, andererseits jedoch ohne nennenswerte Reibung beweglich sein. Im Ruhezustand soll der Kolben durch zwei an den Seitenwänden befestigten Schraubenfedern in einer mittigen Position gehalten werden.

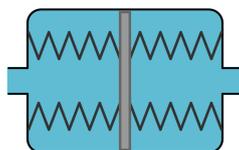


Abb. 32: Wasser-Modell eines Kondensators.

Wird in diesem Modell beispielsweise auf die linke Seite des Kolbens ein größerer Druck ausgeübt als auf die rechte, so verschiebt sich der Kolben nach rechts. Man erhält dabei scheinbar einen „Stromfluss“ durch den Kondensator, denn links fließt ebenso viel (Wasser) in ihn hinein wie auf der rechten Seite herausfließt. Es handelt sich zwar nicht um die selben Wasser-Teilchen, da die beiden Halb-Kammern voneinander isoliert sind, aber rein quantitativ kann man trotz des Kolbens als Trennschicht einen Transport an Wasserteilchen „durch“ den Kondensator beobachten.

Wird der Kolben durch das zufließende Wasser aus seiner Ruhelage ausgelenkt, so baut sich in den Schraubenfedern zunehmend eine (mechanische) Gegen-Spannung auf. Der Kolben wird solange verschoben, bis die Gegenspannung in den Federn den an einer Seite anliegenden Überdruck ausgleicht. Liegt kein einseitiger Überdruck mehr an, kehrt der Kolben in den Ruhezustand zurück, wodurch es wiederum zum Ladungstransport „durch“ den Kondensator kommt.

Kondensatoren im Gleichstromkreis

Um einen Kondensator komplett aufzuladen, sind je nach Kapazität des Kondensators und der Stärke des Ladestroms oft nur wenige Sekunden oder sogar Sekundenbruchteile nötig. Durch das Aufladen des Kondensators und die sich dabei aufbauende Spannung zwischen den Kondensatorplatten verläuft der Aufladevorgang anfangs schnell und dann zunehmend langsamer.

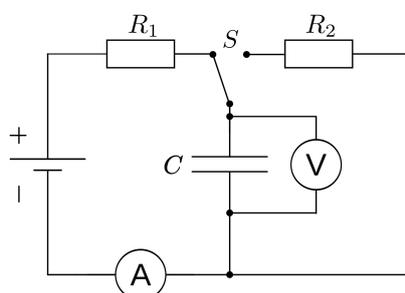


Abb. 33: Prinzipieller Aufbau einer Schaltung zur Bestimmung der Ladekurve eines Kondensators mit Vorwiderstand.

Der Ladevorgang kommt dann zum Stillstand, wenn die Spannung U_C zwischen den beiden Kondensator-Platten gleich der Ladespannung U_0 ist; der Kondensator ist dann geladen, und es kann kein weiterer Strom mehr „durch“ den Kondensator fließen. Als Diagramm erhält man für den Lade- beziehungsweise Entladevorgang eines Kondensators etwa folgende Kennlinie:

Aus mathematischer Sicht kann der zeitliche Verlauf der Spannung U_C zwischen den Kondensator-Platten folgendermaßen beschrieben werden:

$$U_C = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4)$$

Für den Ladestrom I_C gilt entsprechend:

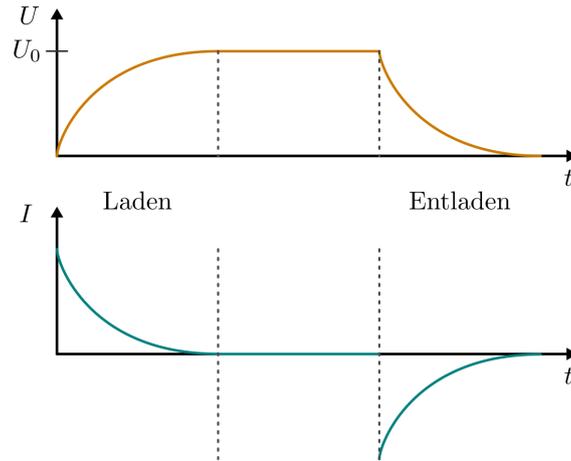


Abb. 34: Kennlinie eines Kondensators beim Auf- und Entladen.

$$I_C = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

Hierbei ist $\tau = R \cdot C$ die sogenannte Zeitkonstante. Nach einer Zeit von $t = 1 \cdot \tau$ hat die Kondensator-Spannung $1 - \frac{1}{e} \approx 63\%$ ihres Endwerts erreicht; der Ladestrom fällt nach der gleichen Zeit auf auf 63% seines Anfangswertes ab.¹

Kondensatoren im Wechselstromkreis

Legt man an einen Kondensator eine Wechselspannung an, so fließt wechselnd ein Lade- beziehungsweise Entladestrom. Ein Kondensator wirkt in einem Wechselstromkreis wie ein Widerstand.

Während der Auflade-Vorgänge wird elektrische Energie auf den Kondensator übertragen, die während der Entlade-Vorgänge wieder vom Kondensator abgegeben wird; im zeitlichen Durchschnitt ist daher der Mittelwert der auftretenden elektrischen Leistungen an einem (idealen) Kondensator gleich Null. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „Blindleistung“; den Kondensator bezeichnet man in einem Wechselstromkreis als „Blindwiderstand“ oder „kapazitiven Scheinwiderstand“.

Der kapazitative Scheinwiderstand ist von der Kapazität des Kondensators und der Frequenz des Wechselstroms abhängig; je größer die Kapazität C und je höher die Frequenz

¹ Wird der Kondensator von der Spannungsquelle getrennt und über einen Widerstand R entladen, so gilt folgende Gleichung für die Spannung U_C während des Entladens:

$$U_C = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

Für den Entladestrom I_C gilt entsprechend:

$$I_C = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

f des Wechselstroms ist, desto, desto niedriger ist der kapazitative Scheinwiderstand des Kondensators:

$$R_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Hierbei wird mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Kreisfrequenz des Wechselstroms bezeichnet.

Trimmkondensatoren

Als Trimmkondensator (auch Dreh-Kondensator oder kurz „Drehko“ genannt) bezeichnet man einen Kondensator mit einer einstellbaren Kapazität; diese reicht von Null bis zum angegebenen Höchstwert.

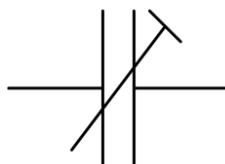


Abb. 35: Schaltzeichen eines Drehkondensators.

Der Kapazitätswert von Drehkondensatoren kann üblicherweise mittels eines Drehknopfs eingestellt werden. Da sich bei den meisten Drehkondensatoren Luft zwischen den Kondensatorplatten befindet, liegen die maximalen Kapazitätswerte meist unter 500 pF. Derartige Kondensatoren werden beispielsweise in Radios eingesetzt, um den Empfänger auf verschiedene Senderfrequenzen einstellen zu können.

Elektrolyt-Kondensatoren

Elektrolyt-Kondensatoren („Elkos“) haben meist hohe Kapazitätswerte von etwa $0,1 \mu\text{F}$ bis $1000 \mu\text{F}$, oder sogar mehr. Elektrolyt-Kondensatoren sind allerdings polarisiert, sie besitzen also jeweils einen Plus- und einen Minus-Anschluss, die man nicht vertauschen darf. Die Anschlüsse sind deutlich gekennzeichnet, meist durch aufgedruckte Minus-Zeichen am Minus-Anschluss. Bei neuen Elkos kann man den Pluspol zusätzlich am längeren Anschlussdraht erkennen.

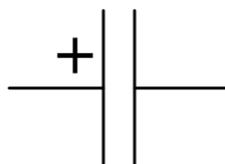


Abb. 36: Schaltzeichen eines Elektrolyt-Kondensators.

Bei der Verwendung von Elektrolyt-Kondensatoren muss man nicht nur auf richtige Polung achten, sondern auch berücksichtigen, dass ihre Kapazität im Laufe der Zeit beachtlich abnehmen kann. Elektrolyt-Kondensatoren sollten folglich nur an Stellen verbaut werden, an denen eine Abweichung des Kapazitätswerts für die Schaltung keine allzu große Rolle spielt.

Hinweis: Zu diesem Abschnitt gibt es *Übungsaufgaben*.

Elektronenröhren

Die Erfindung der Elektronenröhre

Die Erfindung der Elektronenröhre im Jahr 1883 ging ebenfalls auf **Thomas Alva Edison** zurück. Er brachte in den Glaskolben einer seiner Glühlampen eine kleine Metallplatte ein, in der Hoffnung, dass sich dadurch die Lampeninnenseite durch die aus dem stromdurchflossenen Kohlefaden austretende Rußpartikel nicht schwärzen würde. Diese „Staubteilchen“ sollten sich, so die Hoffnung Edisons – vielmehr an der Metallplatte anlagern. Dazu verband Edison die Metallplatte von außen mit dem Stromkreis, der den glühenden Faden heizte. Aus Interesse schloss Edison zusätzlich ein Amperemeter an den Draht an.

Tatsächlich zeigte das Amperemeter einen schwachen Strom an, obwohl nur *ein* Draht mit der Metallplatte verbunden war; der Stromkreis war daher nicht geschlossen. In weiteren Experimenten fand Edison heraus, dass nur dann ein Strom durch das Amperemeter floss, wenn die Metallplatte mit dem positiven Pol der Stromquelle verbunden war – lag eine negative Spannung an der Platte an, so floss kein Strom. Edison bezeichnete die positiv geladene Metallplatte später als Anode.

Ohne es zu ahnen, hatte Edison damit die erste Röhrendiode entwickelt.

Elektronenröhren-Dioden

Eine Röhrendiode (*di* = griech. zwei) besteht aus einem vakuumierten Glaskolben, in den zwei metallische Elektroden – eine Kathode und eine Anode – eingebaut sind.



Abb. 37: Schaltzeichen einer Röhrendiode.

Die Kathode K besteht aus einem sehr dünnen Draht, der sich bei anliegender Spannung aufgrund seines elektrischen Widerstands in kurzer Zeit bis zur Weißglut erhitzt. Auf-

grund der hohen thermischen Energie verlassen dabei auch Elektronen den Draht und umgeben ihn in Form einer winzigen „Ladungswolke“. Beim Herauslösen der Elektronen bleiben in der Kathode positiv geladene Atomrümpfe zurück. Diese üben eine elektrische Anziehungskraft auf die ausgetretenen Elektronen aus, so dass sich ein Gleichgewicht zwischen der thermischen Bewegung und der elektrischen Anziehung einstellt.

Die Anode A besteht, wie in Edisons Versuch, aus einer kleinen Metallplatte. Wird an dieser eine genügend große positive Spannung angelegt, so lassen sich Elektronen von der Kathode zur Anode hin „absaugen“. Damit ergibt sich folgender Stromkreis: Ausgehend vom Minuspol der Stromquelle treten die Elektronen an der glühenden Kathode aus, strömen durch das Vakuum und fließen über die Anode zum Pluspol Stromquelle zurück.

Bei einer Umpolung der anliegenden Spannung tritt in der Elektronenröhre kein Stromfluss auf. Aufgrund dieser Eigenschaft, elektrischen Strom nur in eine Richtung fließen zu lassen, wurden Röhrendioden eine Zeit lang als Gleichrichter eingesetzt. Inzwischen wurden sie weitestgehend durch *Halbleiter-Dioden* ersetzt, da diese bei gleicher Funktionalität kleiner und kostengünstiger hergestellt werden können und zugleich weniger elektrische Energie benötigen.

Elektronenröhren-Trioden

Eine Röhrentriode (*tri* = griech. drei) ist prinzipiell wie eine Röhrendiode aufgebaut, mit dem Unterschied, dass sich zwischen Kathode und Anode ein metallischer Draht in Zickzack-Form („Gitter“) als dritte Elektrode befindet.

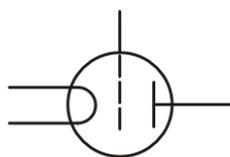


Abb. 38: Schaltzeichen einer Röhrentriode.

Über die am Gitter G anliegende Spannung ist es auf einfache Weise möglich, die Stärke des durch die Elektronenröhre fließenden Stromes zu bestimmen:

- Liegt keine Spannung am Gitter an, so können die Elektronen es (nahezu) ungehindert durchdringen. Der Strom in der Elektronenröhre entspricht in diesem Fall dem einer Röhrendiode (ohne Gitter).
- Liegt eine negative Spannung am Gitter an, so wirkt es auf die von der Kathode kommenden Elektronen abstoßend – es gelangen somit nur weniger Elektronen zur Anode. Der Strom in der Elektronenröhre wird abgeschwächt.

Bereits mit einer schwachen Gitterspannung kann somit schnell und präzise der eigentliche Elektronenstrom in der Röhrentriode geregelt werden. Diese elektronische Steuerung ist sogar so schnell, dass auch rasch wechselnde Spannungen wie Antennensignale (einige

MHz!) auf den eigentlichen Elektronenstrom in der Röhre „abgebildet“ und aus diesem wieder „herausgelesen“ werden können.¹

Die Signal verstärkende Wirkung von Röhrentrioden bildete die Grundlage für die Rundfunk- und Fernseh-Technik des 20. Jahrhunderts. Inzwischen wurden sie insbesondere aufgrund des vergleichsweise hohen Platzbedarfs und der hohen Herstellungskosten bis auf wenige Spezialfälle durch Transistoren ersetzt.

Dioden

Ähnlich wie eine *Röhrendiode* stellt eine Halbleiter-Diode eine „elektrische Einbahnstraße“ dar; elektrischer Strom kann eine Halbleiter-Diode in nur einer Richtung passieren.

„Normale“ Dioden

Eine Diode verfügt über zwei Anschlüsse, die als Anode und Kathode bezeichnet werden. Strom kann nur durch eine Diode fließen, wenn die Anode zum Plus- und die Kathode zum Minus-Pol zeigt; in der Gegenrichtung sperrt sie. Auf dem Bauteil ist die Kathoden-Seite durch ein schwarzen oder weißen Ring gekennzeichnet. Ab einer anliegenden Spannung von etwa $U_D = 0,7 \text{ V}$ bei Silizium-Dioden beziehungsweise $0,3 \text{ V}$ bei Germanium-Dioden beginnt in Durchlassrichtung Strom zu fließen.

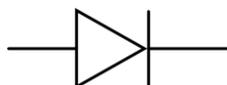


Abb. 39: Schaltzeichen einer Diode. Der linke Anschlussdraht wird Anode, der rechte Kathode genannt.

Beim Durchgang durch eine Silicium-Diode fällt die Spannung (anders als bei Ohmschen Widerständen, die zum Durchlassen einer größeren Stromstärke stets auch eine größere anliegende elektrische Spannung benötigen) relativ konstant um $0,7 \text{ V}$ ab – weitgehend unabhängig von der Stärke des fließenden Stroms. Das Ohmsche Gesetz $U = R \cdot I$ ist somit nicht auf Dioden anwendbar.

Legt man eine entgegengesetzte Spannung U_S an, so verhält sich eine Diode bis zu einem bestimmten Spannungswert wie ein Isolator – die Diode „sperrt“. Wird der Spannungswert, der vom Bautyp und Material der Diode abhängt, überschritten, so nimmt die

¹ Die Projektion des Steuersignals auf den durch die Röhre fließenden Strom erzeugt ein „Negativ“ des eigentlichen Signals: Ist das Antennensignal stark, so wird der Stromfluss in der Triode minimal und umgekehrt. Um ein verstärktes Signal zu erhalten, das mit dem Ausgangssignal identisch ist, wird der Prozess zweimal durchlaufen, d.h. die auf die Anode der ersten Röhrentriode gelangenden Elektronen werden zum Gitter der zweiten Triode weitergeleitet und dienen dort als Reglersignal.

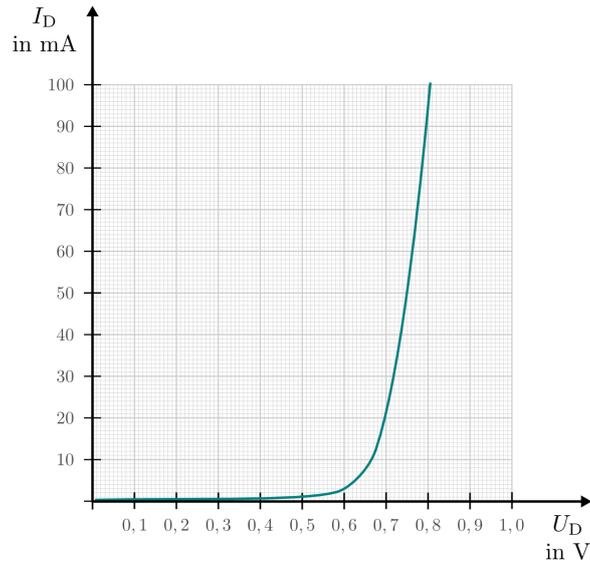


Abb. 40: Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung.

(ebenfalls in Gegenrichtung) fließende Stromstärke I_S rasant zu; die Diode kann dabei schnell überhitzt bzw. zerstört werden.

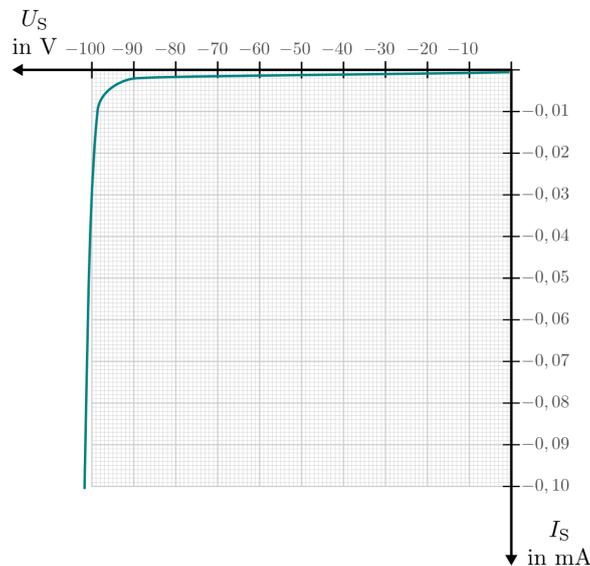


Abb. 41: Kennlinie einer 100 V-Diode in Sperrichtung.

Auf jeder Diode sind zwei charakteristische Werte aufgedruckt:

- Die in Volt angegebene Spannung sagt aus, mit welcher Spannung die Diode maximal entgegen der Durchlassrichtung (in „Sperrichtung“) betrieben werden darf.
- Die in (Milli-)Ampere angegebene Stromstärke gibt an, welcher Strom maximal (in Durchlassrichtung) durch die Diode fließen darf.

Beide Werte dürfen nicht überschritten werden, da die Diode ansonsten zerstört werden kann.

Beispiel:

- Für die Diode 1N4001 sind die Werte 50 V/1 A angegeben; die maximale Spannung in Sperrichtung darf somit höchstens 50 V, die maximale Stromstärke in Durchlassrichtung höchstens 1 A betragen.

Die Shockley-Gleichung

Aus mathematischer Sicht kann die $I(U)$ -Kennlinie einer Diode oberhalb der Durchbruchspannung durch die sogenannte Shockley-Gleichung beschrieben werden:

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{n \cdot U_T}} - 1 \right) \quad (8)$$

Hierbei treten folgende Parameter auf:

- I_S gibt den Sättigungs-Sperrstrom der Diode an; dieser ist von verschiedenen Bauteileigenschaften sowie der Temperatur abhängig. Bei gewöhnlichen Siliziumdioden und bei Raumtemperatur ist $I_S \approx 10 \mu\text{A}$.
- Mit n wird der Emissionskoeffizient (eine Materialeigenschaft) bezeichnet; bei einer idealen Diode ist $n = 1$, bei einer realen Diode ist $1 < n < 2$. Oft wird $n = 1$ angenommen und somit aus der Formel weggelassen.
- U_T wird „Temperaturspannung“ genannt; sie beträgt bei Raumtemperatur etwa $U_T \approx 0,026 \text{ V}$.

Wie man an der Gleichung (8) erkennen kann, hat die $I(U)$ -Kennlinie einer Diode einen exponentiellen Verlauf. Derartige Kurven lassen sich häufig besser mit Hilfe einer logarithmischen Skala darstellen.¹

Leuchtdioden

Leuchtdioden („Light Emitting Diodes“, kurz: LEDs) sind spezielle Dioden, die in einem durchsichtigen Gehäuse eingebaut sind und aufleuchten, wenn Strom durch sie fließt. Die übliche Betriebsspannung einer Leuchtdiode liegt normalerweise bei $U = 1,4 \text{ V}$; maximal darf an LEDs (je nach Bautyp) eine Spannung von $1,6 \text{ V} \leq U_{\text{max}} \leq 2,4 \text{ V}$ angelegt werden.² Die Stromstärke I beträgt dabei zwischen 15 mA und 25 mA.

¹ Bei einer „normalen“ Skalierung steht eine jeweils gleiche Strecke für eine *Addition* eines gleichen Werts. Bei einer logarithmischen Skalierung hingegen drückt eine gleiche Strecke eine *Multiplikation* mit einem gleichen Faktor aus; mit einer logarithmischen Skalierung können somit sowohl kleine wie auch große Zahlenbereiche mit einer gleichen Darstellungstiefe in einem einzigen Diagramm dargestellt werden.

² Die zulässigen Spannungen von Leuchtdioden sind je nach Helligkeit und Farbe unterschiedlich; hierbei sind die Herstellerangaben zu beachten. Typischerweise liegt die Betriebsspannung bei roten LEDs bei 1,9 V, bei gelben LEDs bei 2,0 V, bei grünen LEDs bei 2,4 V. Blaue und weiße LEDs werden teilweise sogar mit 3 bis 3,5 V betrieben. Die Stromstärke liegt jeweils bei 20 mA.

Damit LEDs nicht durch zu große Spannungen beziehungsweise Stromstärken zerstört werden können, sollte man beim Betrieb von LEDs stets auf einen passenden *Vorwiderstand* achten.

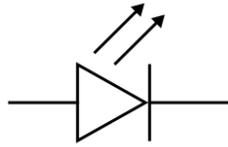


Abb. 42: Schaltzeichen einer Leuchtdiode (LED).

Die Anode der Leuchtdiode, die durch einen längeren Anschlussdraht gekennzeichnet ist, muss mit dem Pluspol und die Kathode mit dem Minuspol der Stromquelle verbunden sein. Die Anoden- und Kathodenseite einer LED lässt sich, wie in Abbildung *Bauform Leuchtdiode* dargestellt, ebenfalls anhand ihres Innenaufbaus erkennen.

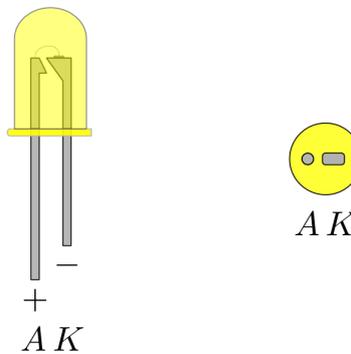


Abb. 43: Bauform einer Leuchtdiode (LED).

Leuchtdioden haben eine Vielzahl an wichtigen Eigenschaften: Sie benötigen nur eine geringe Betriebsspannung, sie unempfindlich gegen Stöße, benötigen nur wenig Platz und haben einen nur geringen Strombedarf. Zudem haben Leuchtdioden sehr schnelle Reaktionszeit: Sie können in einer Sekunde tausende Male ein- und wieder ausgeschaltet werden und daher, ähnlich wie früher die „Morse-Tasten“, bei einer geeigneten Codierung zur Signalübertragung verwendet werden.

Photodioden

Trifft Licht auf eine Photodiode, so wird in dieser ein elektrischer Strom ausgelöst, der als Photostrom I_P bezeichnet wird. Je nach Ausführung liegt die Lichtempfindlichkeit der Photodiode im Infrarot-, Ultraviolett- oder im sichtbaren Bereich des Lichts.

Solarzellen

Eine Solarzelle besteht im Prinzip ebenfalls aus einer großflächigen Photodiode. Häufig bestehen Solarzellen aus dünnen Silicium-Scheiben, die auf der Vorderseite p -dotiert und auf der Rückseite n -dotiert sind. Beide Seiten sind dabei mit gitter-artigen elektrischen Kontakten versehen.

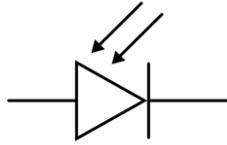


Abb. 44: Schaltzeichen einer Fotodiode.

Gelangt Licht durch die sehr dünne n -dotierte Schicht hindurch auf die p -dotierte Schicht, so werden dort Elektronen aus ihren Bindungen heraus gelöst; es werden also Elektronen-Loch-Paare erzeugt. In der n -dotierten Schicht sammelt sich dadurch ein Überangebot an Elektronen an. Diese Elektronen werden allerdings durch die Sperrschicht der Diode daran gehindert, unmittelbar wieder für einen Ladungsausgleich zu sorgen. Die Elektronen fließen vielmehr durch den äußeren Stromkreis zur p -dotierten Schicht zurück.

Wird eine Solarzelle beleuchtet, dann liegt an ihren Polen eine Spannung von ca. 0,6 V an („Leerlaufspannung“). Diese Spannung sinkt ab, wenn ein Verbraucher angeschlossen wird.

Z-Dioden

Bei normalen Dioden wird der Effekt genutzt, dass der Strom die Diode nur in eine Richtung passieren kann, die Diode also in die Gegenrichtung sperrt. Z-Dioden (bisweilen auch nach dem Erfinder [Clarence Zener](#) auch „Zener-Dioden“ genannt) werden hingegen bewusst so gebaut, dass sie ab einer bestimmten (Durchbruch-)Spannung in Gegenrichtung leitfähig werden.

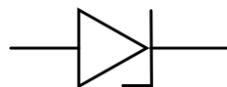


Abb. 45: Schaltzeichen einer Z-Diode.

Eine Z-Diode verhält sich in Sperrichtung entspricht im Wesentlichen so wie eine normale Diode in Vorwärtsrichtung. Hat beispielsweise eine Z-Diode eine Durchbruchspannung von $U = 5,6 \text{ V}$, so kann erst ab dieser Spannung ein Strom in Sperrichtung fließen. Bei höheren Spannungen nimmt die Stromstärke (entsprechend der Abbildung *Kennlinie einer Diode in Sperrichtung*) stark zu; die auf der Diode angegebene Maximal-Stromstärke sollte allerdings nicht überschritten werden.³

³ Der Grund für die Bau- und Verwendungsweise von Z-Dioden liegt darin, dass es verhältnismäßig einfach ist, die Durchbruchspannung einer Diode auf beispielsweise 5,6 V exakt festzulegen; es ist hingegen weitaus schwieriger eine Diode zu bauen, die in Vorwärtsrichtung eine derart hohe Spannung benötigt; selbst LEDs lassen die Spannung in Vorwärtsrichtung nur um etwa 2 bis 3 V absinken, je nach Farbe.

Beispiele für die Verwendung dieser Dioden gibt es im Abschnitt *Spannungsregelung mit Z-Dioden*.

Transistoren

Transistoren sind Halbleiter-Bauteile, die als Schalter, Regler und Verstärker vielerlei Anwendung finden.

Ein Transistor (Kurzwort für „transfer resistor“) kann, je nach Schaltungsart, tatsächlich wie ein elektrisch regelbarer Widerstand eingesetzt werden. Grundsätzlich ähnelt ein Transistor allerdings vielmehr einer *Röhrentriode*, weshalb er auch als „Halbleiter-Triode“ bezeichnet wird. Transistoren werden insbesondere verwendet, um Ströme zu schalten, zu verstärken oder zu steuern.

Im Elektronik-Selbstbau werden häufig so genannte „bipolare“ Transistoren eingesetzt. Diese bestehen aus drei Halbleiterschichten, wobei je nach Reihenfolge der Dotierungen zwischen *npn*- und *pnp*-Transistoren unterschieden wird. Die drei an den Halbleiterschichten angebrachten Anschlüsse eines bipolaren Transistors werden Kollektor C, Basis B und Emitter E genannt.¹

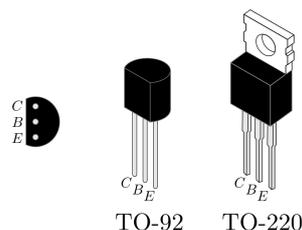


Abb. 46: Bauformen von *npn*-Transistoren. Bei *pnp*-Transistoren sind C und E vertauscht.

Neben den bipolaren Transistoren gibt es auch „unipolare“ Feldeffekttransistoren (FETs), die im Hobby-Bereich meist zum Steuern größerer Stromstärken genutzt werden. In großen Stückzahlen bilden sie darüber hinaus die wichtigsten Bestandteile von integrierten Schaltkreisen, beispielsweise Operationsverstärkern oder Mikroprozessoren.

npn-Transistoren

Ein *npn*-Transistor besteht aus drei aufeinander folgenden Halbleiter-Schichten, wobei die beiden äußeren eine negative und die mittlere Schicht eine positive Dotierung aufweisen. Der Aufbau entspricht einem doppelten *n-p*-Übergang; nach außen sind die drei Schichten mit metallischen Anschluss-Kontakten verbunden.²

¹ Im Englischen wird die Basis in Anlehnung an das Gitter einer Röhrentriode als „gate“ bezeichnet.

² Die schematische Darstellung in der Abbildung *Innerer Aufbau eines npn-Transistors* ist insofern stark vereinfacht dargestellt, als dass ein *npn*-Transistor in der Realität nicht symmetrisch ist: Die Halbleiterschicht zwischen Kollektor und Basis ist wesentlich dünner als diejenige zwischen der Basis und dem Emitter-Ausgang; zudem sind die einzelnen Bereiche in realen Transistoren anders angeordnet und

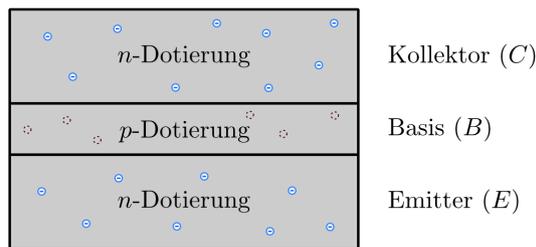


Abb. 47: Innerer Aufbau eines npn -Transistors (stark vereinfacht).

Gewöhnlich verläuft der zu steuernde Hauptstrom zwischen dem Kollektor C und dem Emitter (E). Die Wirkungsweise des Transistors wird dabei durch die Stromstärke bestimmt, die durch die Basis B zum Emitter E fließt:

- Fließt durch die Basis B kein Strom, so ist die Kollektor-Emitter-Strecke CE des Transistors gesperrt. In seiner Wirkung entspricht er dabei einem unendlich großen Widerstand beziehungsweise einem geöffneten Schalter.
- Fließt ein schwacher Strom durch die Basis B, so wird die Kollektor-Emitter-Strecke CE leitfähig; es wird also ein Vielfaches des Basis-Stroms durch die Kollektor-Emitter-Strecke durchgelassen. Je nach Art der Transistor-Schaltung entspricht die Wirkungsweise des Transistors einem elektrisch regelbaren Widerstand oder einer leitenden Verbindung (fast) ohne Widerstand.

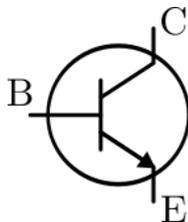


Abb. 48: Schaltzeichen eines npn -Transistors.

Da Transistoren sehr hohe Schaltfrequenzen (rund 100 MHz, teilweise sogar noch mehr) zulassen, können beispielsweise auch niedrig-frequente Spannungsimpulse eines Audio-Eingangs (20 Hz bis 20 kHz) durch Anlegen an die Basis eines Transistors auf dem erheblich größeren Kollektor-Emitter-Strom abgebildet beziehungsweise verstärkt werden:³

unterscheiden sich in ihren Dotierungen. Letztlich kann nur der Basis-Emitter-Übergang als „echte“ Diode angesehen werden, wenn auch mit einer nur geringen Durchbruchspannung.

Dies ist insofern von Bedeutung, als dass man einen npn -Transistor nicht „umgekehrt“, also mit Stromflüssen von der Basis beziehungsweise vom Emitter zum Kollektor hin betreiben sollte. Dies ist zwar prinzipiell möglich, allerdings verhält sich der Transistor so nur wie ein sehr schlechter Transistor mit einem sehr geringen Verstärkungsfaktor und einem sehr starken Rauschen.

Der doppelte $n - p$ -Übergang lässt sich auch nicht mittels zweier Dioden nachbauen. Eine (ebenfalls vereinfachte) Vorstellung ist vielmehr, dass die sehr dünne mittlere Schicht mittels eines Stromflusses durch die Basis mit freien Ladungsträgern „geflutet“ werden kann und der Transistor somit insgesamt leitfähig wird.

³ In Wirklichkeit ist der Verstärkungs-Faktor nicht konstant, sondern beispielsweise von der Frequenz des an der Basis anliegenden Eingang-Signals abhängig. Für einfache Anwendungen ist die Annahme eine konstanten Verstärkungsfaktors jedoch ausreichend.

$$I_{CE} = B \cdot I_{BE} \quad (9)$$

Der Verstärkungsfaktor B eines einzelnen Transistors liegt, je nach Bauart, bei rund 100 bis 500; beispielsweise kann bei einem Transistor mit einem Verstärkungsfaktor von 300 ein Basis-Strom von 1 mA einen Kollektor-Emitter-Strom von maximal 300 mA = 0,3 A steuern.

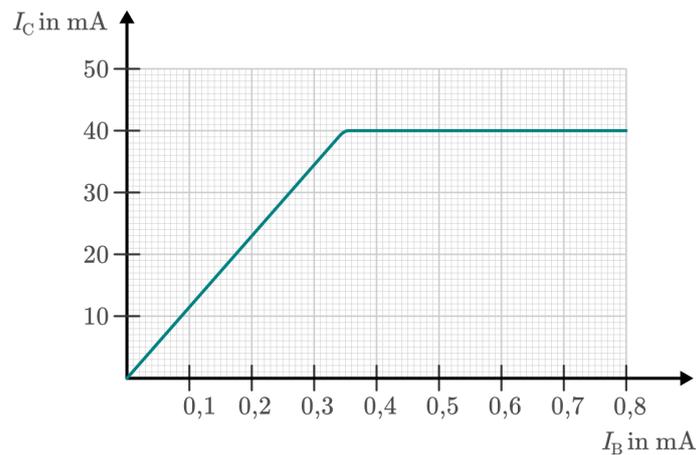


Abb. 49: Beispiel einer $I_C(I_B)$ -Kennlinie eines Transistors (vereinfacht).

Ist der durch die Basis fließende Strom groß genug, so ist der Transistor „in Sättigung“ – zwischen Kollektor und Emitter fließt entsprechend der maximal mögliche (durch die restliche Schaltung vorgegebene) Strom; eine Verstärkung des Basis-Stroms führt zu keiner weiteren Erhöhung des Kollektor-Emitter-Stroms. Der Transistor wirkt bei Anlegen derartiger Basis-Spannungen vielmehr wie ein Schalter.

pnp-Transistoren

Ein *pnp*-Transistor besteht ebenfalls aus drei aufeinander folgenden Halbleiter-Schichten, wobei die beiden äußeren eine positive und die mittlere Schicht eine negative Dotierung aufweisen.

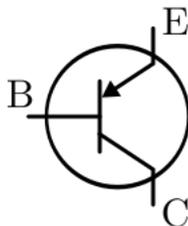


Abb. 50: Schaltzeichen eines *pnp*-Transistors.

Da die Schichten eines *pnp*-Transistors im Vergleich zu einem *npn*-Transistor eine genau umgekehrte Dotierung aufweisen, müssen auch die Ströme in die entgegengesetzte Richtung fließen. Im Schaltzeichen ist dies dadurch gekennzeichnet, dass der Pfeil nicht von der Basis weg, sondern zur Basis hin zeigt.

Hierzu gibt es folgende Merksprüche:

- ***npn*-Transistor:**

„NPN means ‚Not Pointing iN‘“, oder
„Naus, Pfeil ‚Naus!“

- ***pnp*-Transistor:**

„PNP heißt ‚Pfeil Nach Platte‘“, oder
„Tut der Pfeil der Basis weh, handelt sich’s um PNP“

Entsprechend sind auch der Kollektor- und der Emitter-Anschluss eines *pnp*-Transistors im Vergleich zu einem *npn*-Transistor vertauscht. Die Besonderheit von *pnp*-Transistoren gegenüber *npn*-Transistoren liegt darin, dass man zum Freischalten der Kollektor-Emitter-Strecke keinen Stromfluss in die Basis hinein (und aus dem Emitter hinaus) verursachen muss, sondern vielmehr einen Stromfluss (vom Emitter kommend) aus der Basis *heraus* zulassen muss.

Ströme und Spannungen bei bipolaren Transistoren

In der folgenden Abbildung sind die für einen Transistor relevanten Ströme und Spannungen explizit für die üblichere Transistor-Variante, nämlich einen *npn*-Transistor eingezeichnet:⁴

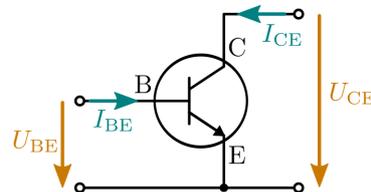


Abb. 51: Ströme und Spannungen bei einem *npn*-Transistor

Für die Spannung U_{BE} zwischen Basis und Kollektor und der Basis-Stromstärke I_{BE} gilt im Wesentlichen die gleiche Beziehung wie zwischen Spannung und Strom an einer *Diode*. Ab einem bestimmten Grenzwert (bei normalen Transistoren rund 0,6 V) steigt die Basis-Stromstärke I_{BE} mit einer zunehmenden Spannung U_{BE} sehr schnell an. Um einen Transistor steuern zu können, muss also die Basis-Stromstärke gezielt begrenzt werden.⁵

⁴ Auf die Begrenzung des Basis-Stroms sollte gut geachtet werden, da zu hohe Basis-Ströme die Lebenszeit eines Transistors erheblich verkürzen. Transistoren werden zudem oftmals nicht schlagartig zerstört, sondern verändern bei Überlastung zunehmend ihre Bauteil-Parameter, so dass sie sich im Lauf der Zeit immer weniger wie ein „normaler“ Transistor verhalten. Derartige Fehler sind in der Praxis oftmals nur schwer zu finden.

⁵ Bisweilen werden die Ströme I_{BE} und I_{CE} auch kurz mit I_B beziehungsweise I_C bezeichnet, da beide Ströme ohnehin stets beim Emitter abfließen.

Stromstärken bei einem *npn*-Transistor

Für den Zusammenhang zwischen den Stromstärken I_{BE} und I_{CE} ist es für viele Anwendungen ausreichend, einen konstanten Verstärkungsfaktor $B = \frac{I_{CE}}{I_{BE}}$ anzunehmen; dieser Wert kann üblicherweise dem Datenblatt des Transistors entnommen werden. Ein Verstärkungsfaktor von $B = 100$ bedeutet beispielsweise, dass ein Basis-Strom von mit einer Stärke von $I_{BE} = 1 \text{ mA}$ einen Kollektor-Emitter-Strom $I_{CE} = 100 \text{ mA}$ zur Folge hat. Was passiert nun allerdings, wenn bei einer ansonsten unveränderten Schaltung plötzlich der Anschluss des Kollektors gekappt wird? Es können dann nicht mehr 100 mA in den Kollektor hinein fließen.

Man kann feststellen, dass sich in diesem Fall auch die Stromstärke durch die Basis verändert: Die Basis-Emitter-Strecke und die Kollektor-Emitter-Strecke bilden gewissermaßen eine gemeinsame Diode, allerdings mit einem festem Stromteiler. Wird die eine Seite des Stromteilers nicht mit Strom versorgt, so muss der gesamte Strom durch die andere Seite fließen. Bei einer ansonsten unveränderten Schaltung fließen somit nicht mehr 1 mA durch die Basis, sondern plötzlich $(100 + 1) \text{ mA}$. Der Verstärkungsfaktor B beschreibt somit vielmehr den auftretenden Emitterstrom, der sich gewöhnlich so aufteilt, dass nur $\frac{1}{100}$ von der Basis bezogen wird, und der restliche Strom vom Kollektor kommt (solange dort Strom zur Verfügung steht).

Spannungen bei einem *npn*-Transistor

Der Wert der Spannung U_{CE} entlang der Kollektor-Emitter-Strecke hängt von der Verwendungsweise des Transistors ab.

- Wird der Transistor als Schalter verwendet, so ist dessen Widerstand bei einem fehlenden Basis-Strom unendlich groß; an der CE-Strecke des Transistors fällt somit die komplette von außen anliegende Spannung ab – solange der Transistor nicht „durchbricht“, was je nach Transistor-Typ ab Spannungen von etwa 50 V der Fall sein kann.

Wird der Transistor durch einen ausreichend hohen Basis-Strom hingegen voll durchgeschaltet, so würde bei einem idealen Transistor entlang der CE-Strecke überhaupt keine Spannung abfallen. In der Praxis stellt man bei realen Transistoren allerdings einen Spannungsabfall von *minimal* $0,2 \text{ V}$ fest.

- Allgemein hängt der Spannungsabfall an der CE-Strecke von der äußeren Schaltung ab. Dies kann man anhand der folgenden (idealisierten) Schaltung erkennen:

Der Spannungsabfall entlang der CE-Strecke wird sowohl durch U_0 als auch durch R_1 beeinflusst. Am Widerstand R_1 fällt nämlich die Spannung $U_1 = R_1 \cdot I_{CE}$ ab. Die an der CE-Strecke des Transistors abfallende Spannung beträgt demnach $U_0 - U_1 = U_0 - R_1 \cdot I_{CE}$. Ist beispielsweise $U_0 = 10 \text{ V}$ und $R_1 = 10 \Omega$, so ergibt sich am Widerstand ein Spannungsabfall von $U_1 = R_1 \cdot I_{CE} = 1 \text{ V}$ und entsprechend ein Spannungsabfall an der CE-Strecke von $U_{CE} = 9 \text{ V}$.

Ein bipolarer Transistor sollte also, wie das obige Beispiel zeigt, weniger als ein variabler Widerstand als vielmehr als eine regelbare Stromquelle aufgefasst werden: Während bei einem Potentiometer der Widerstand R (also das Verhältnis $\frac{U}{I}$ aus der anliegenden

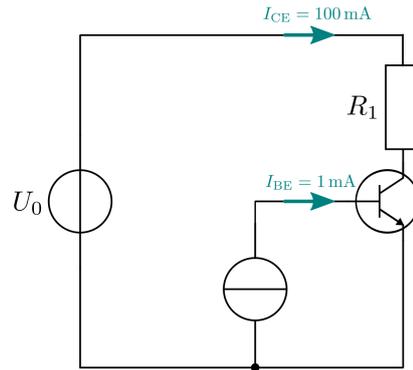


Abb. 52: Spannungsabfall entlang der CE-Strecke bei einem Transistor.

Spannung und der resultierenden Stromstärke) reguliert werden kann, kann bei einem bipolaren Transistor ausschließlich die Stromstärke I_{CE} aktiv geregelt werden; die entsprechende Spannung entlang der CE-Strecke stellt der Transistor automatisch ein.

Bauteil-Schwankungen

Bei einem bipolaren Transistor wird, wie im letzten Abschnitt beschrieben, ein Last-Strom I_{CE} mittels eines Steuer-Stroms I_{BE} gesteuert. Der Verstärkungsfaktor B , der das Verhältnis dieser beiden Ströme angibt, weist allerdings auch bei gleichen Transistor-Typen von Bauteil zu Bauteil teilweise erhebliche Unterschiede auf.

Mittels (meist billigeren) Multimetern lässt sich der Verstärkungsfaktor B eines Transistors einfach bestimmen, da diese über eine entsprechende eingebaute Funktion verfügen. In der Praxis wird diese Funktion nämlich nicht oft verwendet, beispielsweise weil der Verstärkungsfaktor B stark frequenzabhängig ist (Transistoren verstärken bei niedrigen Frequenzen meist besser als bei höheren). Um einen Transistor zu charakterisieren, genügt daher ein einzelner Zahlenwert nicht. Da eine derartige Mess-Schaltung aber recht simpel ist, lässt sich eine Verstärkungs-Mess-Funktion (oft auch als h_{FE} bezeichnet) gut als Zusatz-Feature vermarkten.

Den in Europa häufig als Standard verwendeten BC547-Transistor gibt beispielsweise in drei Verstärker-Klassen: A, B und C. Aus einem [Datenblatt](#) kann man für den BC547-Transistor damit folgende Werte-Bereiche für den Verstärkungsfaktor B entnehmen:

- BC547A: $110 \leq B \leq 220$
- BC547B: $200 \leq B \leq 450$
- BC547C: $420 \leq B \leq 800$

Da der konkrete Wert B des Stromverstärkungsfaktors variieren kann, sollten Transistor-Schaltungen möglichst so konzipiert sein, dass sie bezüglich Abweichungen dieses Parameters unempfindlich sind.

Kennlinien-Felder von Transistoren

Um das Verhalten eines Transistors in einer Schaltung planen zu können, sollte man einen groben Wert für den Stromverstärkungsfaktor B , den maximal erlaubten Kollektorstrom I_{CE} , die maximale Kollektor-Emitterspannung U_{CE} sowie die maximale Verlustleistung P kennen.

Möchte man einen Transistor allerdings nicht als Schalter, sondern als Verstärker betreiben, so genügen einzelne Werte oft nicht zur Charakterisierung eines Transistors. Weitaus nützlicher sind sogenannte „Kennlinienfelder“, in denen der Kollektor-Strom I_{CE} als Funktion der Kollektor-Spannung U_{CE} angegeben wird. Dieser Zusammenhang ist abhängig von der Stromstärke I_{BE} durch die Basis des Transistors, so dass es in einem Kennlinienfeld nicht nur eine, sondern mehrere Kennlinien gibt.

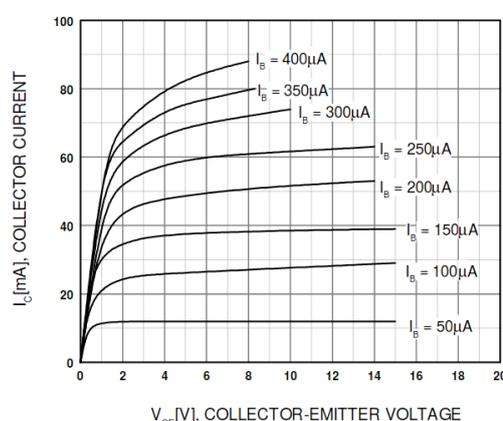


Abb. 53: Kennlinienfeld eines BC547-Transistors (Quelle: [Dataseheetcatalog](#)): Kollektor-Emitter-Strom I_{CE} als Funktion von U_{CE} .

Alle Kennlinien haben (unabhängig vom Basis-Strom I_{BE}) gemeinsam, dass der Strom I_{CE} gleich Null ist, wenn keine Spannung U_{CE} zwischen dem Kollektor und dem Emitter anliegt. Je größer die Spannung U_{CE} wird, desto größer wird auch der Strom I_{CE} durch den Transistor. Der Wert von I_{CE} ist allerdings nach oben hin begrenzt, da schließlich eine Sättigung eintritt – dies ist gleichbedeutend damit, dass der Transistor voll durchschaltet.⁶

Eine zweite wichtige Kennlinie gibt den Kollektor-Emitter-Strom I_{CE} in Abhängigkeit von der Basis-Emitter-Spannung U_{BE} an. Hierfür wird für I_{CE} meist eine logarithmische Skalierung gewählt. Die Gerade, die sich in einem solchen Diagramm ergibt, entspricht einer (logarithmisch skalierten) Dioden-Kennlinie.

Mittels einer solchen Kennlinie kann abgeschätzt werden, welcher CE-Strom bei einer bestimmten an der Basis anliegenden Spannung auftritt. Ebenso kann man mit Hilfe dieses Diagramms ungefähr abschätzen, wie groß der Basis-Strom I_{BE} bei einer bestimmten Basis-Spannung U_{BE} ist, indem man den Kollektor-Strom I_{CE} durch den (ebenfalls geschätzten) Stromverstärkungsfaktor des Transistors dividiert.

⁶ Eine einfache Möglichkeit die Basis-Stromstärke zu begrenzen ist – wie bei *LEDs* – die Verwendung eines Vorwiderstands. Hat man beispielsweise eine Spannung von $U = 10\text{ V}$ anliegen und möchte den Basis-Strom auf maximal maximal $I_{BE} = 10\text{ mA}$ begrenzen, so wäre dafür ein Vorwiderstand mit einem Wert von $R = \frac{U}{I_B} = 1\text{ k}\Omega$ geeignet.⁷

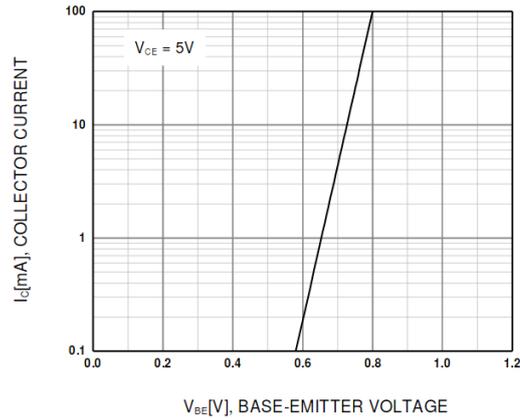


Abb. 54: Kollektor-Emitter-Strom I_{CE} als Funktion der Basis-Spannung U_{BE} bei einem BC547-Transistor (Quelle: Datasheetcatalog)

Wirklich exakte Werte darf man nicht erwarten, wenn man sich an den Kennlinien eines Transistors orientiert; dies wäre auch kaum sinnvoll, da die einzelnen Exemplare eines Transistor-Typs, wie im letzten Abschnitt beschrieben, erhebliche Schwankungen aufweisen können.

Hinweis: Transistoren werden in diesem Tutorial unter anderem in den Abschnitten *Transistor-Grundsaltungen* und *Kipp-Schaltungen* verwendet.

Thyristoren

Ein Thyristor ist im Prinzip, wie das Schaltzeichen bereits andeutet, eine steuerbare *Diode*. Im Grundzustand sperrt ein Thyristor in beide Richtungen; er lässt sich allerdings in Vorwärtsrichtung durch einen kleinen Stromimpuls über den Steueranschluss („Gate“) in den leitenden Zustand versetzen; man spricht auch vom „Zünden“ des Thyristors. In Sperr-Richtung verhält sich ein Thyristor wie eine gewöhnliche Diode.

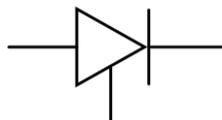


Abb. 55: Schaltzeichen eines Thyristors.

Die drei Anschlüsse eines Thyristors werden als Kathode, Anode und Gate bezeichnet. Die ersten beiden Anschluss-Bezeichnungen stimmen mit denen einer Diode überein, der Gate-Anschluss dient zum Ansteuern des Thyristors.

Anders als ein Transistor gibt es bei einem Thyristor nur zwei Zustände: Leitend oder nicht leitend; Zwischenzustände der Art „ein bisschen leitend“ existieren hingegen nicht. Ein weiterer Unterschied zu einem Transistor besteht darin, dass ein Thyristor auch dann leitend bleibt, wenn der Stromimpuls am Gate wieder vorbei ist – zumindest, solange zwischen den anderen Anschlüssen des Thyristors eine Gleichspannung anliegt.

Eine Folge davon ist allerdings, dass ein Thyristor nicht so einfach wieder abgeschaltet werden kann. Um dies zu erreichen, muss die Stromstärke, die von der Anode zur Kathode des Thyristors fließt, eine so genannte „Haltestromstärke“ unterschreiten:

- Liegt eine Wechselspannung zwischen der Kathode und der Anode des Thyristors an, so geschieht dies automatisch bei jedem Nulldurchgang der Wechselspannung.
- Liegt eine Gleichspannung zwischen der Kathode und der Anode des Thyristors an, so muss „von außen“ dafür gesorgt werden, dass die durch den Thyristor fließende Stromstärke kurzzeitig die Haltestromstärke unterschreitet.

Triacs

Ein Triac ist im Wesentlichen ein Wechselspannungs-Schalter: Er wird zum Ein-/Ausschalten sowie zur Leistungsregelung von Wechselstrom-Verbrauchern genutzt.

Am Schaltzeichen eines Triacs kann man bereits erkennen, dass er einem Thyristor recht ähnlich ist. Es handelt sich bei einem Triac tatsächlich um zwei antiparallel zueinander geschaltete Thyristoren, die in ein gemeinsames Gehäuse verbaut wurden. Es gibt allerdings nur einen Steueranschluß („Gate“).

Die beiden anderen Anschlüsse eines Triacs werden üblicherweise als Anode-1 und Anode-2 bezeichnet. An letztere wird in der Regel der Lastwiderstand angeschlossen; zudem ist die Anode-2 meistens auch unmittelbar mit dem Kühlkörper des Bauteilgehäuses verbunden. Das ist wichtig zu wissen, denn wenn der Kühlkörper in Kontakt mit dem Gerätegehäuse steht, ist eine isolierte Montage dringend erforderlich, um zu verhindern, dass das Gehäuse unter Spannung steht.

Worin besteht der Nutzen eines Triacs? Da es sich bei diesem Bauteil um zwei antiparallel geschaltete Thyristoren handelt, lassen sich beide Halbwellen der Wechselspannung ausnutzen: Der Triac leitet den Strom in beiden Richtungen.

Mit einem Triac kann man auch die Leistung, die ein Verbraucher bekommen soll, steuern. Das geschieht, indem man den Triac nicht im Nulldurchgang der Wechselspannung anschaltet, sondern erst etwas später während einer Halbwelle. Je später dieses geschieht, desto weniger Leistung steht dem Verbraucher zur Verfügung. Dieses Steuern des Triacs nennt man auch Phasenanschnittsteuerung.

Das gleiche Prinzip funktioniert zwar auch mit einem Thyristor, ist aber mit einem Triac besonders interessant, weil man hier den vollen Leistungsumfang (beide Halbwellen) steuern kann. Ein Nachteil bei der Phasenanschnittsteuerung liegt allerdings darin, dass das ständige Ein-/Ausschalten verursacht beträchtliche Funkstörungen erzeugt, weshalb man unbedingt für geeignete Entstör-Maßnahmen sorgen muss.

Diacs

Ein Diac ist vereinfacht ein Triac ohne Gate-Anschluss. Es können also keine Zündimpulse in das Bauelement eingekoppelt werden, und es fließt nur ein geringer Sperrstrom. Ab einer bestimmten Spannung reicht der Sperrstrom aus, das „Relais“ im Ersatzbild anziehen zu lassen, und der Diac schaltet durch. Die Bezeichnung entsteht durch die Kombination der Worte „Diode“ und „alternating current“ (Wechselstrom).

Diac werden vorwiegend in Triggerschaltungen verwendet; daher auch die Bezeichnung „Trigger-Diode“. Triggerschaltungen sind Impulsauslöser, bei denen die Auslösung vom Erreichen einer Mindestspannung abhängt. So werden Diac auch genutzt, um Stromimpulse zum Zünden von Triac zu erzeugen:

Nach jedem Nulldurchgang lädt sich der Kondensator zunächst im Verlauf der Netzspannungs-Halbperiode auf. Sobald die erforderliche Diac-Durchbruchspannung erreicht ist, wird der Diac schlagartig niederohmig und der Kondensator gibt seine Ladung mit einem Stromimpuls an das Gate des Triac ab. Der Triac zündet und bleibt bis zum nächsten Nulldurchgang leitend. In der darauf folgenden entgegengesetzten Netzspannungs-Halbperiode wiederholt sich dieser Vorgang.

Durch Verstellung des Widerstandswertes R lässt sich der Zeitpunkt, wann der Kondensator die Gate-Zündspannung erreicht, variieren. Diese Schaltung ist schon die Basisschaltung eines einfachen Phasenanschnitt-Dimmers.

Spulen

Eine Spule besteht aus einer Vielzahl an Drahtwicklungen, die meist auf einen Spulenkörper aufgebracht sind.



Abb. 56: Schaltzeichen einer Spule.

Eine Verstärkung der magnetischen Eigenschaften ist durch Einbringen eines ferromagnetischen Kernes möglich.

Spulen im Wechselstromkreis

Wird an eine Spule eine Wechselspannung angelegt, so stellt sich eine geringere Stromstärke ein, als es beim Anlegen einer gleich großen Gleichspannung der Fall wäre. Der Grund hierfür sind ständig auftretende Induktionsvorgänge.



Abb. 57: Schaltzeichen einer Spule mit Eisenkern.

Der induktive Scheinwiderstand ist von der Induktivität der Spule und der Frequenz des Wechselstroms abhängig; je größer die Kapazität L und je höher die Frequenz f des Wechselstroms ist, desto größer ist der induktive Scheinwiderstand des Kondensators:

$$R_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot l$$

Hierbei wird mit $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Kreisfrequenz des Wechselstroms bezeichnet.

Transformatoren

Transformatoren sind Bauteile, die eine Wechselspannung (oder pulsierende Gleichspannung) in eine betragsmäßig höhere oder niedrigere Spannung umwandeln können.

Aufbau und Funktionsweise

Ein Transformator ist stets aus zwei Spulen aufgebaut, die sich auf den gegenüber liegenden Seiten eines Eisen- oder Ringkerns befinden. Die Spule, an der die Eingangsspannung anliegt, wird als Primärspule, die andere als Sekundärspule bezeichnet.

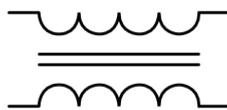


Abb. 58: Schaltzeichen eines Transformators.

Das Verhältnis aus der Anzahl an Windungen n_1 der Primärspule zur Anzahl an Windungen n_2 der Sekundärspule bestimmt das Verhältnis von der Eingangsspannung U_1 zur Ausgangsspannung U_2 :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (10)$$

Die Stromstärken verhalten sich dabei genau umgekehrt wie die Spannungen:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \quad (11)$$

Damit wird von einem (idealen) Transformator genauso viel elektrische Leistung aufgenommen wie abgegeben: $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$. In der Praxis rechnet man zur Zahl der Windungen n_2 der Sekundärseite meist 10% hinzu, um die Energieverluste durch das Aufwärmen des Transformators auszugleichen.

Beispiel:

- Um die Netzspannung von $U_1 = 230 \text{ V}$ auf beispielsweise $U_2 = 12 \text{ V}$ herunter zu regeln, benötigt man folgendes Verhältnis an Windungszahlen:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230 \text{ V}}{12 \text{ V}} \approx 19,2$$

$$\Rightarrow n_1 = 19,2 \cdot n_2$$

Auf der Primärseite müssen also rund 19 mal mehr Windungen aufgebracht werden als auf der Sekundärseite.

Werden die Eingangs- und Ausgangsanschlüsse des Transformators umgetauscht, so kann man (theoretisch) mit dem gleichen Transformator eine Wechselspannung von $U_1 = 12 \text{ V}$ auf $U_2 = 230 \text{ V}$ hochtransformieren.

Exkurs: Schwach- und Starkstrom

Für die bei einem Verbraucher umgesetzte elektrische Leistung gilt $P = U \cdot I$; eine bestimmte elektrische Leistung ist somit sowohl als Produkt eines hohen Spannungswerts mit einer geringen Stromstärke oder umgekehrt als Produkt einer hohen Stromstärke bei geringer Spannung denkbar. Im ersteren Fall müsste dann der elektrische Widerstand des Verbrauchers hoch, im zweiten gering sein, wie folgendes Beispiel zeigt:

Beispiel:

- Ein Verbraucher mit einer elektrischen Leistung von $P = 100 \text{ W}$ soll so gebaut werden, dass er diese Leistung bei einer Spannung von $U_1 = 12 \text{ V}$ beziehungsweise $U_2 = 230 \text{ V}$ liefern soll. Welche Widerstandswerte R_1 beziehungsweise R_2 muss der Verbraucher in diesen beiden Fällen aufweisen?

Im ersten Fall muss zum Erreichen der Leistung P folgende Stromstärke auftreten:

$$P = U_1 \cdot I_1 \quad \Leftrightarrow \quad I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{100 \text{ W}}{12 \text{ V}} \approx 8,33 \text{ A}$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich damit folgender Widerstand:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{12 \text{ V}}{8,33 \text{ A}} = 1,44 \Omega$$

Im zweiten Fall gilt für die Stromstärke I_2 :

$$P = U_2 \cdot I_2 \quad \Leftrightarrow \quad I_2 = \frac{P}{U_2} = \frac{100 \text{ W}}{230 \text{ V}} \approx 0,434 \text{ A}$$

Damit ergibt sich für den Widerstand R_2 :

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{230 \text{ V}}{0,434 \text{ A}} = 529 \Omega$$

Zunächst erscheinen beide Varianten als gleichwertig. Ein deutlicher Unterschied ergibt sich allerdings, wenn man den (geringen) elektrischen Widerstand der Leitungen mit berücksichtigt. Diese stellen zusammen mit dem eigentlichen Verbraucher eine *Reihenschaltung von Widerständen* dar; die Widerstandswerte der Leitung und des Verbrauchers müssen somit addiert werden.

Beispiel:

- Die zwei Verbraucher aus dem obigen Beispiel (Widerstandswerte von $R_1 = 1,44 \Omega$ beziehungsweise $R_2 = 529 \Omega$) sollen mit den Spannungen $U_1 = 12 \text{ V}$ beziehungsweise $U_2 = 230 \text{ V}$ betrieben werden, wobei der Widerstand der Leitungen auf $R_0 = 1 \Omega$ geschätzt werden soll. Welche Leistungen P_1 beziehungsweise P_2 ergeben sich dabei für die beiden Verbraucher?

Im ersten Fall ergibt sich ein Gesamtwiderstand von $R_{1,\text{ges}} = R_0 + R_1 \approx (1,0 + 1,44) \Omega = 2,44 \Omega$. Somit stellt sich folgende Stromstärke ein:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_{1,\text{ges}}} \approx \frac{12 \text{ V}}{2,44 \Omega} \approx 4,92 \text{ A}$$

Insgesamt beträgt die im Stromkreis umgesetzte elektrische Leistung in diesem Fall $P_{1,\text{ges}} = U_1 \cdot I_1 = 12 \text{ V} \cdot 4,92 \text{ A} \approx 59,0 \text{ W}$. Da es sich allerdings um eine Reihenschaltung handelt, teilt sich die Spannung auf die beiden Teilwiderstände (Leitung und Verbraucher) auf:

$$U_{1,\text{Verbraucher}} = R_1 \cdot I_1 \approx 1,44 \Omega \cdot 4,92 \text{ A} = 7,08 \text{ V}$$

$$U_{1,\text{Leitung}} = R_0 \cdot I_1 = 1 \Omega \cdot 4,92 \text{ A} = 4,92 \text{ V}$$

Somit ergibt sich am Verbraucher eine elektrische Leistung von $P_{1,\text{Verbraucher}} = U_{1,\text{Verbraucher}} \cdot I_1 \approx 34,8 \text{ W}$, während eine Leistung von $P_{1,\text{Leitung}} = U_{1,\text{Leitung}} \cdot I_1 \approx 24,2 \text{ W}$ in Form von Wärme an die Leitung abgegeben wird.

Im zweiten Fall ergibt sich ein Gesamtwiderstand von $R_{2,\text{ges}} = R_0 + R_2 = (1 + 529) \Omega = 530 \Omega$. Somit stellt sich folgende Stromstärke ein:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_{2,\text{ges}}} = \frac{230 \text{ V}}{530 \Omega} \approx 0,433 \text{ A}$$

Insgesamt beträgt die im Stromkreis umgesetzte elektrische Leistung in diesem Fall $P_{2,\text{ges}} = U_2 \cdot I_2 = 230 \text{ V} \cdot 0,433 \text{ A} \approx 99,81 \text{ W}$. Da es sich allerdings um eine Reihenschaltung handelt, teilt sich die Spannung auf die beiden Teilwiderstände (Leitung und Verbraucher) auf:

$$U_{2,\text{Verbraucher}} = R_2 \cdot I_2 \approx 529 \Omega \cdot 0,433 \text{ A} \approx 229,57 \text{ V}$$

$$U_{2,\text{Leitung}} = R_0 \cdot I_2 = 1 \Omega \cdot 0,433 \text{ A} = 0,43 \text{ V}$$

Somit ergibt sich am Verbraucher eine elektrische Leistung von $P_{2,\text{Verbraucher}} = U_{2,\text{Verbraucher}} \cdot I_2 \approx 99,62 \text{ W}$, während eine Leistung von $P_{2,\text{Leitung}} \approx 0,18 \text{ W}$ in Form von Wärme an die Leitung abgegeben wird.

Wie das obige Beispiel zeigt, wird Elektrizität unter Berücksichtigung des (geringen) elektrischen Widerstands realer Leitungen wesentlich effektiver bei hohen Spannungen transportiert, da hierbei Wärmeverluste minimiert werden; zudem spielt bei Verwendung hoher Spannungen der tatsächliche Wert der Leitungs-Widerstände, der je nach Länge der Anschluss-Kabel und Qualität der leitenden Verbindungen etwas variieren kann, kaum eine Rolle.

Mittels Transformatoren können die an den Leitungen anliegenden, verhältnismäßig hohen Spannungen können innerhalb der jeweiligen elektronischen Geräte dann wieder auf den gewünschten Wert angepasst werden.

Hinweis: Zu diesem Abschnitt gibt es *Übungsaufgaben*.

Quarzoszillatoren

Ein Oszillator erzeugt elektrische Schwingungen einer definierten Frequenz. Ein für experimentelle Zwecke häufig genutzte Frequenz ist 13,56 MHz, eine für wissenschaftliche Zwecke freigegebene Frequenz im Kurzwellenbereich. Im Modellbau, beispielsweise in RC-Fernbedienungen, werden Signale oftmals mit 27 MHz oder 40 MHz übertragen. Auch Digital-Uhren nutzen Quarze als Taktgeber, typischerweise mit einer Frequenz von 32,768 kHz.

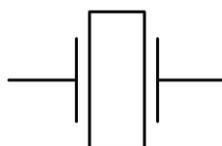


Abb. 59: Schaltzeichen eines Quarzoszillators.

In Modellfliegern werden auch hohe Frequenzen von 2,4 GHz genutzt – ebenso wie für WLAN und Bluetooth.

Integrierte Schaltkreise

Ein integrierter Schaltkreis („Integrated Circuit“ oder kurz „IC“) ist ein Bauteil, das seinerseits eine Schaltung mitsamt allen notwendigen Bauelementen auf sehr kleinem Raum beinhaltet. Es gibt tausende verschiedener IC-Typen für die verschiedensten Einsatzbereiche. Auch Mikroprozessoren, wie sie in Computern verwendet werden, zählen zu den integrierten Schaltkreisen.

Spannungsregler

Spannungsregler liefern, wie ihr Name andeutet, stets eine bestimmte Gleichspannung; der Wert der Spannung kann bei unterschiedlichen Typen einstellbar oder vom Bauteil festgelegt sein.

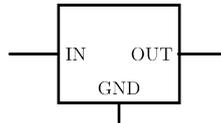


Abb. 60: Schaltzeichen eines Spannungsreglers.

Die Gehäuseform eines Spannungsreglers ähnelt der eines TO-220-Transistors. Am linken Anschluss wird der Spannungsregler mit der +-Seite der Stromquelle (IN) verbunden, am mittleren liegt die Masse (GND) an. Am rechten Anschluss kann die vom Spannungsregler bereitgestellte konstante Ausgangsspannung (OUT) abgegriffen werden.

Der NE555-Timer

Der NE555-Timer ist seit seiner Erstentwicklung im Jahr 1970 einer der beliebtesten integrierten Schaltkreise überhaupt. Er kann als einzelnes Bauteil beispielsweise als astabile oder monostabile Kippstufe verwendet werden.

Der NE555 kann mit einer Spannungsquelle zwischen 4,5 V und 15 V betrieben werden; als Output liefert er ein digitales Signal, das entweder mit 0 V „aus“ oder mit einer Spannung von mindestens 2,5 V „an“ ist.

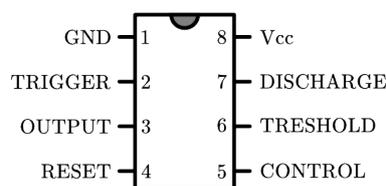


Abb. 61: Schaltzeichen des NE555-Timers.

Der Aufbau eines NE555 sieht als DIP-8-Baustein folgendermaßen aus:

- Pin 1 („Ground“) wird mit der Masse (GND) verbunden
- Pin 8 („Vcc“) wird mit der Eingangsspannung (4,5 bis 15 V) verbunden.
- Pin 3 („Output“) ist der Ausgangs-Pin. Die dort anliegende Spannung ist entweder 0 V, wenn der Pin auf „aus“ steht, oder nahe dem Wert der Eingangsspannung,

wenn der Pin auf „an“ steht. Ob und wie lange der Pin auf „an“ bzw. „aus“ steht, hängt von den Anschlüssen an den anderen fünf Pins ab.

- Pin 2 („Trigger“) kann den Ausgangs-Pin an- oder ausschalten. Liegt am Trigger-Pin eine geringere Spannung als ein Drittel der Eingangsspannung an, so wird der Ausgangs-Pin aktiviert. Beispielsweise kann man so den Trigger-Pin einerseits mit der Eingangsspannung, andererseits über einen Taster mit der Masse (GND) verbinden. Drückt man den Taster, so wird der Pin kurzgeschlossen, und damit der Ausgangs-Pin aktiviert.
- Pin 7 („Discharge“) wird meist über einen Widerstand mit der Eingangsspannung und über einen Kondensator mit der Masse verbunden.
- Pin 6 („Treshold“) wird üblicherweise so angeschlossen, dass damit die Spannung am Kondensator zwischen Pin 7 und Masse gemessen wird. Liegt diese Spannung über zwei Drittel der Eingangsspannung, wird der Ausgangs-Pin deaktiviert.
- Pin 5 („Control“) wird üblicherweise über einen Kondensator mit geringer Kapazität (ca. $0,01 \mu\text{F}$) mit der Masse verbunden. Die Aufgabe dieses Pins liegt darin, mögliche Schwankungen der Eingangsspannung auszugleichen, damit diese die Funktionsweise des Timers nicht beeinträchtigen können.¹
- Pin 4 („Reset“) kann genutzt werden, um den Timer neu zu starten. Ebenso wie der Trigger-Pin wird dieser Pin mit der Eingangsspannung verbunden. Wird der Pin beispielsweise mittels eines mit der Masse (GND) verbundenen Tasters kurzgeschlossen, so unterbricht der Timer seine Arbeit, und beginnt erst von vorne, wenn am Reset-Pin (und am Pin 2) wieder eine Spannung anliegt.

... to be continued ...

¹ In seltenen Fällen wird der Control-Pin auch über einen Widerstand mit der Eingangsspannung verbunden, so dass eine geringe Spannung an diesem Pin anliegt. Diese Spannung ändert die Treshold-Spannung von Pin 6 und kann somit die Frequenz des Timers beeinflussen.

Elektronische Schaltungen

Als Schaltplan wird eine schematische Zeichnung eines elektrischen Geräts oder Versuchsaufbaus bezeichnet. In einem Schaltplan werden die einzelnen elektronischen Bauteile durch symbolische Schaltzeichen dargestellt.

Konventionen für das Erstellen von Schaltplänen

In der Elektronik haben sich neben der Konvention der technischen Stromrichtung („von Plus nach Minus“) weitere Vereinbarungen durchgesetzt, welche die Kommunikation zwischen Elektronikern beziehungsweise die Analyse von Schaltungen erleichtern:

- In Schaltplänen wird die Stromquelle nach Möglichkeit *links* im Schaltplan eingezeichnet.
- Bereiche mit hohen Spannungswerten (genau genommen: **Elektrischen Potentialen**) werden nach Möglichkeit *oben*, Bereiche mit niedrigen Spannungswerten *unten* eingezeichnet.

Damit ergibt sich ein tendentieller Stromverlauf von links oben nach rechts unten; im unteren Teil der Schaltung fließt der Strom schließlich (bei einem niedrigen elektrischen Potential) wieder nach links zum Minus-Pol der Stromquelle ab.

- Elektrische Stromstärken werden (nach Möglichkeit mittels horizontaler Pfeile) an einzelnen Leiterstücken angegeben.
- An Bauteilen anliegende Spannungen werden neben den Bauteilen angegeben; zusätzlich kann ein geradliniger Pfeil eingezeichnet werden, der vom höheren elektrischen zum niedrigeren elektrischen Potential zeigt.

Die Konventionen bezüglich des Einzeichnens von Stromstärke- und Spannungs-Werten erfolgt in Anlehnung an die *Strom- und Spannungsmessung*: Bei einer Spannungsmessung wird das Messgerät „von außen“ mit zwei Anschlüssen eines Bauteils verbunden; bei einer Messung der Stromstärke muss das Messgerät in eine leitende Verbindung eingebaut werden.

Nicht immer können die oben genannten Konventionen eingehalten werden. Ist beispielsweise der Schaltplan sehr groß, so ist es nicht unbedingt für jeden Teilbereich möglich oder sinnvoll, die jeweilige Spannungsversorgung als von links kommend einzuzeichnen.

Auch bei Schaltungen, in denen es hauptsächlich um eine Übertragung von Information geht, kann die Einhaltung der obigen Konventionen schwierig bis unmöglich sein.

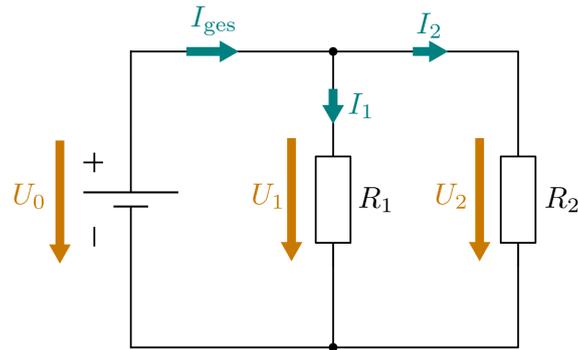


Abb. 62: Schaltplan-Konventionen für das Einzeichnen von Stromstärken und Spannungen.

Beispielsweise ist es bei Audio-Signalen oder gepulsten Signalen oftmals nicht sinnvoll, den einzelnen Bauteilen Spannungswerte zuzuordnen, da sich diese während der Informationsübertragung ständig ändern können. Angaben von Spannungen beziehungsweise Stromstärken sind also nur in Schaltungen beziehungsweise Bereichen sinnvoll, in denen die jeweiligen Werte konstant bleiben.

Netzwerke und Netzwerk-Knoten

Im elektro-technischen Sprachgebrauch werden Schaltungs-Diagramme bisweilen auch als Netzwerke bezeichnet. Beide Begriffe werden in diesem Zusammenhang als Synonyme behandelt, ein elektronisches „Netzwerk“ muss also nicht mit beispielsweise einem Rechner-Netzwerk oder einer Internet-Verbindung zu tun haben.

Innerhalb eines Netzwerks ist es üblich, jeweils alle Linien, die unmittelbar miteinander in Kontakt stehen, als „Knoten“ zu bezeichnen. Der Hintergedanke hierbei ist, dass Leitungen in Schaltplänen als ideale Leiter angesehen werden, also (auch bei beliebiger Länge) keinen elektrischen Widerstand aufweisen. Der elektrische Strom „sieht“ die Leitung also nicht als eigenes Bauteil, er „sieht“ nur die unmittelbar mittels der Leitung verbundenen weiteren Bauteile.

Jedem Netzwerk-Knoten kann eindeutig eine bestimmte Spannung (genau genommen: Ein **elektrisches Potential**) zugewiesen werden; kennt man Werte der einzelnen Knoten, so weiß man ebenso, wie groß die Spannungen sind, die entlang der einzelnen Bauteile abfallen.

Praktisch kann man die einzelnen Knoten eines Schaltungs-Netzwerks dadurch herausfinden, indem man in einem Schaltplan jeweils ein Linien-Stück mit einem Stift entlangfährt, ohne ein anderes Bauteil zu passieren oder den Stift abzusetzen. Die einzelnen Knoten einer Schaltung können im Schaltplan beispielsweise anschaulich mit verschiedenen Farben markiert oder durchnummeriert werden.

Ebenso kann das Knoten-Konzept verwendet werden, um Schaltpläne zu beschreiben. Nummeriert man die in einer Schaltung vorhandenen Knoten mit 1, 2, 3, ... durch, so

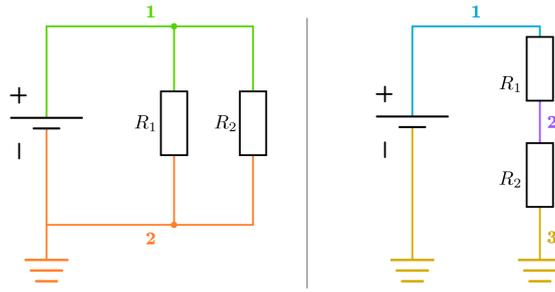


Abb. 63: Zwei Schaltungen mit zwei beziehungsweise drei Netzwerk-Knoten.

genügt es zur Beschreibung der Schaltung, dass man für jedes einzelne Bauteil angibt, welche Knoten durch das Bauteil miteinander verbunden werden.¹

Die Darstellungsweise eines Schaltplans als „Netz-Liste“ mag für einen menschlichen Betrachter weniger anschaulich sein als ein graphisch gezeichneter Schaltplan; sie wird jedoch bevorzugt in Schaltungs-Simulations-Programmen eingesetzt.

Die Knotenregel und die Maschenregel

Insbesondere bei der Schaltungs-Simulation ist es von großer Bedeutung, die in einem Stromkreis auftretenden Spannungen und Stromstärken zu bestimmen. Hierzu werden zwei allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten verwendet, die als Maschen- und Knotenregel oder nach ihrem Entdecker [Gustav Robert Kirchhoff](#) auch als Kirchhoffsche Regeln bekannt sind.

Die Knotenregel

Als *Knoten* wird eine leitende Verbindung zweier oder mehrerer Bauteile bezeichnet; ein Knoten ist also ein Stück eines oder mehrerer unmittelbar miteinander verbundener Leiter.

Aufgrund der Ladungs-Erhaltung muss an jedem Knoten die Menge der zufließenden Ladung gleich der Menge der abfließenden Ladung sein. Somit muss auch die Summe der zufließenden Stromstärken $I_{in,1}$, $I_{in,2}$, ... mit der Summe der abfließenden Stromstärken $I_{out,1}$, $I_{out,2}$, ... übereinstimmen.

$$I_{in,1} + I_{in,2} + I_{in,3} + \dots = I_{out,1} + I_{out,2} + I_{out,3} + \dots$$

Zählt man die Werte der zufließenden Stromstärke(n) I_{in} als positiv und die Werte der abfließenden Stromstärke(n) I_{out} als negativ, so lässt sich die obige Gleichung mit dem Summenzeichen Σ einfacher schreiben als:

¹ Eine Verbindung zweier Knoten mittels eines elektronischen Bauteils wird in diesem Zusammenhang häufig auch als „Netzwerk-Zweig“ bezeichnet.

$$\sum I = 0 \quad (12)$$

Sämtliche Ströme eines Knoten müssen in der Summe stets Null ergeben.

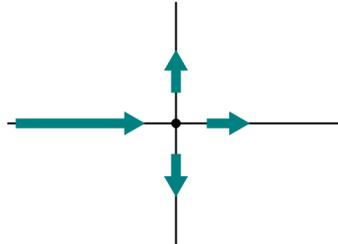


Abb. 64: Die Knotenregel („1. Kirchhoffsche Regel“).

Die Maschenregel

Als Masche wird eine geschlossene Aneinanderreihung von Bauteilen bezeichnet.

Die Spannungswerte der Stromquellen $U_{\uparrow 1}$, $U_{\uparrow 2}$, ... müssen in der Summe gleich der Summe der einzelnen an den Verbrauchern anliegenden Spannungen $U_{\downarrow 1}$, $U_{\downarrow 2}$, ... sein.

$$U_{\uparrow 1} + U_{\uparrow 2} + U_{\uparrow 3} + \dots = U_{\downarrow 1} + U_{\downarrow 2} + U_{\downarrow 3} + \dots$$

Zählt man wiederum die Spannungswerte der Stromquellen U_{\uparrow} als positiv und die Spannungswerte der Verbraucher U_{\downarrow} als negativ, so lässt sich die obige Gleichung mit dem Summenzeichen \sum einfacher schreiben als:

$$\sum U = 0 \quad (13)$$

Sämtliche Spannungen innerhalb einer Masche müssen in der Summe stets Null ergeben.

Die Kirchhoffschen Gesetze ermöglichen es Schaltungs-Simulations-Programmen, Gleichungssysteme zur Bestimmung der unbekanntenen Spannungen beziehungsweise Stromstärken aufzustellen.

Reihen- und Parallelschaltungen

Im folgenden wird behandelt, welche Auswirkungen sich durch eine Reihen- oder Parallelschaltung mehrerer Widerstände, Stromquellen oder Kondensatoren ergeben.

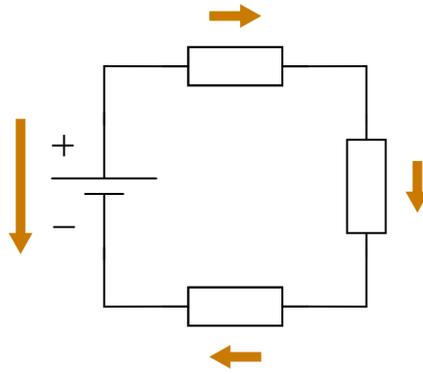


Abb. 65: Die Maschenregel („2. Kirchhoffsche Regel“).

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

In (fast) jedem Stromkreis befinden sich mehrere Verbraucher, also elektrische Widerstände. Wie diese in ihrer Gesamtheit wirken, hängt davon ab, ob sie parallel oder in Reihe geschaltet sind.

Reihenschaltung von Widerständen

Bei einer Reihenschaltung von n Widerständen ist der Gesamtwiderstand R_{ges} gleich der Summe der Einzelwiderstände R_1, R_2, \dots, R_n :

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ges}} &= R_1 + R_2 + \dots + R_n \\
 &= \sum_{i=1}^n R_i
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Werden beispielsweise drei Widerstände der Größe $R = 100 \Omega$ in Reihe geschaltet, so wirken sie zusammen wie ein Widerstand der Größe $R_{\text{ges}} = 100 \Omega + 100 \Omega + 100 \Omega = 300 \Omega$.

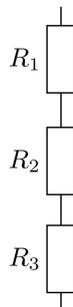


Abb. 66: Reihenschaltung von drei Widerständen.

Die an einer Reihenschaltung anliegende Gesamtspannung U_{ges} teilt sich gemäß der *Maschenregel* in n Teilspannungen U_1, U_2, \dots auf. Dabei ist die Gesamtspannung gleich der Summe der einzelnen Teilspannungen:

$$\begin{aligned}
U_{\text{ges}} &= U_1 + U_2 + \dots + U_n \\
&= \sum_{i=1}^n U_i
\end{aligned}
\tag{15}$$

Die Stromstärke I_{ges} , die mehrere in Reihe geschaltete Widerstände durchfließt, ist an allen Stellen der Reihenschaltung gleich. Somit gilt:

$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \tag{16}$$

Diese Tatsache wird unter anderem zur *Stromstärkemessung* genutzt, indem ein Amperemeter an einer beliebigen Stelle in den zu untersuchenden (Teil-)Stromkreis als Reihenschaltung eingefügt wird.

Ist der Widerstandswert R eines Widerstands einer Reihenschaltung bekannt, kann mit Hilfe der obigen Formeln und des *Ohmschen Gesetzes* auf die am Widerstand anliegende Spannung U beziehungsweise auf die durch den Widerstand fließende Stromstärke I geschlossen werden:

$$U = R \cdot I_{\text{ges}} \quad ; \quad I = I_{\text{ges}} = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}}$$

Parallelschaltung von Widerständen

Bei einer Parallelschaltung von n Widerständen addieren sich die Kehrwerte der Einzelwiderstände R_1, R_2, \dots zum Kehrwert des Gesamtwiderstandes R_{ges} auf:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{R_{\text{ges}}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \\
&= \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}
\end{aligned}
\tag{17}$$

Werden beispielsweise drei Widerstände der Größe $R = 100 \Omega$ parallel zueinander geschaltet, so ergibt sich für den Kehrwert des Gesamtwiderstands $\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{100} \Omega + \frac{1}{100} \Omega + \frac{1}{100} \Omega = \frac{3}{100} \Omega$. Der Gesamtwiderstand beträgt somit $R_{\text{ges}} = \frac{100}{3} \Omega \approx 33,3 \Omega$.

An allen n Widerständen einer Parallelschaltung liegt die gleiche Spannung an. Diese ist gleich der Gesamtspannung U_{ges} :

$$U_{\text{ges}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \tag{18}$$

Diese Tatsache wird unter anderem zur *Spannungsmessung* genutzt, indem ein Voltmeter parallel zum untersuchten (Teil-)Stromkreis beziehungsweise Bauteil geschaltet wird.

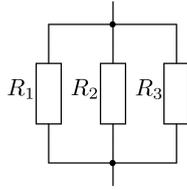


Abb. 67: Parallel von drei Widerständen.

Die Stromstärke I_{ges} teilt sich bei einer Parallelschaltung gemäß der *Knotenregel* auf n Teilstromstärken auf:

$$\begin{aligned} I_{\text{ges}} &= I_1 + I_2 + \dots + I_n \\ &= \sum_{i=1}^n I_i \end{aligned} \quad (19)$$

Ist der Widerstandswert R eines Widerstands einer Parallelschaltung bekannt, kann wiederum mit Hilfe der obigen Formeln und des *Ohmschen Gesetzes* auf die am Widerstand anliegende Spannung U beziehungsweise auf die durch den Widerstand fließende Stromstärke I geschlossen werden:

$$U = U_{\text{ges}} \quad ; \quad I = \frac{U_{\text{ges}}}{R}$$

Reihen- und Parallelschaltung von Stromquellen

Um in einem Stromkreis eine höhere Spannung oder eine größere nutzbare Stromstärke herbeizuführen, können auch mehrere Stromquellen (z.B. Batterien, Akkumulatoren oder Solarzellen) in Reihe oder parallel zueinander geschaltet werden.

Reihenschaltung von Stromquellen

Werden n Stromquellen in Reihe geschaltet, so addieren sich ihre einzelnen Spannungswerte U_1, U_2, U_n zu einer Gesamtspannung U_{ges} :

$$\begin{aligned} U_{\text{ges}} &= U_1 + U_2 + \dots + U_n \\ &= \sum_{i=1}^n U_i \end{aligned}$$

Diese Gleichung ist formal mit Gleichung (15) identisch. Der Unterschied liegt in der entgegengesetzten Wirkungsweise von Stromquellen und Widerständen:

- In einer Reihenschaltung wird durch das Hinzufügen eines zusätzlichen Widerstands R_{\downarrow} die an den übrigen Verbrauchern anliegende Spannung auf $U_{\text{neu}} = U_{\text{ges}} - R_{\downarrow} \cdot I_{\text{ges}}$ reduziert.

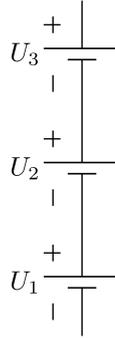


Abb. 68: Reihenschaltung von drei Stromquellen.

- In einer Reihenschaltung wird durch das Hinzufügen einer zusätzlichen Stromquelle U_{\uparrow} die an den übrigen Verbrauchern anliegende Spannung auf $U_{\text{neu}} = U_{\text{ges}} + U_{\uparrow}$ erhöht.

Schaltet man n gleichartige Stromquellen in Reihe, so weist die resultierende Stromquelle eine n -fache Spannung auf.

Parallelschaltung von Stromquellen

Werden n Stromquellen parallel zueinander geschaltet, so reduzieren sich die Teilstromstärken I_1, I_2, \dots , die jede einzelne Stromquelle zur gesamten Stromstärke I_{ges} beisteuert.

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ges}} &= I_1 + I_2 + \dots + I_n \\
 &= \sum_{i=1}^n I_i
 \end{aligned}$$

Diese Gleichung ist formal mit Gleichung (19) identisch. An dieser Stelle hat sie zweierlei gleichsam gültige Wirkungen zur Folge:

- Wird eine Stromquelle, die eine maximale Stromstärke I_{\uparrow} liefern kann, parallel zu einer bestehenden Stromquelle geschaltet, so erhöht sich die insgesamt mögliche Stromstärke auf $I_{\text{max,neu}} = I_{\text{max,alt}} + I_{\uparrow}$.¹
- Wird eine weitere Stromquelle I_{\uparrow} parallel zu einem bestehenden Stromkreis geschaltet, so wird die bisherige Stromquelle auf $I_{\text{neu}} = I_{\text{ges}} - I_{\uparrow}$ „entlastet“. Bei Stromquellen mit einem begrenzten Energiespeicher, beispielsweise Batterien und Akkumulatoren, wird dadurch die Entladezeit („Lebensdauer“) entsprechend erhöht.²

¹ Dies ist in der Praxis von Nutzen, wenn weitere (Verbraucher-)Widerstände parallel zu einem bestehenden Stromkreis geschaltet werden: Die Spannung U bleibt dabei unverändert, der Gesamt-Widerstand nimmt ab und die nötige Stromstärke steigt. Um eine Batterie beziehungsweise einen Akkumulator nicht zu überlasten, wird auch die bestehende Stromquelle um eine oder mehrere (meist gleichartig gebaute) parallel geschaltene Stromquellen erweitert.

² Die gespeicherte Energiemenge einer Batterie oder eines Akkumulators ist gleich $E = U \cdot I \cdot t$, wobei t die Entladungszeit angibt. Bei einer Parallelschaltung bleibt die Spannung U unverändert. Die gleiche Energiemenge E entlädt sich somit aufgrund der niedrigeren Stromstärke I über einen entsprechend längeren Zeitraum t .

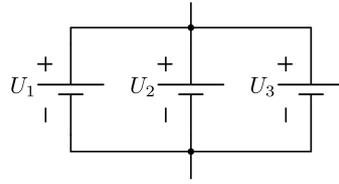


Abb. 69: Parallelschaltung von drei Stromquellen.

Bei einer Parallelschaltung von n gleichartigen Stromquellen wird die maximal mögliche Stromstärke um das n -fache erhöht beziehungsweise die einzelnen von den Stromquellen bereitgestellten (Teil-)Stromstärken um das $\frac{1}{n}$ -fache reduziert.

Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren

Kondensatoren gehören ebenfalls zu den häufig verwendeten elektronischen Bauteilen. Durch eine Reihen- oder Parallelschaltung mehrerer Kondensatoren lässt sich ihre charakteristische Größe, die Kapazität C , beeinflussen.

Reihenschaltung von Kondensatoren

Werden n Kondensatoren in Reihe geschaltet, so werden bei Anlegen der Spannung U alle mit der gleichen Stromstärke I auf eine Ladungsmenge Q aufgeladen.

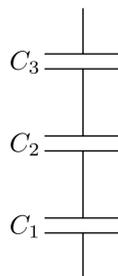


Abb. 70: Reihenschaltung von drei Kondensatoren.

Wie bei Reihenschaltungen üblich, addieren sich dabei die an den einzelnen Kondensatoren abfallenden Teilspannungen U_i , die sich mit Hilfe der allgemeinen Kondensator-Formel ($Q = C \cdot U$) als $U_i = Q/C_i$ ausdrücken lassen:

$$U_{\text{ges}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots = \sum_{i=1}^n \frac{Q}{C_i}$$

Um herauszufinden, wie mehrere Kondensatoren in ihrer Gesamtheit wirken, d.h. welche Gesamt-Kapazität C_{ges} sich aus der Reihenschaltung der n einzelnen Kondensatoren C_i ergibt, muss man beide Seiten der obigen Gleichung durch die konstante Ladung Q teilen. Die linke Seite der Gleichung entspricht dann der Gesamtkapazität $C_{\text{ges}} = U_{\text{ges}}/Q$, die rechte Seite der Summe aller Kehrwerte der einzelnen Kondensatoren:

$$\frac{1}{C_{\text{Ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (20)$$

Wird zu einem bestehenden Kondensator ein weiterer in Reihe geschaltet, so nimmt die Gesamtkapazität ab. Kondensatoren verhalten sich in einer Reihenschaltung somit ähnlich wie Widerstände in einer Parallelschaltung.

Parallelschaltung von Kondensatoren

Werden n Kondensatoren parallel zueinander geschaltet, so liegt an allen die gleiche Spannung U an. Der Gesamtstrom I_{ges} teilt sich in n Teilströme auf, wodurch die einzelnen Kondensatoren mit unterschiedlichen Ladungen Q_i geladen werden.

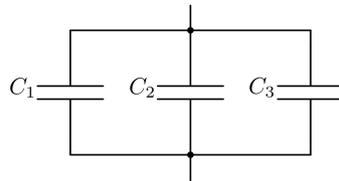


Abb. 71: Parallelschaltung von drei Kondensatoren.

Mit Hilfe der allgemeinen Kondensator-Formel ($Q = C \cdot U$) lässt sich die Gesamtkapazität C_{ges} direkt ausdrücken:

$$C_{\text{ges}} = \frac{Q_{\text{ges}}}{U} = \frac{Q_1}{U} + \dots + \frac{Q_n}{U} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{U}$$

Die einzelnen Quotienten Q_i/U entsprechen dabei den einzelnen Kapazitäten C_i der parallel zueinander geschalteten Kondensatoren. Somit gilt:

$$C_{\text{Ges}} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (21)$$

Eine Parallelschaltung zweier oder mehrerer Kondensatoren gleicht somit einem einzigen Kondensator mit einer entsprechend größeren Kapazität. Kondensatoren verhalten sich in einer Parallelschaltung somit ähnlich wie Widerstände in einer Reihenschaltung.

Stern-Dreieck-Umwandlung

Um in einem Stromkreis mit mehreren Widerständen die einzelnen auftretenden Stromstärken und Spannungen zu bestimmen, können diese schrittweise durch Ersatz-Widerstände für *Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen* ersetzt werden. Bisweilen können allerdings auch Schaltungen auftreten, bei denen eine solche Ersetzung

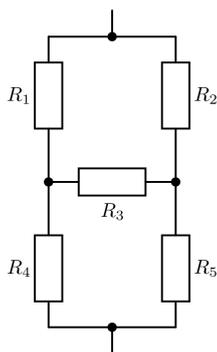


Abb. 72: Beispielschaltung für eine Dreieck-Stern-Umwandlung.

nicht unmittelbar möglich ist. Eine solche Schaltung ist in der folgenden Abbildung beispielhaft gezeigt:

Bei der obigen Beispiel-Schaltung kann man beispielsweise nicht unmittelbar sagen, ob der Widerstand R_3 nun in Reihe oder parallel zu den übrigen Widerständen geschaltet ist. In so einem Fall ist es jedoch möglich, eine „dreieckige“ Schaltung in eine „sternförmige“ umzuwandeln:

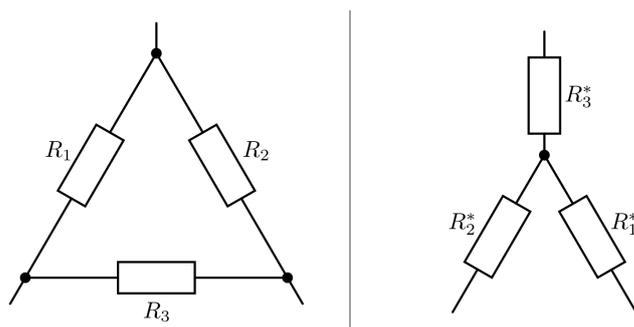


Abb. 73: Symbolhafte Darstellung einer Dreieck- und einer zugehörigen Stern-Schaltung.

Bei einer derartigen „Dreieck-Stern-Umwandlung“ werden sowohl die Anordnungen wie auch die Bezeichnungen der Widerstände geändert. Die Zuordnung geschieht dabei wie bei einem geometrischen Rechteck, bei dem beispielsweise die Dreieck-Seite c dem Punkt C gegenüberliegt.

- Die Werte der durch eine Dreieck-Stern-Umwandlung resultierenden Widerstände können folgendermaßen berechnet werden:

$$R_1^* = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_2^* = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_3^* = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Die resultierenden Widerstandswerte sind somit jeweils gleich dem Produkt der beiden anliegenden Widerstände, geteilt durch die Summe aller drei Widerstände.

- Die Umwandlung kann bei Bedarf auch in der umgekehrten Richtung vorgenommen werden. Für die Werte der durch eine Stern-Dreieck-Umwandlung resultierenden Widerstände gilt entsprechend:

$$R_1 = R_2^* + R_3^* + \frac{R_2^* \cdot R_3^*}{R_1^*}$$

$$R_2 = R_1^* + R_3^* + \frac{R_1^* \cdot R_3^*}{R_2^*}$$

$$R_3 = R_1^* + R_2^* + \frac{R_1^* \cdot R_2^*}{R_3^*}$$

Beispiel:

- In der am Anfang dieses Abschnitts abgebildeten *Stern-Dreieck-Beispielschaltung* soll für $R_1 = R_2 = 10\ \Omega$, $R_3 = 20\ \Omega$ und $R_4 = R_5 = 50\ \Omega$ gelten. Wie groß ist in diesem Fall der Gesamtwiderstand R_{Ges} dieser Schaltung?

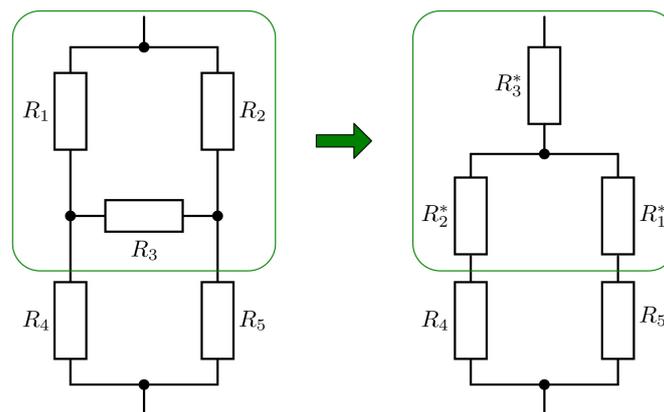


Abb. 74: Beispielschaltung für Dreieck-Stern-Umwandlungen (Lösung).

Nimmt man für Anordnung der Widerstände R_1 , R_2 und R_3 eine Dreieck-Stern-Umwandlung vor, so erhält man eine Schaltung, die sich auf eine Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen zurückführen lässt. Für die „neuen“ Widerstandswerte R_1^* , R_2^* und R_3^* gilt dabei:

$$R_1^* = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 10 + 20} \Omega = 5,0 \Omega$$

$$R_2^* = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 10 + 20} \Omega = 5,0 \Omega$$

$$R_3^* = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10 + 20} \Omega = 2,5 \Omega$$

Nach der Umwandlung sind die Widerstände R_1^* und R_5 sowie die Widerstände R_2^* und R_4 in Reihe geschaltet. Da in diesem Fall R_1^* und R_2^* beide den Wert $5,0\ \Omega$ sowie

R_4 und R_5 beide den Wert $50\ \Omega$ haben, ergibt sich für die beiden Ersatzwiderstände R_{15} und R_{24} :

$$R_{15} = R_1^* + R_5 = 5,0\ \Omega + 50\ \Omega = 55\ \Omega$$

$$R_{25} = R_2^* + R_5 = 5,0\ \Omega + 50\ \Omega = 55\ \Omega$$

Die Ersatz-Widerstände R_{15} und R_{24} sind parallel zueinander geschaltet; für den zugehörigen Ersatz-Widerstand R_{1245} ergibt sich damit:

$$R_{1245} = \frac{1}{\frac{1}{R_{24}} + \frac{1}{R_{35}}} = \frac{1}{\frac{1}{55} + \frac{1}{55}}\ \Omega = 27,5\ \Omega$$

Dieser Ersatzwiderstand ist schließlich in Reihe mit R_3^* geschaltet; somit ergibt sich als Gesamt-Widerstand $R_{\text{Ges}} = R_3^* + R_{1245} = (2,5 + 27,5)\ \Omega = 30\ \Omega$.

Stern-Dreieck-Umwandlung bei Kondensatoren

Kondensatoren verhalten sich bei Reihen- beziehungsweise Parallelschaltungen genau umgekehrt wie Widerstände: Bei Parallelschaltungen addieren sich ihre Kapazitätswerte, bei Reihenschaltungen hingegen die Kehrwerte ihrer Kapazitäten.

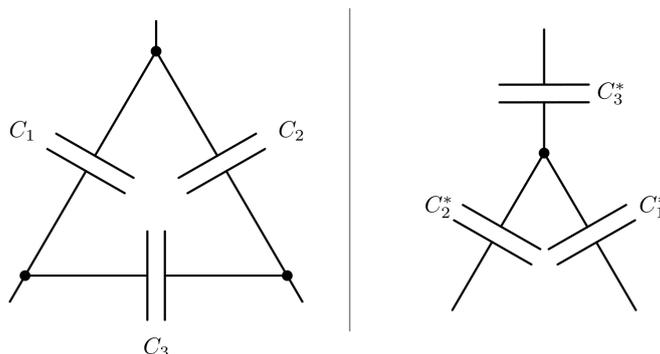


Abb. 75: Symbolhafte Darstellung einer Dreieck- und einer zugehörigen Stern-Schaltung mit Kondensatoren.

Man kann dennoch das Prinzip der Stern-Dreieck-Umwandlung auch auf Kondensatoren übertragen, wenn man mit den Kehrwerten ihrer Kapazitäten beziehungsweise mit den entsprechenden *Blindwiderständen* rechnet R_C der einzelnen Kondensatoren rechnet.³ Man erhält dabei folgende Umrechnungen:

³ Für den Blindwiderstand R_C eines Kondensators mit einer Kapazität C gilt (bei Wechselströmen):

$$R_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Die Frequenz ω des Wechselstroms ist bei einer Stern-Dreieck-Umwandlung eine Konstante und kann bei der Umwandlung „ausgeklammert“ werden.

- Bei einer Dreieck-Stern-Umwandlung von Kondensatoren können die resultierenden Werte der Kapazitäten folgendermaßen berechnet werden:

$$C_1^* = \frac{C_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot C_3 + C_2 \cdot C_3}{C_1}$$

$$C_2^* = \frac{C_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot C_3 + C_2 \cdot C_3}{C_2}$$

$$C_3^* = \frac{C_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot C_3 + C_2 \cdot C_3}{C_3}$$

- Für die Werte der durch eine Stern-Dreieck-Umwandlung resultierenden Kapazitäten gilt entsprechend:

$$C_1 = \frac{C_2^* \cdot C_3^*}{C_1^* + C_2^* + C_3^*}$$

$$C_2 = \frac{C_1^* \cdot C_3^*}{C_1^* + C_2^* + C_3^*}$$

$$C_3 = \frac{C_1^* \cdot C_2^*}{C_1^* + C_2^* + C_3^*}$$

Auch bei Kondensatoren werden Stern-Dreieck- beziehungsweise Dreieck-Stern-Umwandlungen so lange durchgeführt, bis sich aus den resultierenden Ersatz-Kapazitätswerten eine Schaltung ergibt, die nur noch aus Reihen- und/oder Parallelschaltungen von Kondensatoren besteht.

Hinweis: Zu diesem Abschnitt gibt es *Übungsaufgaben*.

Mess- und Prüfschaltungen

Spannungsmessung

Zur Spannungsmessung werden Spannungs-Messgeräte („Voltmeter“) verwendet; diese gibt es sowohl in analoger wie auch in digitaler Bauweise. Auch gewöhnliche Multimeter können als Spannungs-Messgeräte verwendet werden, indem der Drehschalter je nach Bedarf auf Gleichspannungs- beziehungsweise Wechselspannung gestellt wird.

Kontaktiert man in einem eingeschalteten Stromkreis mit den beiden Prüfspitzen zwei Anschlüsse eines Bauteils, so bildet der Innenwiderstand des Voltmeters und das Bauteil eine *Parallelschaltung zweier Widerstände*. Die beiden am Voltmeter und am Bauteil anliegenden Spannungen sind in diesem Fall gleich.

Der durch die Messung entstehende Messfehler ist umso kleiner, je höher der Innenwiderstand des Voltmeters ist; Voltmeter besitzen daher stets einen sehr hohen elektrischen Widerstand.

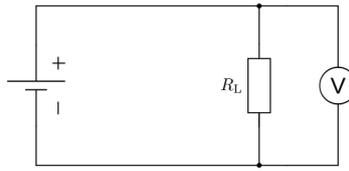


Abb. 76: Schaltung zur Messung von Spannungen mittels eines Voltmeters.

Messbereichserweiterung

Bei analogen Voltmetern ist der Messbereich prinzipiell durch das Ende der Skala begrenzt; liegt eine größere Spannung am Messgerät an, so kann einerseits der Zeiger des Messgeräts nicht weiter ausschlagen, andererseits sogar das Messgerät beschädigt werden. Um den Messbereich nach oben zu erweitern, muss man durch eine geeignete Schaltung erreichen, dass nur ein Teil der zu messenden Spannung am Voltmeter anliegt.

Dies kann erreicht werden, indem man das Voltmeter mit einem in Reihe geschalteten Vorwiderstand kombiniert. Hat ein Voltmeter mit einem Messbereich von 50 mV beispielsweise einen Innenwiderstand von $100\ \Omega$, so bewirkt ein Vorwiderstand mit einer Größe von $900\ \Omega$, dass nur noch $1/10$ der Spannung am Voltmeter abfällt. Der Messbereich wird somit um den Faktor 10 erhöht, so dass mit dem Voltmeter nun Spannungen bis zu 500 mV gemessen werden können.

Der Messbereich-Erweiterung sind nach oben hin kaum Grenzen gesetzt. Hat der Vorwiderstand im obigen Beispiel den Wert $99\ 900\ \Omega$, so beträgt der Gesamtwiderstand $100\ 000\ \Omega$, und nur $1/1000$ der anliegenden Spannung fällt am Voltmeter ab. Entsprechend kann eine 1000-fach höhere Spannung, also maximal 50 V gemessen werden.

Bei Digital-Messgeräten erfolgt die Messung elektronisch und wird auf einem Display digital angezeigt. Das Problem der Messfehler sowie das Prinzip der Messbereich-Erweiterung ist allerdings bei analogen sowie digitalen Messgeräten identisch.

Strommessung

Zur Strommessung werden Strom-Messgeräte („Amperemeter“) verwendet; auch diese gibt es sowohl in analoger wie auch in digitaler Bauweise. Gewöhnliche Multimeter können ebenfalls als Strom-Messgeräte verwendet werden, indem man den Drehschalter auf Strommessung einstellt.

Zur Strommessung muss das Amperemeter in Reihe mit dem zu messenden Bauteil geschaltet werden.¹ Der Innenwiderstand des Amperemeters und das Bauteil bilden in diesem Fall eine *Reihenschaltung zweier Widerstände*. Durch das Amperemeter und das Bauteil muss somit der gleiche Strom hindurch fließen.

¹ Die Reihenschaltung eines Amperemeters mit einem bereits in einem Stromkreis verbauten Bauteil ist nicht immer einfach; beispielsweise kann bei fertig gelöteten Platinen kein weiteres Bauteil eingefügt werden. Es ist jedoch möglich, zunächst die am Bauteil anliegende Spannung zu messen, den Stromkreis zu unterbrechen, und mittels eines externen regelbaren Netzgerätes einen Stromkreis aus Netzgerät, Bauteil und Amperemeter herzustellen.



Abb. 77: Schaltung zur Messung von Stromstärken mittels eines Amperemeters.

Der durch die Messung entstehende Messfehler ist umso kleiner, je kleiner der Innenwiderstand des Amperemeters ist; Amperemeter besitzen daher stets einen sehr geringen elektrischen Widerstand.

Messbereichserweiterung

Bei analogen Amperemetern ist der Messbereich ebenfalls durch das Ende der Skala begrenzt; fließt ein größerer Strom durch das Messgerät, so kann wiederum der Zeiger des Messgeräts nicht weiter ausschlagen beziehungsweise sogar das Messgerät beschädigt werden. Um den Messbereich nach oben zu erweitern, muss auch in diesem Fall erreicht werden, dass nur ein Teil des zu messenden Stroms durch das Amperemeter fließt.

Dies ist möglich, wenn das Amperemeter mit einem parallel geschalteten Widerstand kombiniert wird. Hat ein Amperemeter mit einem Messbereich von 50 mA beispielsweise einen Innenwiderstand von $10\ \Omega$, so bewirkt ein parallel geschalteter Widerstand mit ebenfalls $10\ \Omega$, dass nur noch die Hälfte des Stroms durch das Amperemeter fließt. Der Messbereich wird somit um den Faktor 2 erweitert, so dass mit dem Amperemeter nun Stromstärken bis zu 100 mA gemessen werden können.

Der Messbereich-Erweiterung von Amperemetern sind nach oben hin ebenfalls kaum Grenzen gesetzt. Üblicherweise sind die Parallel-Widerstände bereits im Amperemeter eingebaut und können durch einen Drehschalter zugeschaltet werden.

Widerstandsmessung

Die Größe eines Widerstands gemäß des **Ohmschen Gesetzes** $R = \frac{U}{I}$ bestimmt werden, wenn bekannt ist, welche Spannung U am Widerstand anliegt und welche Stromstärke I dabei durch den Widerstand fließt.

Die Bestimmung des Widerstands eines Bauteils nach dieser Methode setzt also eine Strom- sowie eine Spannungsmessung voraus. Dabei gibt es, wie in der obigen Abbildung angedeutet, prinzipiell zwei Möglichkeiten: Bei Variante 1 zeigt das Voltmeter einen zu hohen Wert an („Spannungsfehler-Schaltung“), denn ein Teil der am Voltmeter anliegenden Spannung fällt am Innenwiderstand des Amperemeters ab. Bei der Variante 2 zeigt das Amperemeter einen zu hohen Wert an („Stromfehler-Schaltung“), denn ein Teil des durch das Amperemeter fließenden Stroms fließt anschließend durch das Voltmeter.

Der Widerstand eines Bauteils kann auch mit nur einem einzelnen Messgerät bestimmt werden, sofern die anliegende Spannung bekannt ist. Eine derartige Messung setzt vor-

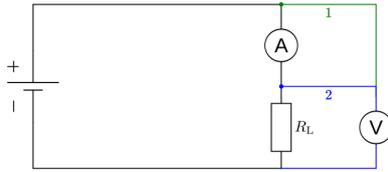


Abb. 78: Schaltung zur Messung von Widerständen mittels eines Volt- und eines Amperemeters.

aus, dass das zu messende Bauteil ausgebaut ist oder zumindest der Stromkreis, welcher das Bauteil umgibt, nicht geschlossen ist. Das Messgerät, meist ein Multimeter, kann dann selbst als Spannungsquelle mit bekanntem Spannungswert dienen, sofern darin eine Batterie verbaut ist. Die Widerstandsmessung entspricht damit einer Messung der Stromstärke, jedoch mit einer entsprechend angepassten Skala.

Die Wheatstonesche Messbrücke

Eine weitere Möglichkeit der Widerstandsmessung besteht in der Verwendung einer nach [Charles Wheatstone](#) benannten „Wheatstoneschen Messbrücke“. Eine solche ist folgendermaßen aufgebaut:

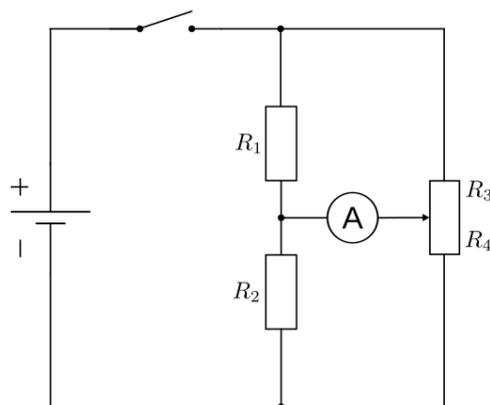


Abb. 79: Schaltung einer Wheatstoneschen Brücke zur Widerstandsmessung mittels eines Amperemeters.

- Der zu messende Widerstand R_1 ist mit einem bekannten Widerstand R_2 in Reihe geschaltet.
- Parallel dazu wird ein regelbarer Widerstand (Potentiometer) mit verschiebbarem Stromabnehmer angebracht; Durch diesen wird der Gesamtwiderstand des Potentiometers in zwei (zueinander in Reihe liegenden) Teilwiderstände R_3 und R_4 aufgeteilt, wobei über die Position des Stromabnehmers das Verhältnis dieser beiden Widerstände eingestellt werden kann.

- Zwischen dem Stromabnehmer und den zwei Widerständen R_1 und R_2 wird ein empfindliches Amperemeter eingebaut.

Zur Messung des Widerstands nach dieser Methode wird der Stromabnehmer so lange hin- und hergeschoben, bis das Amperemeter keine Stromfluss mehr anzeigt. In dieser Position wird die an der Wheatstoneschen Messbrücke anliegende Spannung innerhalb der beiden Stromzweigen (R_1 und R_2 beziehungsweise R_3 und R_4) im gleichen Verhältnis geteilt. In diesem Fall gilt also:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Da R_2 bekannt ist und das Verhältnis von R_3 zu R_4 mit Hilfe einer am Potentiometer anliegenden Skala abgelesen werden kann, lässt sich der gesuchte Widerstand R_1 unmittelbar mit Hilfe des obigen Widerstandsverhältnisses bestimmen:

$$R_1 = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2$$

Da das Potentiometer letztlich aus einem zu einer langen Spule aufgewickelten Widerstandsdraht besteht und der Widerstand eines homogenen Leiters direkt proportional zu dessen Länge ist, ist das Zahlenverhältnis der Widerstände $R_3 : R_4$ identisch mit dem Verhältnis $l_3 : l_4$ der beiden Spulenlängen links und rechts vom Stromabnehmer. Als Skala am Potentiometer genügt folglich eine einfache Millimeter-Skala.

Grundschaltungen

Die folgenden Schaltungen dienen dem Kennenlernen der einzelnen Bauteile und ihrer Grundfunktionen. Die Schaltungen im folgenden Abschnitt sind stets auf eine 9 V- Gleichspannung ausgelegt. Eine solche Spannung kann beispielsweise mittels eines regelbaren Labornetzteils, einer Blockbatterie, oder näherungsweise auch durch einen wiederaufladbaren und daher umweltfreundlicheren Block-Akku bereitgestellt werden.

Spannungsteiler

Als Spannungsteiler bezeichnet man Schaltungen aus zwei oder mehr Widerständen, mit dem Ziel, eine anliegende Spannung gezielt in bestimmte Verhältnisse aufzuteilen.

Unbelastete Spannungsteiler

Eine sehr einfache, aber dennoch wichtige Grundschaltung besteht aus einer *Reihenschaltung zweier Widerstände*:

Eine solche Anordnung wird als „unbelasteter Spannungsteiler“ bezeichnet. Da es sich um eine Reihenschaltung handelt, ist die Stromstärke I innerhalb der Schaltung an allen

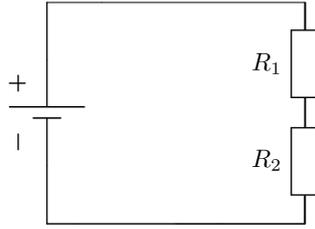


Abb. 80: Aufbau eines unbelasteten Spannungsteilers.

Stellen gleich, während die Teilspannungen U_1 und U_2 an den Widerständen R_1 und R_2 in Summe gleich der anliegenden Gesamtspannung U_{ges} sind:

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

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

Aus den beiden obigen Formeln sowie dem **Ohmschen Gesetz** $U = R \cdot I$ kann beispielsweise eine Formel zur Berechnung von U_1 in Abhängigkeit von der Gesamtspannung U_{ges} und den beiden Widerständen R_1 und R_2 angegeben werden. Setzt man in die zweite Gleichung $I = \frac{U}{R}$ ein, so erhält man:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}}$$

Diese Gleichung kann unmittelbar nach U_1 aufgelöst werden. Setzt man für zudem $R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$ ein (Reihenschaltung!), so erhält man schließlich:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_{\text{ges}}} \cdot U_{\text{ges}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{Ges}} \quad (22)$$

Am ersten Widerstand fällt somit der Anteil $\frac{R_1}{R_{\text{ges}}}$ der Gesamtspannung ab. In gleicher Weise kann gezeigt werden, dass am zweiten Widerstand die Spannung $\frac{R_2}{R_{\text{ges}}}$ abfällt:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_{\text{ges}}} \cdot U_{\text{ges}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{Ges}} \quad (23)$$

Die zwei Spannungen U_1 und U_2 an den beiden Widerständen stehen also zueinander im gleichen Werte-Verhältnis wie die Widerstände selbst.

Beispiel:

- Ein Stromkreis, der als Spannungsquelle eine 9 V-Batterie hat, besteht aus den zwei Widerständen $R_1 = 10 \Omega$ und $R_2 = 90 \Omega$. Wie groß sind die Spannungen U_1 und U_2 , die an R_1 beziehungsweise R_2 anliegen?

Der Gesamtwiderstand der Schaltung beträgt $R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 = 100 \Omega$. Am den Widerständen liegen damit folgende Spannungen an:

$$U_1 = \frac{R_1}{R_{\text{ges}}} \cdot U_{\text{ges}} = \frac{10 \Omega}{100 \Omega} \cdot 9 \text{ V} = 0,9 \text{ V}$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_{\text{ges}}} \cdot U_{\text{ges}} = \frac{90 \Omega}{100 \Omega} \cdot 9 \text{ V} = 8,1 \text{ V}$$

Das gleiche Spannungsverhältnis stellt sich ein, wenn man als Widerstandswerte beispielsweise $R_1 = 100 \Omega$ und $R_2 = 900 \Omega$ wählt; in diesem Fall ist lediglich die Stromstärke in der Schaltung um ein 10-faches geringer. Die Spannungen hängen hingegen nicht von den konkreten Werten der Widerständen, sondern nur von ihrem Größenverhältnis ab.

Belastete Spannungsteiler

Bei einer *Parallelschaltung zweier Widerstände* ist die an beiden Widerständen anliegende Spannung gleich; zudem hat sich im letzten Abschnitt gezeigt, dass man mittels eines Spannungsteilers die anliegende Gesamtspannung in beliebig große Teilspannungen aufteilen kann. Könnte man also nicht durch ein Parallelschalten eines Spannungsteilers zu einem Verbraucher-Widerstand R_V auch dort eine gewünschte (geringere) Teilspannung erhalten?

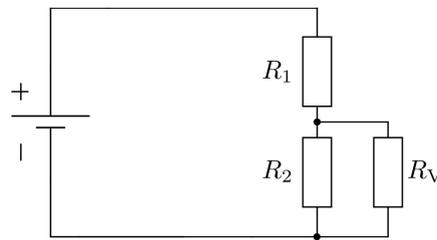


Abb. 81: Aufbau eines belasteten Spannungsteilers.

Die Antwort ist ein klares „Jain“, da sich beispielsweise durch das Parallelschalten von R_V zum Widerstand R_2 des Spannungsteilers ein neuer Widerstandswert R_2^* ergibt. Für die Parallelschaltung dieser zwei Widerstände gilt nämlich:¹

$$\frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V} \iff R_2^* = \frac{R_2 \cdot R_V}{R_2 + R_V} \quad (24)$$

- Ist R_V gegenüber R_2 vergleichsweise groß, so ist der Wert von $\frac{1}{R_V}$ vergleichsweise gering, und es ergibt sich $R_2^* \approx R_2$. Die am Verbraucher anliegende Spannung entspricht in diesem Fall also in guter Näherung der am Widerstand R_2 des unbelasteten Spannungsteilers anliegenden Spannung U_2 .

¹ Diese Formel erhält man für eine Parallelschaltung *zweier* Widerstände, indem man die Brüche auf der rechten Seite der Gleichung durch Erweitern zusammenfasst:

$$\frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V} = \frac{R_V}{R_2 \cdot R_V} + \frac{R_2}{R_2 \cdot R_V} = \frac{R_V + R_2}{R_2 \cdot R_V}$$

Auf beiden Seiten der Gleichung steht nun je ein einzelner Bruchterm. Da beide gleich sind, müssen auch die jeweiligen Kehrwerte zueinander gleich sein. Man erhält damit für die Parallelschaltung *zweier* Widerstände:

$$R_2^* = \frac{R_2 \cdot R_V}{R_2 + R_V}$$

Für *drei oder mehr* Widerstände ist diese Berechnungs-Formel hingegen *nicht* gültig!

- Je geringer der Wert von R_V im Vergleich zum Wert von R_2 wird, desto geringer wird auch der Wert von R_2^* . Die nun am Widerstand R_2 des belasteten Spannungsteilers anliegende Spannung U_2^* und damit auch die am Verbraucher anliegende Spannung sinkt folglich gegenüber der Spannung U_2 beim unbelasteten Spannungsteiler ab.

Für die Spannung U_2 am belasteten Spannungsteiler gilt also:

$$U_2 = \frac{R_2^*}{R_1 + R_2^*} \cdot U_{\text{ges}} \quad (25)$$

Um einer starken Änderung von U_2 entgegenzuwirken, muss man bei einem niedermohmigen Spannungsteiler einsetzen; damit erhöht sich allerdings auch der ungenutzte „Querstrom“ durch den Widerstand R_2 .

Leuchtdiode mit Vorwiderstand

Leuchtdioden („LEDs“) werden beim Experimentieren gerne eingesetzt, um auf den ersten Blick zu erkennen, ob an einer bestimmten Stelle Strom fließt oder nicht. Damit beispielsweise eine rote Leuchtdiode mit „normaler“ Helligkeit aufleuchtet, benötigt sie eine Gleichspannung von etwa $U = 1,9 \text{ V}$.

Da zu hohe Spannungen ($U > 2,5 \text{ V}$) das Bauteil zum Überhitzen bringen können, schaltet man vor eine Leuchtdiode D bei Bedarf stets einen so genannten Vorwiderstand R in Reihe. Damit hat man letztlich einen Spannungsteiler mit einem Widerstand und einer Diode gebaut, was zur Folge hat, dass an der LED nur noch ein Teil der Gesamt-Spannung anliegt.

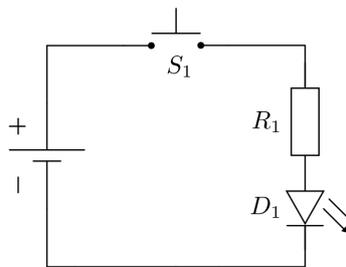


Abb. 82: Schaltung einer LED mit Vorwiderstand.

Bei einer Versorgungsspannung von $U = 9 \text{ V}$ muss am Vorwiderstand eine Spannung von $U_R = 7,1 \text{ V}$ abfallen, um eine typische Betriebsspannung von $U_{\text{LED}} = 1,9 \text{ V}$ an der Leuchtdiode zu erreichen. Beträgt der Wert des Vorwiderstandes beispielsweise $R = 470 \Omega$, so ergibt sich nach dem *Ohmschen Gesetz* für die Schaltung folgende Stromstärke:

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{7,1 \text{ V}}{470 \Omega} \approx 0,015 \text{ A} = 15 \text{ mA}$$

Diese Stromstärke fließt, da der Vorwiderstand und die Leuchtdiode als Reihenschaltung vorliegen, auch durch die LED. Normale LEDs werden üblicherweise mit Stromstärken

von knapp 20 mA betrieben, so dass ein 470 Ω -Widerstand bei einer anliegenden Spannung von 9 V keine schlechte Wahl ist.

Beispiel:

- Wie groß müsste der Vorwiderstand einer LED allerdings exakt sein, wenn an dort bei einer anliegenden Spannung von 1,9 V die Stromstärke 20 mA betragen soll?

Die LED wird ab 1,9 V leitfähig; bei nur geringfügig höheren Spannungen steigt die Stromstärke gemäß der gewöhnlichen Diodenkennlinie sehr schnell an. Man kann folglich damit rechnen, dass der Spannungsabfall an der LED *immer* rund 1,9 V beträgt, unabhängig von der Stromstärke. Am Vorwiderstand muss somit bei einer anliegenden Gesamtspannung von 9 V eine Teilspannung von $U_1 = 7,1$ V abfallen.

Da zudem die Stromstärke im Vorwiderstand $I_1 = I_{\text{ges}} = 20$ mA betragen soll, kann der Wert R_1 des Vorwiderstands gemäß dem Ohmschen Gesetz berechnet werden:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{7,1 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} \approx 355 \Omega$$

Hat man einen solchen Widerstand nicht als Bauteil vorliegen, so kann man entweder den nächst größeren wählen, oder einen regelbaren Widerstand (ein Potentiometer) verwenden.

Man kann in Schaltung *LED mit Vorwiderstand* den Taster S_1 auch durch zwei offene Leiter-Enden ersetzen, um einen „Durchgangsprüfer“ zu erhalten. Hält man diese an die Kontaktstellen eines anderen leitenden Bauteils, beispielsweise an eine andere Leuchtdiode, einen (nicht zu großen) Widerstand oder an eine kleine Glühbirne, so leuchtet die Leuchtdiode D_1 auf, sofern das Bauteil intakt ist. Bei zu großen Widerständen oder unterbrochenen Kontaktstellen – beispielsweise einem intakten Kondensator oder einer durchgebrannten Sicherung – bleibt D_1 hingegen dunkel.

Spannungsregelung mit Z-Dioden

Solange die Quellspannung U_0 unterhalb der Durchbruchspannung der Zenerdiode D_1 bleibt, liegt zwischen den Anschlüssen B_1 und B_2 ebenfalls die Spannung U_0 an. Steigt U_0 hingegen über die Durchbruchspannung von D_1 , so bleibt die Spannung zwischen B_1 und B_2 beim Wert der Durchbruchspannung von D_1 ; die restliche Spannung fällt am Widerstand R_1 ab.

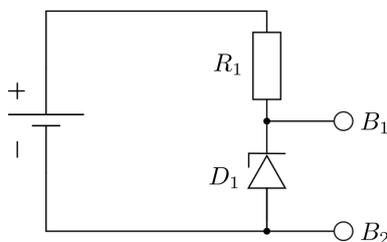


Abb. 83: Grundsaltung einer Z-Diode.

Der Grund dafür liegt darin, dass R_1 und D_1 einen Spannungsteiler bilden, wobei an D_1 maximal die Durchbruchspannung und an R_1 die restliche Spannung abfällt.

Allgemein gilt bei der Verwendung von Z -Dioden:

1. Die Ausgangsspannung wird durch die Durchbruchspannung der Z -Diode bestimmt.
2. Die Eingangsspannung muss größer als die Ausgangsspannung sein.
3. Je größer die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung ist, desto weniger wird die Ausgangsspannung durch Schwankungen der Eingangsspannung beeinflusst.
4. Die Verlust-Leistung P an einer Z -Diode ist am größten, wenn sich diese im Leerlauf befindet (also kein Verbraucher angeschlossen ist).

Anhand des folgenden Beispiels soll gezeigt werden, inwiefern sich eine Z -Diode als Spannungs-Stabilisator einsetzen lässt. Betrieben werden soll eine rote LED mit einer Betriebsspannung von $U_{\text{LED}} = 1,9 \text{ V}$ und einer Soll-Stromstärke von 20 mA ; die Z -Diode habe eine Durchbruch-Spannung von $U_{\text{ZD}} = 5,6 \text{ V}$.

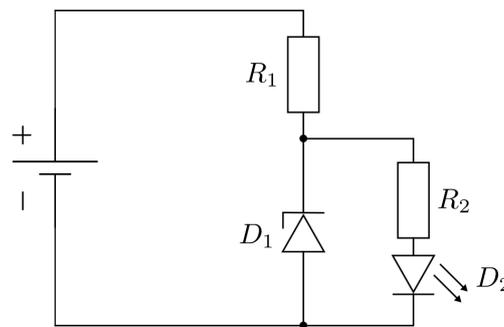


Abb. 84: Spannungsteiler-Beispiel mit einer Z -Diode.

Am Widerstand R_2 muss die Differenz dieser beider Spannungen abfallen, also $3,7 \text{ V}$. Für den Wert des Widerstands R_2 ergibt sich damit:

$$R_2 = \frac{U_{\text{ZD}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}} = \frac{5,6 \text{ V} - 1,9 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} \approx 185 \Omega$$

Damit die LED keinen Schaden nehmen kann, wird man sich für den nächst größeren verfügbaren Widerstand entscheiden, also beispielsweise $R_2 = 220 \Omega$ wählen. Um die Größe des Widerstands R_1 berechnen zu können, muss man die Gesamt-Stromstärke kennen; diese setzt sich zusammen aus dem Strom $I_{\text{LED}} = 0,02 \text{ A}$ und dem Mindeststrom durch die Z -Diode. Letzterer kann aus dem Datenblatt der Diode entnommen werden, oder gemäß folgender Formel abgeschätzt werden, wenn man zusätzlich zur Spannung U_{ZD} auch die Leistung P_{ZD} der Z -Diode kennt:

$$I_{\text{ZD,min}} = 10\% \cdot \frac{P_{\text{ZD}}}{U_{\text{ZD}}} = 0,1 \cdot \frac{0,5 \text{ W}}{5,6 \text{ V}} \approx 9 \text{ mA}$$

Hat die Z -Diode beispielsweise eine angegebene Leistung von $0,5 \text{ W}$, so erhält man nach obiger Abschätzung einen Mindeststrom von $0,009 \text{ A}$ durch die Z -Diode; für den Gesamtstrom erhält man somit $I_{\text{ges}} \geq 29 \text{ mA}$.

Angenommen, die maximale Eingangs-Spannung beträgt 15 V. Diese Spannung würde bedeuten, dass am Widerstand R_1 eine Spannung von $U_1 = (15 - 5,6)$ V abfallen muss. Für den Wert des Widerstands R_1 ergibt sich damit:

$$R_1 = \frac{U_1}{I_{\text{ges}}} = \frac{(15,0 - 5,6) \text{ V}}{0,029 \text{ A}} \approx 324 \Omega$$

Ein üblicher 330 Ω -Widerstand sollte also als Wahl für R_1 geeignet sein. Bei einer Betriebsspannung von 15 V wird der Widerstand R_1 allerdings stark belastet; die an R_1 in Wärme umgesetzte Leistung P_1 beträgt in diesem Fall:

$$P_1 = U_1 \cdot I_{\text{ges}} = (15,0 - 5,6) \text{ V} \cdot 0,029 \text{ A} \approx 0,273 \text{ W}$$

Sicherheitshalber sollte also anstelle eines normalen 1/4 W-Widerstands ein stärker belastbarer 1/2 W-Widerstand verwendet werden.

Durch die Verwendung der Z-Diode kann die LED mit den übrigen oben berechneten Bauteilen nun mit einer Versorgungsspannung zwischen mindestens 5,6 V (der Mindestspannung der Z-Diode) und maximal 15,0 V betrieben werden.²

Kondensator-Grundfunktion

Kondensatoren haben die Fähigkeit elektrische Ladung zu speichern und sie langsam wieder abzugeben. Eine einfache Schaltung, die diese Funktionsweise veranschaulicht, ist folgende:

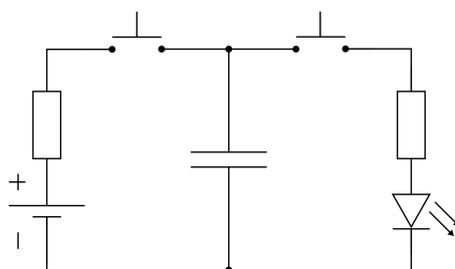


Abb. 85: Grundfunktion eines Kondensators

Die Schaltung funktioniert folgendermaßen:

- Betätigt man nur den linken Taster, so lädt sich der Kondensator auf. Ist er vollständig geladen, fließt (fast) kein weiterer Strom.³

² Bei einer Versorgungsspannung von nur 5,6 V leuchtet die LED allerdings nur noch sehr schwach: Die Z-Diode spielt bei diesem Wert nämlich, so dass R_1 und R_2 als Reihenschaltung einen Gesamt-Vorwiderstand von $R_1 + R_2$, also rund 500 Ω haben. Das bedeutet bei einem angenommenen Spannungsabfall von 1,9 V an der LED einen Spannungsabfall von $(5,6 - 1,9) \text{ V} = 3,7 \text{ V}$ am Vorwiderstand, so dass sich eine Stromstärke von nur $3,7 \text{ V} / 500 \Omega \approx 7,4 \text{ mA}$ einstellen wird. Diese Stromstärke ist, verglichen mit einer „normalen“ LED-Stromstärke von 20 mA, verhältnismäßig gering.

³ Da es keinen perfekten Isolator gibt, weisen Kondensatoren stets eine gewisse Selbstentladung auf, wobei Ladung von der einen Plattenseite zur anderen fließt. Ist der Kondensator noch mit einer Stromquelle verbunden, so fließt diese Ladung von der Stromquelle auf den Kondensator nach.

- Betätigt man nur den rechten Taster, so kann sich der Kondensator über die Leuchtdiode und ihren Vorwiderstand entladen. Die LED leuchtet kurzzeitig auf, wobei ihre Leuchtstärke ebenso wie der Entladestrom des Kondensators beständig abnimmt.

Betätigt man beide Taster, oder sind keine Taster vorhanden, so wird der Kondensator geladen und die LED leuchtet. Wird die Stromquelle abgetrennt, so erlischt die LED je nach Kapazität des eingebauten Kondensators mehr oder weniger schnell.

Transistor-Grundsaltungen

Ein *Transistor* kann, je nach Schaltungsart, als elektronischer Schalter oder als regelbarer Verstärker eingesetzt werden.

Darlington-Schaltung

Bei einer Darlington-Schaltung werden zwei Transistoren so eingesetzt, dass der erste als „Vorverstärker“ für den zweiten wirkt. Auf diese Weise multiplizieren sich ihre Verstärkungsfaktoren; es genügt folglich bereits eine extrem kleine Stärke an der Basis von Q_1 bereits aus, um über Q_2 eine Last (in diesem Fall die LED D_1 mit dem Vorwiderstand R_1) zu schalten.

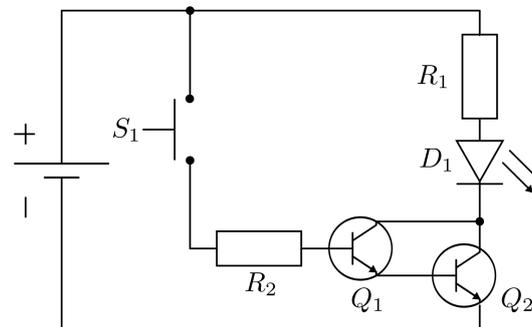


Abb. 86: Darlington-Schaltung mit zwei *npn*-Transistoren.

Beträgt die Versorgungsspannung $U = 9\text{ V}$, so sind $R_1 = 470\ \Omega$ und $R_2 \geq 1\text{ k}\Omega$ geeignete Widerstandswerte. Anstelle des Tasters kann man auch einen (oder sogar zwei separate) Finger sowie verschiedene Materialproben zum Schließen der Kontakte verwenden.

Hat beispielsweise der erste Transistor Q_1 einen Verstärkungsfaktor von $B_1 = 100$, so bewirkt der dort hinein fließende Basis-Strom einen 100-fach größeren Kollektor-Emitter-Strom in Q_1 ; dieser wiederum entspricht dem Basis-Strom von Q_2 . Hat auch der Transistor Q_2 einen Verstärkungsfaktor von $B_2 = 100$, so ergibt sich insgesamt ein Verstärkungsfaktor von $100 \cdot 100 = 10\,000$.

Dadurch, dass beide Kollektoren miteinander verbunden sind, benötigt der Transistor Q_2 keinen Strom begrenzenden Widerstand. Wird nämlich der Kollektor-Emitter-Strom I_{CE} von Q_1 sehr hoch, dann schaltet der zweite Transistor Q_2 komplett durch; ist dies der

Fall, so beträgt die Spannung zwischen dessen Kollektor C_2 und Emitter E_2 nur noch etwa $0,2\text{ V}$. Dies wiederum hat zur Folge dass nicht mehr die erforderlichen $0,6\text{ V}$ an der Basis von Q_2 anliegen können.

Der Transistor Q_2 wird somit nie komplett durchschalten: Die Schaltung reguliert sich vielmehr von selbst, so dass zwischen C_2 und E_2 ein Spannungsabfall von etwa $0,8\text{ V}$ bestehen bleibt ($0,6\text{ V}$ für die BE-Strecke von Q_2 und $0,2\text{ V}$ für die CE-Strecke von Q_1).

Es gibt auch so genannte „Darlington-Transistoren“, in denen die obige Anordnung der beiden Transistoren Q_1 und Q_2 bereits in einem einzigen Bauteil vereint ist.

Transistor als Aus-Schalter

Der folgende Schaltplan zeigt, wie man einen Transistor auch als Aus-Schalter (Öffner) verwenden kann.

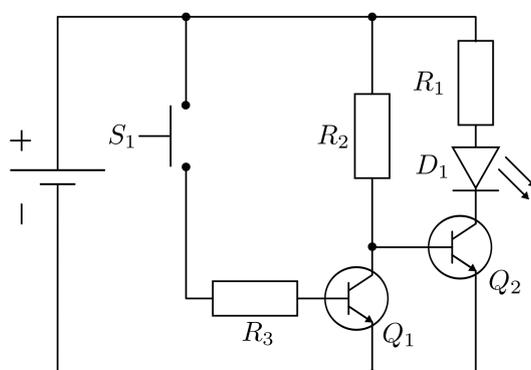


Abb. 87: Kombination zweier Transistoren als „Aus“-Schalter.

Beträgt die Versorgungsspannung $U = 9\text{ V}$, so sind $R_1 = 470\ \Omega$ und $R_2 = R_3 = 1\text{ k}\Omega$ geeignete Widerstandswerte.

Wird der Taster S_1 nicht gedrückt, so erhält der Transistor Q_1 keinen Strom an der Basis. Der Transistor Q_1 sperrt in diesem Fall, und die LED D_1 leuchtet (da der Transistor Q_2 einen Basis-Strom durch R_2 erhält). Drückt man hingegen den Taster S_1 , so geht die LED aus.

Durch das Drücken des Tasters S_1 schaltet der Transistor Q_1 durch; der Spannungsabfall gegenüber dem Ground-Niveau (GND) beträgt somit nur noch $0,2\text{ V}$. An der Basis von Q_2 liegt somit ebenfalls nur noch eine Spannung von $0,2\text{ V}$ (gegenüber GND) an; dies genügt jedoch nicht, um einen signifikanten Stromfluss durch die BE-Diode von Q_2 zu erreichen. Der Strom durch R_2 fließt somit über Q_1 an GND abgeleitet, und Q_2 sperrt.⁴

⁴ Für Q_1 kann kein *Darlington-Transistor* verwendet werden, da bei einem solchen der Spannungsabfall entlang der CE-Strecke $0,8\text{ V}$ beträgt; da die gleiche Spannung auch an der Basis von Q_2 anliegt, kann dieser weiterhin durchschalten.

Um doch einen Darlington-Transistor verwenden zu können, müsste man zwischen dem Emitter von Q_2 und GND eine zusätzliche Diode einbauen. In diesem Fall wäre eine Spannung von mindestens $1,2\text{ V}$ an der Basis von Q_2 nötig, um einen nennenswerten Stromfluss durch Q_2 zu bewirken. Demgegenüber wäre der Spannungsabfall von $0,8\text{ V}$ entlang der CE-Strecke eines Darlington-Transistors gering genug.

Emitterschaltung

Bei der so genannten Emitter-Schaltung ist der Emitter des Transistors direkt mit dem Ground-Anschluss verbunden. Bei einer derartigen Schaltung wird der Transistor nicht als Schalter, sondern als Verstärker eingesetzt.

Eine einfache Emitter-Schaltung, wie sie in der folgenden Abbildung dargestellt ist, stellt einen invertierenden Verstärker dar. Wird am Eingang (der Basis des Transistors) die anliegende Spannung etwas erhöht, so geht die am Ausgang anliegende Spannung stark zurück. Die verstärkende Wirkung liegt darin, dass eine kleine Änderung am Eingang eine große Änderung am Ausgang bewirkt; die invertierende Wirkung liegt darin, dass eine Erhöhung des Potentials am Eingang eine Reduzierung des Potentials am Ausgang zur Folge hat.

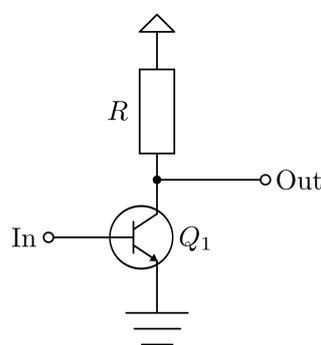


Abb. 88: Grundprinzip einer Emitterschaltung.

In diesem Schaltplan wird das nach oben zeigende Dreieck als Symbol für den Anschluss der Spannungsversorgung verwendet. Die Funktionsweise der Schaltung ist folgendermaßen zu erklären:

- Liegt an der Basis des Transistors eine verhältnismäßig hohe Spannung an, so wird die Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors leitend. Es fließt dadurch viel Strom durch den Transistor und somit auch durch den Widerstand R ; an diesem ergibt sich als Folge davon aufgrund des Ohmschen Gesetzes $U = R \cdot I$ auch ein hoher Spannungsabfall. Am Ausgang ist die Spannung gegenüber dem Spannungsanschluss deutlich verringert.
- Liegt an der Basis des Transistors keine Spannung an, so sperrt der Transistor; es fließt somit kein Strom durch die Kollektor-Emitter-Strecke und folglich auch nur verhältnismäßig wenig Strom durch den Widerstand R (abhängig von der restlichen Schaltung am Ausgang). Folglich entspricht die Spannung weitgehend der Spannung am Spannungsanschluss.

Eine leichte Änderung der Basis-Spannung bewirkt bei einem Transistor sehr große Änderungen bezüglich der fließenden Stromstärke; wird beispielsweise bei einem BC547 die Basis-Spannung um $1/6$ erhöht, so ergibt sich ein rund 20-fach größerer Kollektor-Strom; man nutzt den Transistor also als Spannungs-Strom-Wandler. Den Widerstand R hingegen kann man wiederum als Strom-Spannungs-Wandler ansehen: Schickt man einen Strom durch einen Widerstand hindurch, so erhält man eine Spannung beziehungsweise

einen Spannungsabfall. Da das Zahlen-Verhältnis $\frac{U}{I}$ (in Standard-Einheiten) üblicherweise deutlich größer als 1 ist, kann man mittels des Widerstands wiederum aus einigen Milliampere an Stromfluss ein paar Volt als Spannungsänderung hervorrufen.

Die oben beschriebene Emitter-Schaltung funktioniert nur dann sinnvoll, wenn nur ein vernachlässigbar geringer Strom durch den Ausgang fließt; die am Ausgang angebrachte Schaltung muss also „hochohmig“ sein. Emitter-Schaltungen werden am Häufigsten zur Verstärkung von Audio-Signalen verwendet, beispielsweise als Vorverstärker für Mikrophone. Zur Weiterverarbeitung der Signale werden dann beispielsweise Operationsverstärker genutzt.

... to be continued ...

Hinweis: Zu diesem Abschnitt gibt es *Übungsaufgaben*.

Kipp-Schaltungen

Die bistabile Kippschaltung

Eine bistabile Kippschaltung (auch „Flip-Flop“ genannt) hat zwei stabile Zustände, zwischen denen durch Betätigung eines Schalters hin- und hergewechselt werden kann.¹

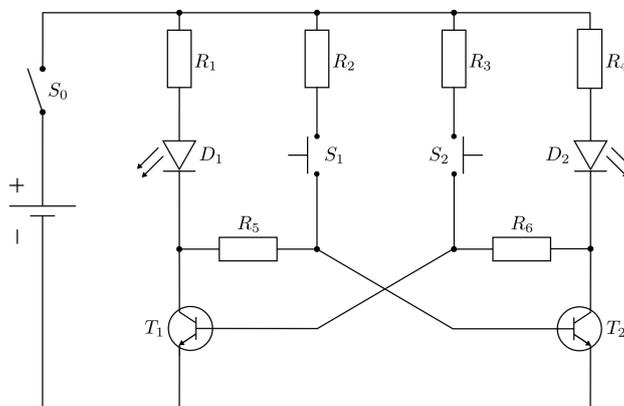


Abb. 89: Schema einer bistabilen Kippschaltung.

Wird der Hauptschalter S_0 im *Schema einer bistabilen Kippschaltung* geschlossen, so fließen schwache Ströme über die (starken) Widerstände R_5 und R_6 zu den Basis-Anschlüssen

¹ Man kann in die abgebildete Schaltung *Schema einer bistabilen Kippschaltung* zusätzlich eine gewöhnliche Diode noch vor der Verzweigung, also unmittelbar in Reihe mit der Stromquelle einbauen; das gleiche gilt für die folgenden Kippstufen. Dies ist zwar nicht erforderlich, stellt jedoch einen Verpolungsschutz dar, falls die Batterie falsch herum eingebaut wird. Die Diode als „elektronische Einbahnstraße“ verhindert in diesem Fall eine mögliche Beschädigung der Transistoren.

Ebenso kann man sich einen der beiden 470 Ω -Widerstände sparen, indem man den anderen noch vor den Verzweigungen, also unmittelbar in Reihe mit der Stromquelle schaltet; die Aufgabe dieses Widerstands liegt lediglich darin, die eingebauten LEDs vor zu hohen Stromstärken zu schützen.

der Transistoren T_1 und T_2 .² Welcher der Transistoren dabei als erster schaltet, hängt von den konkreten Bauteil-Eigenschaften ab.

- Schaltet der Transistor T_1 , so wird seine Kollektor-Emitter-Strecke leitend. Damit fließt ein starker Strom, der im Wesentlichen durch den Vorwiderstand R_1 der LED D_1 begrenzt wird, zum Minuspol der Stromquelle. Da kein Strom mehr durch den Widerstand R_5 fließt, sperrt der Transistor T_2 .³ Der schwache Strom, der über den Widerstand R_6 zur Basis von T_1 fließt, ist zwar zum Schalten des Transistors ausreichend, genügt jedoch nicht, um die Leuchtdiode D_2 aufleuchten zu lassen.
- Betätigt man den Schalter S_1 , so fließt ein größerer Strom durch den (mittelstarken) Widerstand R_2 zur Basis von T_2 als durch den starken Widerstand R_6 zur Basis von T_1 . Der Transistor T_2 schaltet somit durch, seine Kollektor-Emitter-Strecke wird leitend. Dadurch fließt kein Strom mehr durch den Widerstand R_6 ; der Transistor T_1 sperrt. Dieser Zustand bleibt auch erhalten, wenn der Schalter S_1 wieder geöffnet wird.
- Wird der Schalter S_2 betätigt, so fließt in umgekehrter Weise ein größerer Strom durch den (mittelstarken) Widerstand R_3 zur Basis von T_1 als durch den starken Widerstand R_5 zur Basis von T_2 . In diesem Fall schaltet wieder der Transistor T_1 durch und sperrt gleichzeitig den Transistor T_2 .

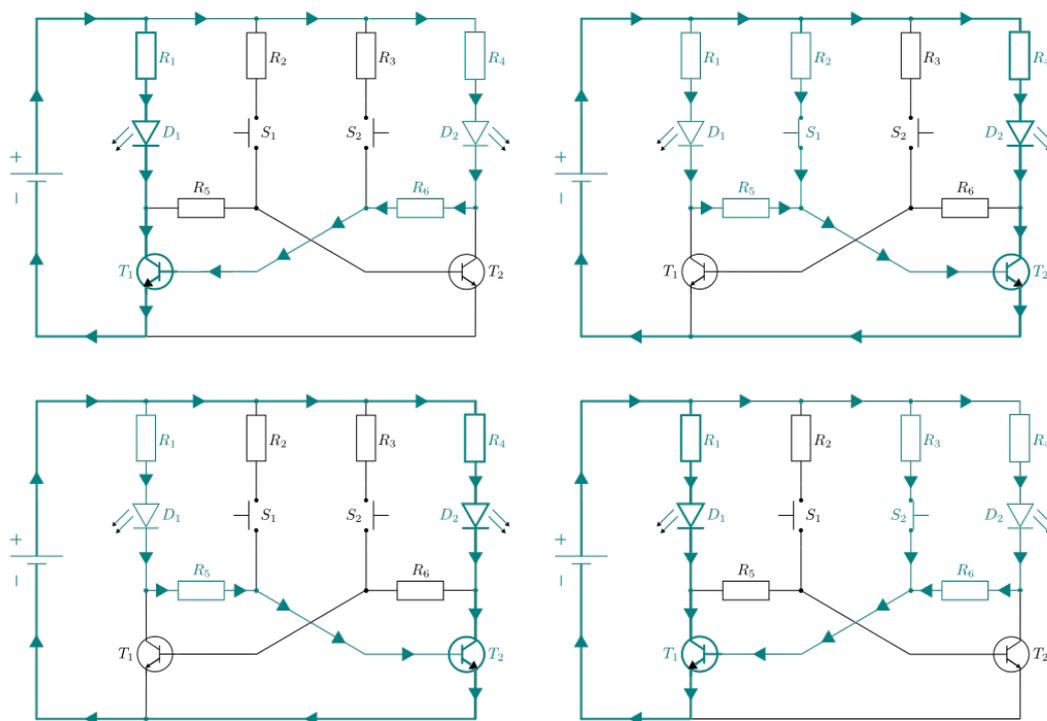


Abb. 90: Funktionsweise einer bistabilen Kippschaltung.

² Um die Symmetrie der Anordnung zu betonen und die Schaltung übersichtlicher zu machen, ist der linke Transistor im Spiegelbild gezeichnet.

³ Der Widerstand R_5 ist in der Abbildung *Funktionsweise einer bistabilen Kippschaltung* (Bild oben links) über die leitende Kollektor-Emitter-Strecke gleichermaßen mit dem Minuspol der Stromquelle kurzgeschlossen.

Werden die Schalter S_1 und S_2 mit den unteren Querleitungen statt den oberen verbunden, so kann durch Betätigung von S_1 der Transistor T_1 mitsamt dem linken Verbraucher-Stromkreis (Leuchtdiode D_1 mit Vorwiderstand R_1) und durch Betätigung von S_2 der Transistor T_2 mitsamt dem rechten Verbraucher-Stromkreis (Leuchtdiode D_2 mit Vorwiderstand R_2) aktiviert werden.

In der Digitaltechnik werden bistabile Kippschaltungen beispielsweise als elektronische Datenspeicher verwendet – je Flip-Flop kann genau ein Bit an Information gespeichert werden. Auch in Quarzuhren und Mikrochips kommen bistabile Kippschaltungen zum Einsatz; anstelle der mechanischen Schalter werden hierbei stets elektrische Signale zum Schalten genutzt.

Die astabile Kippschaltung

Eine astabile Kipp-Schaltung (auch „Multivibrator“ genannt) hat keinen stabilen Zustand; sie kippt zwischen zwei Zuständen ständig hin und her.⁴

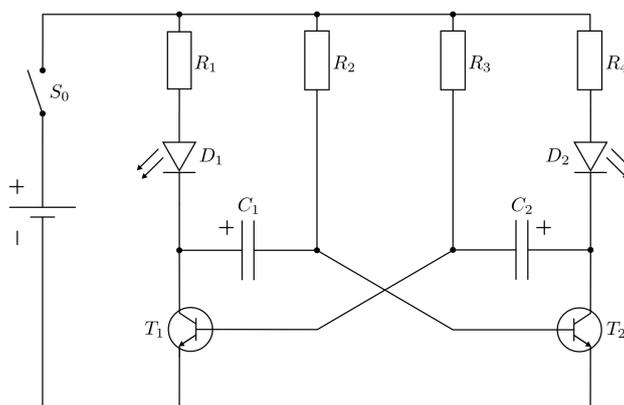


Abb. 91: Schema einer astabilen Kippschaltung.

Wird der Hauptschalter S_0 im *Schema einer astabilen Kippschaltung* geschlossen, so laden sich die beiden (Elektrolyt-)Kondensatoren C_1 und C_2 gemäß der eingezeichneten Polung auf. Grund dafür sind die ungleich großen Widerstandswerte $R_1 = R_4$ und $R_2 = R_3$ der symmetrischen Schaltungsanordnung: Da die Widerstandswerte R_1 und R_4 gewöhnlich um etliche Größenordnungen kleiner sind als R_2 bzw. R_3 , laden sich die Kondensatoren auf der mit dem $+$ -Zeichen versehenen Seite positiv auf.

Sind die Kondensatoren C_1 und C_2 voll geladen, so kann kein weiterer Strom durch sie fließen. Es treten daher nur Ströme durch die Widerstände R_2 und R_3 zu den Basis-Anschlüssen der Transistoren T_1 und T_2 auf, die sich jeweils noch im sperrenden Grundzustand befinden.

Welcher der beiden Transistoren T_1 und T_2 durch die Basis-Ströme als erster schaltet, kann beim Aufbau der Schaltung zunächst nicht vorhergesagt werden – da die Schaltung

⁴ Für einen konkreten Schaltungsaufbau sind beispielsweise folgende Bauteile geeignet: $R_2 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = 100\text{ }\mu\text{F}$, und $R_1 = R_4 = 470\text{ }\Omega$

aus zwei baugleichen Hälften besteht, entscheiden kleine Abweichungen der Bauteile von ihren Sollwerten darüber, auf welcher Seite der Einschaltvorgang schneller verläuft.

- Schaltet der Transistor T_1 , so wird seine Kollektor-Emitter-Strecke leitend. Hierdurch leuchtet einerseits die LED D_1 auf, andererseits fließt die Ladung von der +-Seite des Kondensators C_1 augenblicklich durch die nun leitende Kollektor-Emitter-Strecke („Kurzschluss“!) von T_1 zum Minuspol der Stromquelle ab; dadurch sinkt die Spannung am Kondensator C_1 auf 0 V ab. Der Kondensator C_1 ist allerdings ebenso mit der Basis des Transistors T_2 verbunden, so dass auch diesem plötzlich die zum Durchschalten notwendige positive Spannung an seiner Basis fehlt – der Transistor T_2 sperrt also, und die LED D_2 bleibt dunkel.

Nach der oben beschriebenen Entladung wird der Kondensator C_1 wieder über durch den schwachen Stromfluss über den großen Widerstand R_2 langsam in die umgekehrte Richtung aufgeladen; es baut sich im Kondensator also langsam eine Spannung in umgekehrter Richtung, also von der --Seite zur +-Seite auf. Erreicht diese Spannung, die ebenso am unmittelbar verbundenen Transistor T_2 anliegt, einen ausreichend hohen Wert (etwa 0,7 V), so schaltet der Transistor T_2 .

- Schaltet der Transistor T_2 , so wird dessen Kollektor-Emitter-Strecke leitend, und die LED D_2 leuchtet auf. Gleichzeitig fließt die positive Ladung von der +-Seite des Kondensators C_2 durch die Kollektor-Emitter-Strecke von T_2 zum Minuspol der Stromquelle ab. An beiden Seiten des Kondensators C_2 liegt daher unmittelbar eine Spannung von 0 V an, so dass der mit der --Seite des Kondensators verbundene Transistor T_1 sperrt und die LED D_1 ausgeht; der Kondensator C_1 wird dadurch wieder in der ursprünglichen Richtung aufgeladen.

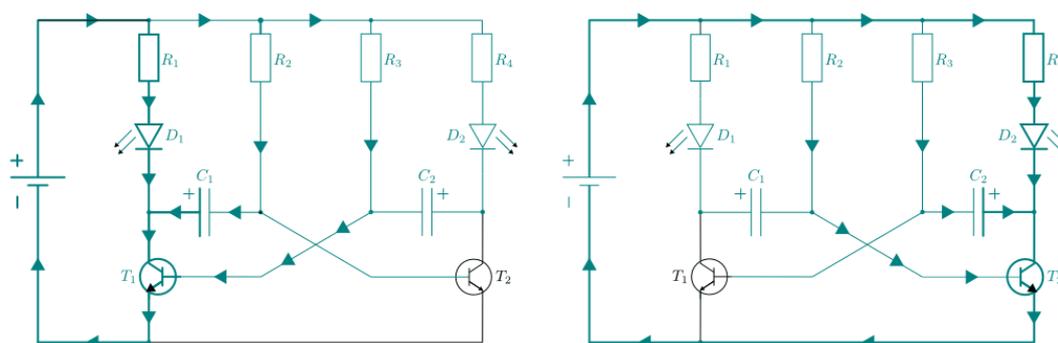


Abb. 92: Stromfluss in einer astabilen Kippschaltung.

Die Frequenz, mit der das Hin- und Herwechseln zwischen beiden Schaltungszuständen erfolgt, hängt von der Kapazität der beiden Kondensatoren C_1 und C_2 sowie von den Widerstandswerten R_2 und R_3 ab. Bei großen Kapazitäten bzw. großen Ladewiderständen erfolgt der Blinker-Wechsel nur langsam („Baulicht-Schaltung“); bei kleinen Kapazitäten und geringen Ladewiderständen kann die Frequenz durchaus auch einige kHz oder sogar MHz betragen.

Da die Ströme, die durch die LEDs D_1 bzw. D_2 fließen, auch anderweitig abgegriffen werden können, eignen sich astabile Kippschaltungen unter anderem als Taktgeber und Ton- beziehungsweise Signalgeneratoren.

Die monostabile Kippschaltung

Eine monostabile Kippschaltung (auch „Mono-Flop“ genannt) hat nur einen stabilen Zustand. Durch Betätigung eines Schalters kann sie in einen anderen Zustand versetzt werden, wobei sie nach einer gewissen Zeit wieder in den stabilen Grundzustand zurückkehrt. In der Praxis ist eine derartige Schaltung zur Hälfte aus einer *bistabilen Kippschaltung* und zur Hälfte aus einer *astabilen Kippschaltung* aufgebaut.

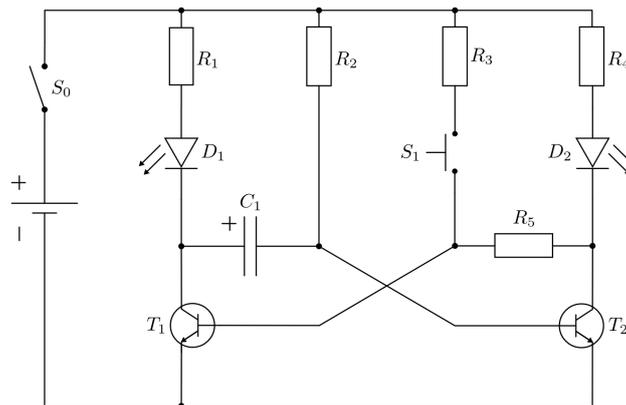


Abb. 93: Prinzip einer monostabilen Kippschaltung.

Wird der Hauptschalter S_0 im *Schema einer monostabilen Kippschaltung* geschlossen, so lädt sich der (Elektrolyt-)Kondensator C_1 gemäß der eingezeichneten Polung auf; ist der Kondensator geladen, kann kein weiterer Strom durch ihn fließen. Durch den Widerstand R_2 fließt dann ein stärkerer Strom als durch die Leuchtdiode D_1 mitsamt Vorwiderstand und den in Reihe geschalteten, großen Widerstand R_5 . Somit schaltet im Grundzustand der Transistor T_2 , die Leuchtdiode D_2 leuchtet auf.

- Betätigt man den Schalter S_1 , so fließt ein größerer Strom durch den (schwachen) Widerstand R_3 zur Basis von T_1 als durch den starken Widerstand R_2 zur Basis von T_2 . Der Transistor T_1 schaltet somit durch, seine Kollektor-Emitter-Strecke wird leitend. Dadurch leuchtet einerseits die Leuchtdiode D_1 auf. Der Kondensator C_1 wird dadurch schlagartig entladen; auf beiden Seiten liegt dadurch unmittelbar eine Spannung von 0 V an. Der mit dem Kondensator verbundene Transistor T_2 sperrt dadurch.

Durch den Widerstand R_2 wird der Kondensator anschließend langsam in die umgekehrte Richtung aufgeladen. Erreicht die sich dadurch aufbauende Spannung einen ausreichend hohen Wert (etwa 0,7 V), so schaltet der Transistor T_2 wiederum und die Leuchtdiode D_2 leuchtet auf. Da die Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors T_2 leitend ist (und somit unmittelbar mit dem Minus-Anschluss der Stromquelle verbunden ist), kann kein Strom mehr durch den Widerstand R_5 mehr zum Transistor T_1 fließen – dieser sperrt also, und die Leuchtdiode D_1 erlischt. Die Schaltung kehrt somit in ihren Grundzustand zurück.

Wie lange die Schaltung im instabilen Zustand bleibt, hängt von der Kapazität des Kondensators C_1 sowie vom Widerstandswert R_2 ab. Je größer die Kapazität bzw. je größer der Ladewiderstand ist, desto langsamer erfolgt der Blinker-Wechsel.

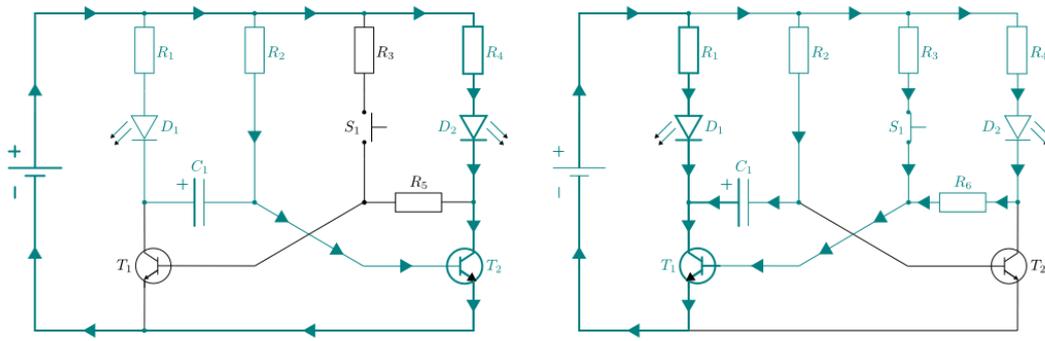


Abb. 94: Funktionsweise einer monostabilen Kippschaltung.

Ein bekanntes Beispiel für eine monostabile Kippschaltung ist das so genannte „Treppenlicht“, das nach Betätigung eines Schalters aufleuchtet und nach einer Weile von selbst wieder abschaltet. Darüber hinaus werden monostabile Kippschaltungen als Impulsgeneratoren verwendet; anstelle des mechanischen Schalters werden dabei elektrische Spannungssignale zum Umschalten genutzt.

Logik-Grundsaltungen

Logik-Grundsaltungen („Gatter“) bilden die Basis für die binäre Digitaltechnik. Sie dienen als Umsetzungen für die Rechenoperationen NICHT, UND, ODER sowie ENTWEDER-ODER der mathematischen Logik.¹

Die oben genannten Verknüpfungen lassen sich auf einfache Weise durch mechanische Schalter oder – ohne mechanische Bauteile – durch Dioden und Transistoren erreichen. Man unterscheidet dann zwischen nur zwei möglichen Zuständen:

- Der Zustand HIGH entspricht einem Anliegen von Spannung beziehungsweise dem logischen Wahrheitswert „wahr“,
- der Zustand LOW entspricht einem Fehlen von Spannung beziehungsweise dem logischen Wahrheitswert „falsch“.

Eine übliche Spannung bei der Benutzung logischer Bausteine ist 5 V; diese Spannung ist auch in der USB-Technik und bei der Verwendung von Mikrocontrollern (beispielsweise *Arduinos*) üblich.

NICHT-Schaltungen

Eine einfache NICHT-Schaltung lässt sich mit Hilfe eines Schalters beziehungsweise Tasters erreichen, der parallel zum Hauptstromkreis (im *Schema einer NICHT-Schaltung (mechanisch)* eine LED mit Vorwiderstand) geschaltet wird. Ist der Schalter *nicht* ge-

¹ Siehe Verknüpfungen von Aussagen.

geschlossen, so fließt Strom durch den Hauptstromkreis – die LED leuchtet. Wird der Schalter geschlossen, so wird dem Hauptstromkreis die nötige Betriebsspannung entzogen.²

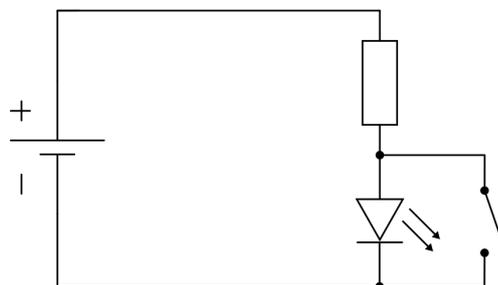


Abb. 95: Schema einer NICHT-Schaltung mit einem mechanischen Schalter.

Durch eine Parallelschaltung wird somit die gewöhnliche Funktion des Schalters umgekehrt („invertiert“). Als Alternative kann ebenso ein Taster beziehungsweise Schalter (in Reihe) eingebaut werden, der im Ausgangszustand geschlossen ist und bei Betätigung den Stromkreis unterbricht.

UND-Schaltungen

Eine einfache UND-Schaltung lässt sich durch den Einsatz zweier Schalter oder Taster erreichen. Werden diese als Reihenschaltung angeordnet, so kann nur Strom fließen, wenn *beide* Schalter gleichzeitig geschlossen sind.

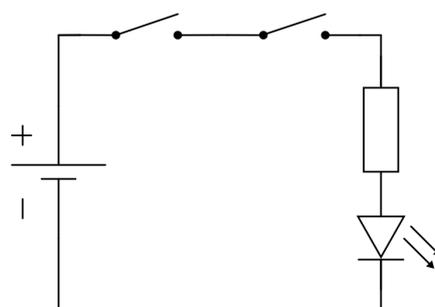


Abb. 96: Schema einer UND-Schaltung mit zwei mechanischen Schaltern.

UND-Schaltungen in der obigen Form finden beispielsweise als Sicherheitsschalter Verwendung.

Am Ausgang eines UND-Gatters liegt nur dann der Zustand HIGH an, wenn an allen Eingängen der Zustand HIGH anliegt.

² Bei geschlossenem Schalter sind im *Schema einer NICHT-Schaltung (mechanisch)* beide Seiten der LED direkt mit dem Minuspol der Stromquelle verbunden. Die Abzweigung zum parallel eingebauten Schalter erfolgt erst nach dem Vorwiderstand der LED, um beim Betätigen des Schalters einen Kurzschluss zu verhindern.

ODER-Schaltungen

Eine einfache ODER-Schaltung lässt sich erreichen, indem zwei (oder mehrere) Schalter beziehungsweise Taster parallel zueinander geschaltet werden. Es kann nur dann ein Strom im Hauptstromkreis fließen, wenn der eine oder der andere Schalter oder beide zugleich geschlossen sind.

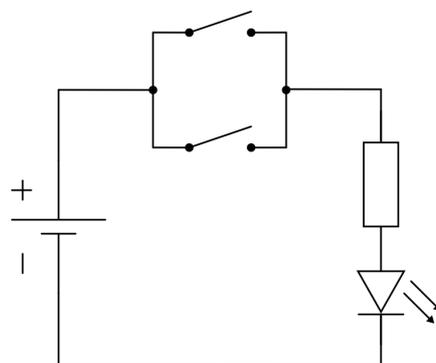


Abb. 97: Schema einer ODER-Schaltung mit zwei mechanischen Schaltern.

Eine elektronisch gesteuerte ODER-Schaltung lässt sich mittels zweier Transistoren realisieren. Beide Transistoren verfügen dabei über einen gemeinsamen Kollektor- und Emitteranschluss. Wird an die Basis eines oder beider Transistoren eine positive Spannung angelegt, so wird der Hauptstromkreis geschlossen – die LED im *Schema einer ODER-Schaltung* leuchtet auf.³

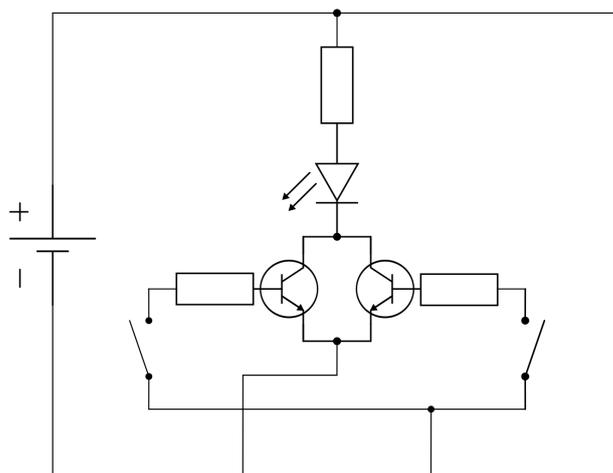


Abb. 98: Schema einer ODER-Schaltung mit zwei Transistoren

³ Die beiden mechanischen Schalter im *Schema einer ODER-Schaltung* dienen lediglich dazu, die beiden Basis-Anschlüsse der Transistoren mit der konstanten Stromquelle zu verbinden. In einer „echten“ elektronisch geregelten ODER-Schaltung kommen die Spannungssignale von einem anderen integrierten Schaltkreis, beispielsweise von einem Timer-IC.

XODER-Schaltungen

Eine mechanische XODER-Schaltung („exklusives“ ODER) kann durch zwei Wechselschalter mit umgekehrter Anschlussbelegung realisiert werden. Ein Stromfluss im Hauptstromkreis ist auf diese Weise nur dann möglich, wenn entweder der eine oder der andere Schalter geschlossen ist. Sind beide Schalter geschlossen oder geöffnet, kann kein Strom fließen.

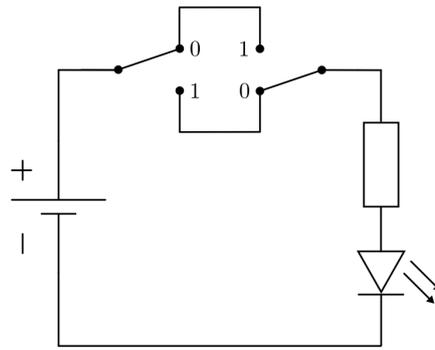


Abb. 99: Schema einer XODER-Schaltung mit zwei mechanischen Wechselschaltern.

... to be continued ...

Gleich- und Wechselrichter

An haushaltsüblichen Steckdosen liegt eine Wechselspannung mit einer effektiven Spannung von $U_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$ an. Diese Spannung kann mit eingebauten oder externen Transformatoren („Netzteilen“) leicht auf den gewünschten Spannungswert angepasst werden.

Viele elektronische Bauteile (beispielsweise Elektrolytkondensatoren, LEDs, Dioden und Transistoren) sind jedoch nicht auf den Betrieb mit Wechselspannung beziehungsweise Wechselstrom ausgelegt. Zum Betrieb von Schaltungen mit derartigen Bauteilen muss die Wechselspannung in eine entsprechend große Gleichspannung umgewandelt werden. Dies geschieht mit so genannten Gleichrichtern.

Umgekehrt kann eine Gleichspannung auch in eine Wechselspannung umgewandelt werden. Dies ist beispielsweise im Radio- und Fernsteuerungs-Bereich nötig, um Lautsprecher oder Lichtschranken mit bestimmten Spannungsfrequenzen anzusteuern. Eine weitere Anwendung ergibt sich im Photovoltaik-Bereich, wo man die von Solarzellen bereitgestellte Gleichspannung häufig in das allgemeine Stromnetz einspeisen möchte. Allgemein werden derartige Schaltungen, die eine Gleichspannung in eine entsprechend große Wechselspannung umwandeln, Wechselrichter genannt.

Gleichrichter-Schaltungen

Gleichrichter wandeln Wechselspannung in Gleichspannung um. Dazu sind Bauteile nötig, die den Strom nur in einer Richtung passieren lassen und in der anderen Richtung sperren.

Früher wurden zu diesem Zweck Elektronenröhren eingesetzt, inzwischen werden fast ausschließlich Halbleiter-Dioden verwendet.

Die folgenden Schaltungen setzen zum sicheren Experimentieren eine Wechselspannung von ungefähr $9\text{ V} < U_{\text{eff}} < 12\text{ V}$ voraus, wie sie von Labornetzteilen bereitgestellt wird.¹

Der Einweg-Gleichrichter

Am einfachsten lässt sich ein Gleichrichter durch die folgende Schaltung realisieren:

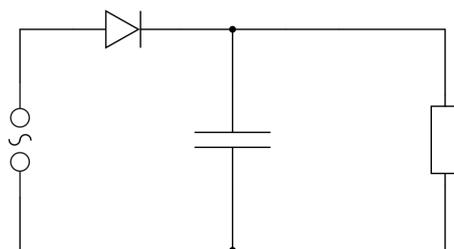


Abb. 100: Schaltplan eines Einweg-Gleichrichters.

Die Schaltung funktioniert folgendermaßen:

- Liegt am oberen Pol der Wechselspannungsquelle eine positive Spannung an, so leitet die Diode. Der Kondensator lädt sich vollständig auf, gleichzeitig fließt Strom durch den Lastwiderstand.
- Liegt am unteren Pol der Wechselspannungsquelle eine positive Spannung an, so sperrt die Diode. Der Kondensator entlädt sich und hält so den Stromfluss durch den Lastwiderstand kurzzeitig aufrecht.

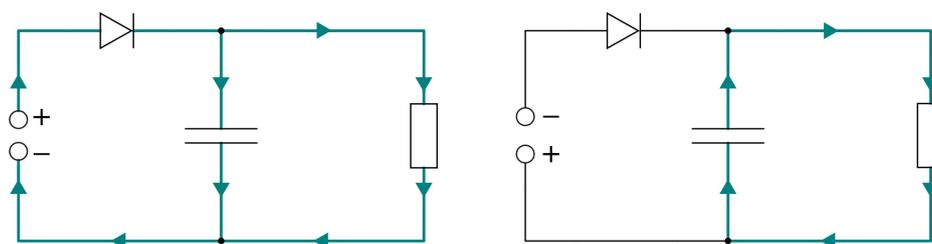


Abb. 101: Stromfluss im Einweg-Gleichrichter in Abhängigkeit von der Polung der Stromquelle.

Ist der Lastwiderstand sehr groß, so kann nur eine sehr geringe Stromstärke auftreten. Der Kondensator entlädt sich folglich nur langsam und kann die Nennspannung bis zum nächsten Umpolen (weitgehend) aufrecht erhalten. In der Praxis ist der Lastwiderstand begrenzt, so dass die am Lastwiderstand anliegende Spannung zwischenzeitlich stark, eventuell sogar auf null absinken kann.

¹ Niemals mit Netzstrom aus der Steckdose experimentieren, das ist lebensgefährlich!

Zweiweg-Gleichrichter

Durch den Einsatz von vier Dioden lassen sich – anders als beim Einweg-Gleichrichter – beide Polungen der Stromquelle, d.h. beide Halbbögen der sinusförmigen Wechselspannung nutzen. Der grundlegende Schaltplan sieht folgendermaßen aus:

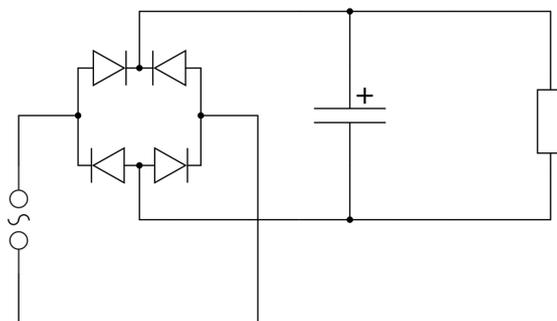


Abb. 102: Schaltplan eines Zweiweg-Gleichrichters.

Die Schaltung funktioniert folgendermaßen:

- Liegt am oberen Pol der Wechselspannungsquelle eine positive Spannung an, so fließt im *Stromfluss-Diagramm eines Zweiweg-Gleichrichters* (linkes Bild) Strom durch die obere linke Diode zum Kondensator beziehungsweise Lastwiderstand und über die untere rechte Diode zum unteren Pol der Wechselspannungsquelle zurück.
- Liegt am unteren Pol der Wechselspannungsquelle eine positive Spannung an, so fließt im *Stromfluss-Diagramm eines Zweiweg-Gleichrichters* (rechtes Bild) Strom durch die obere rechte Diode zum Kondensator beziehungsweise Lastwiderstand und über die untere linke Diode zum oberen Pol der Wechselspannungsquelle zurück.

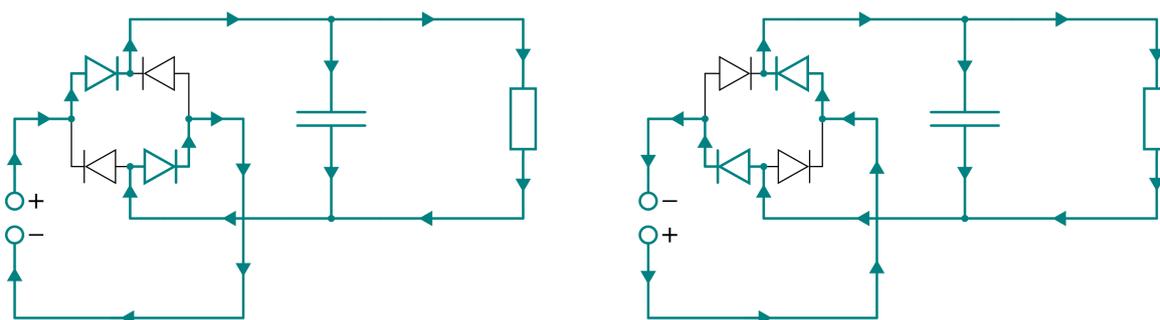


Abb. 103: Stromfluss im Zweiweg-Gleichrichter in Abhängigkeit von der Polung der Stromquelle.

Als Ausgangsspannung entsteht eine pulsierende Gleichspannung, die wie beim Einweg-Gleichrichter durch den Kondensator mehr oder weniger geglättet wird.

Zweiweg-Gleichrichter werden oftmals in Netzteilen für elektronische Kleingeräte eingesetzt. Die besondere Anordnung der vier Dioden, auch „Grätz-Schaltung“ genannt, gibt es auch als fertiges Bauelement („Brückengleichrichter“) zu kaufen.

Wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist, ist der Betrag der von einem Brückengleichrichter bereitgestellten Gleichspannung zeitlich nicht konstant; vielmehr ist deutlich ein „Pulsieren“ der Spannung zu erkennen. Um die „Spannungstäler“ auszugleichen, kann man einen Kondensator parallel zum eigentlichen Verbraucher-Stromkreis schalten.

Der Kondensator wird geladen, während die anliegende Spannung hoch ist, und hält wiederum diesen Wert aufrecht, während die anliegende Spannung gering ist. Als Faustregel sollten hinter einem Brückengleichrichter je 1 A an Ausgangs-Stromstärke etwa $100 \mu\text{F}$ an Kondensator-Kapazität eingebaut werden.

Wechselrichter-Schaltungen

Wechselrichter wandeln Gleichspannung in Wechselspannung um. Hierzu werden Polwechsler eingesetzt, die mit einer bestimmten Frequenz die Pole der Eingangsgleichspannung abwechselnd mit den Ausgängen (beispielsweise Buchsen) verbinden.

Im einfachsten Fall ist der Polwechsler ein Wechselschalter, der von Hand oder elektronisch mit Hilfe eines Relais betätigt wird. Die Frequenz der Wechselspannung entspricht hierbei der Schaltfrequenz des Polwechslers.

... to be continued ...

Schaltungs-Simulationen mit QUCS

QUCS steht für „Quite Universal Circuit Simulator“; das Programm ist also darauf ausgelegt, eine Vielzahl von Schaltungs-Simulationen möglich zu machen.

Unter Debian beziehungsweise Ubuntu oder Linux Mint kann QUCS folgendermaßen installiert werden:

```
sudo add-apt-repository ppa:fransschreuder1/qucs
sudo aptitude update

sudo aptitude install qucs
```

Möchte man auch digitale Schaltungen mit QUCS simulieren, sollten zudem folgende Pakete installiert werden:

```
sudo aptitude install freehdl libfreehdl0-dev
```

Anschließend kann das Programm über das Start-Menü oder aus einer Shell heraus mittels Eingabe von `qucs` gestartet werden.

Bedienung von QUCS

QUCS kann weitgehend mit der Maus bedient werden. Die Maustasten haben dabei folgende Bedeutung:

- Mit einem Linksklick werden Bauteile je nach Bearbeitungs-Modus positioniert oder ausgewählt.

Mit einem doppelten Linksklick auf ein Bauteil wird ein kleines Fenster geöffnet, in dem die charakteristischen Eigenschaften des Bauteils eingestellt werden können.

- Mit einem Rechtsklick auf ein Bauteil wird ein Auswahlménü geöffnet, das verschiedene auf das Bauteil anwendbare Funktionen bietet.
- Mit dem Mousrad kann der Schaltplan wie ein Blatt Papier nach oben beziehungsweise unten gescrollt werden.

Hält man bei Betätigung des Mousrads die **Shift**-Taste gedrückt, so kann man nach links beziehungsweise rechts scrollen.

Hält man bei Betätigung des Mousrads die **Ctrl**-Taste gedrückt, so kann man in den Schaltplan hinein beziehungsweise heraus zoomen.

QUCS-Workflow

Ein typischer Arbeitsablauf sieht in QUCS folgendermaßen aus:

- In der linken Fensterhälfte (dem Auswahl-Bereich), können beispielsweise unter der Rubrik „Komponenten“ Bauteile aufgelistet werden. Klickt man mit der linken Maustaste auf ein Bauteil, so kann es mit einem weiteren Linksklick in der rechten Fensterhälfte (dem Hauptfenster) eingefügt werden.¹

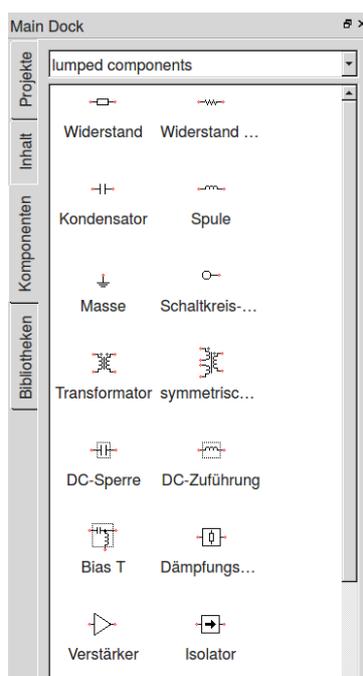


Abb. 104: Ausschnitt aus der Komponenten-Kategorie „Lumped Components“.

Die Bauteil-Komponenten sind in verschiedene Kategorien unterteilt: Unter **Lumped Components** werden beispielsweise Standard-Bauteile aufgelistet, unter **Sources** Strom- und Spannungsquellen, unter **Probes** virtuelle Multimeter, und unter **Nonlinear Components** Dioden und Transistoren. Neben diesen dort aufgelisteten „generischen“ Typen, bei denen die Modell-Parameter frei eingegeben werden können, gibt es auch vorgefertigte Bauteile, deren Parameter mit den tatsächlich im Schaltplan verbauten Modellen sehr gut übereinstimmen. Diese können über das Menü **Tool -> Component Library** oder mittels der Tastenkombination **Ctrl 5** geladen werden. Beispielsweise kann über dieses Menü ein vorgefertigtes Modell für einen BC548C-Transistor per Drag-and-Drop mit der linken Maustaste ins Hauptfenster gezogen werden.

Optional können Bauteile vor dem Positionieren mittels eines Klicks auf die rechte Maustaste gedreht werden; dies ist auch zu einem späteren Zeitpunkt mittels der Tastenkombination **Ctrl r** möglich.

Durch einen Linksklick auf das Werte-Feld eines Bauteils (oder einen Doppelklick auf das Bauteil) können die Bauteil-Parameter direkt eingegeben werden. Beispiels-

¹ Hat man den linken Auswahl-Bereich versehentlich oder absichtlich geschlossen, so kann er über das Menü **View -> Dock Window** wieder eingeblendet werden.

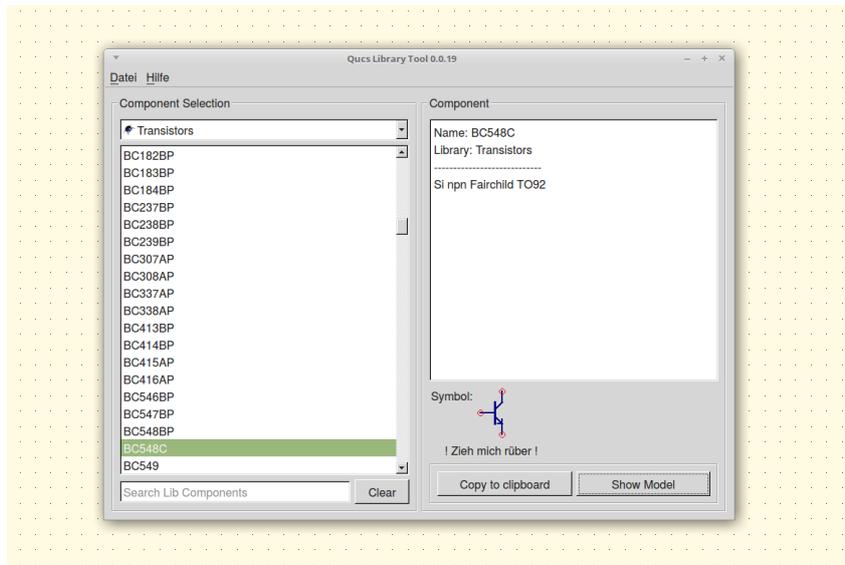


Abb. 105: Die „Component-Library“ (Hotkey: **Ctrl 5**).

weise haben neu eingefügte Widerstände einen Standard-Wert von 50 Ohm; klickt man also auf diesen Wert, gibt 100 ein und drückt **Enter**, so wird der neue Widerstandswert übernommen. Einheiten wie Ohm für einen Widerstand sind dabei optional; QUCS interpretiert Bauteil-Werte automatisch in der jeweiligen Standard-Einheit für das jeweilige Bauteil.

Bei der Angabe von Bauteil-Werten können zudem beispielsweise 1k für einen Ein-Kilo-Ohm-Widerstand oder 1.MOm für einen Ein-Mega-Ohm-Widerstand geschrieben werden. Entsprechend gibt es für kleine Einheiten die Vorsätze m für Milli, u für Mikro und p für Piko, was insbesondere für Kondensator-Parameter nützlich ist.

- Die eingefügten Bauteile können anschließend mittels des Draht-Werkzeugs verbunden werden; dieses kann man durch einen Klick auf das entsprechende Icon in der Symbolleiste oder mittels der Tastenkombination **Ctrl e** aktivieren.²



Mit einem Klick mit der linken Maustaste wird der Startpunkt der Verbindung, mit einem weiteren ein Zwischenpunkt beziehungsweise der Endpunkt festgelegt. Dabei rasten die Leitungen automatisch an den jeweils mit einem kleinen roten Kreis markierten Anschluss-Stellen ein. In einer fertig „verkabelten“ Schaltung sollten folglich keine roten Kreise mehr zu sehen sein.

Die Linien werden von QUCS automatisch vertikal oder horizontal ausgerichtet; an Knick-Stellen kann dabei mittels eines Klicks mit der rechten Maustaste umgeschaltet werden, in welche Richtung ein Knick erfolgen soll. Durch Drücken von **Esc** wird der Draht-Modus wieder beendet.

² Allgemein ist es sinnvoll, zunächst *alle* Bauteile zu platzieren, und diese erst dann mit Linien zu verbinden. Der Vorteil liegt unter anderem darin, dass so der Platzbedarf für die Schaltung besser abgeschätzt werden kann und die Bauteile nicht nachträglich mitsamt den Verbindungslinien verschoben werden müssen.

- In jedem Schaltplan muss zudem ein Leiterstück als Ground-Niveau (GND, bei DC-Schaltungen der Minus-Anschluss der Stromquelle) festgelegt werden, indem man in der Symbolleiste auf das entsprechende Symbol klickt und dieses – ähnlich wie ein Bauteil – mit der gewünschten Leitung verbindet.



- Der Schaltplan kann über das Menü **Datei -> Speichern** oder mittels der Tastenkombination **Ctrl s** gespeichert werden. Um die Schaltung simulieren zu können, ist dies zwingend nötig, da QUCS die Ergebnis-Werte in eine zugehörige Datei schreibt.

QUCS erstellt automatisch bei einer Simulation zu einer Schaltplan-Datei `datei.sch` eine Daten-Datei `datei.sch`, in welche die für die Simulation notwendige Netzliste geschrieben wird.

Zudem erstellt QUCS im gleichen Verzeichnis die Datei `datei.dpl`, die für Daten-Plots (Diagramme oder Tabellen mit den simulierten Werten) vorgesehen ist. Möchte man die Ausgabe-Diagramme gemeinsam mit dem Schaltplan im gleichen Fenster angezeigt bekommen, so kann man im Menü **Datei -> Datei-Einstellungen** auswählen und den Eintrag „Data Display“ von `datei.dpl` auf `datei.sch` ändern.

- Für eine der möglichen Simulationsarten muss aus der Bauteile-Rubrik „Simulationen“ das gewünschte Symbol (DC, AC, Transient, Parameter-Sweep) im Hauptfenster platziert werden.

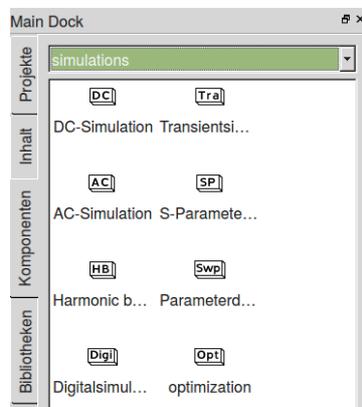


Abb. 106: Die möglichen QUCS-Simulationen als „Schaltplan-Elemente“ im Auswahl-Fenster.

Durch einen Doppelklick auf dieses Symbol können die Simulations-Parameter eingestellt werden.

- Die Simulation kann dann durch den Klick auf das entsprechende Icon in der Symbolleiste oder mittels **F2** gestartet werden.



- Um die simulierten Werte anzuzeigen, muss zusätzlich aus der Bauteile-Rubrik „Diagrams“ eine oder mehrere Ausgabe-Option (beispielsweise eine Tabelle oder ein Zeitverlaufs-Diagramm) ausgewählt und im Hauptfenster platziert werden.

Hilfreiche Tasten-Kombinationen

Pfeiltasten	Ausgewähltes Bauteil verschieben
Esc	Schaltet den Selektions-Modus an und aus
Ctrl e	Leiterstücke einzeichnen (Beenden mit Esc)
Ctrl r	Ausgewähltes Bauteil drehen
Ctrl m	Ausgewähltes Bauteil vertikal spiegeln
Ctrl l	Label für Leiterstück / Knoten vergeben
F2	Schaltungs-Simulation starten

Etwas Vorsicht ist bei der Verwendung der Esc-Taste geboten: Mit dieser Taste kann jeder andere Modus, beispielsweise der Bauteil-Einfüge-Modus oder der Linien-Zeichen-Modus beendet werden, und man gelangt wieder in den Selektions-Modus, in dem Bauteile durch einen Linksklick ausgewählt und verschoben werden können. Drückt man allerdings im Selektionsmodus die Esc-Taste, so ist gar kein Modus mehr ausgewählt, man kann also auch keine Bauteile mehr „anklicken“. Durch ein abermaliges Drücken von Esc kann man allerdings wieder in den gewohnten Selektionsmodus zurückkehren.

Um ein Bauteil zu drehen oder zu spiegeln, kann man im Bearbeitungs-Fenster auch die rechte Maustaste drücken und die entsprechende Funktion über das Auswahlmnü aufrufen.

Projekte

Für die Simulation von umfangreichen Schaltungen kann es sinnvoll sein, ein „Projekt“ anzulegen, das aus mehreren (Teil-)Schaltungen besteht. Für jede einzelne Teil-Schaltung kann dann beispielsweise ein eigenes Symbol erstellt werden und dieses dann an der gewünschten Stelle in einer anderen Schaltung eingefügt werden. So lassen sich auch komplexe Schaltungen übersichtlich organisieren.

DC-Simulationen

Mit einer DC-Simulation kann geprüft werden, welche Ströme durch einzelne Bauteile fließen und/oder welche Spannungen an einzelnen Bauteilen anliegen, wenn diese mit einer Gleichspannungs-Quelle verbunden werden. Bei einer derartigen Simulation geht es also nicht um einen zeitlichen Verlauf, sondern um eine Moment-Aufnahme der vorherrschenden Spannungen und Stromstärken.

Das wohl einfachste Beispiel für eine solche Schaltung ist ein Spannungsteiler, der aus zwei in Reihe angeordneten Widerständen besteht. Verbindet man eine solche Schaltung mit

einer Gleichspannungs-Quelle und fügt ein (in Reihe geschaltetes) Amperemeter sowie ein (parallel geschaltetes) Voltmeter ein, so erhält man etwa folgenden Aufbau:

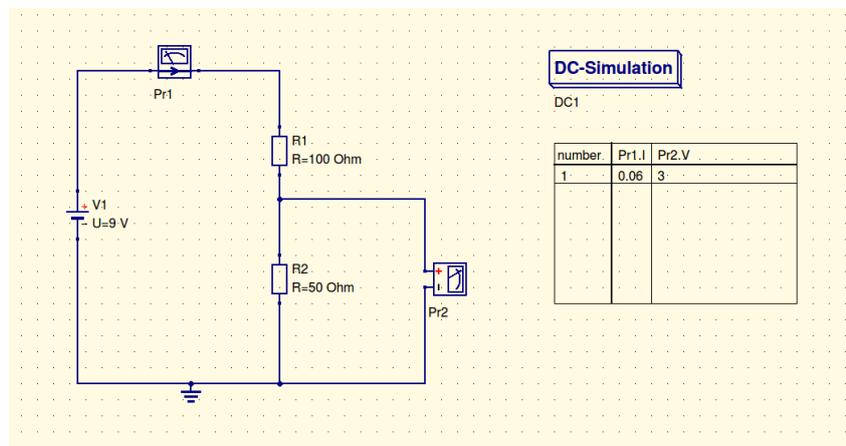


Abb. 107: Schematischer Aufbau einer einfachen Spannungsteiler-Schaltung.

Elektrische Potentiale an einzelnen Leitungen

Soll (ohne Einbau eines extra Voltmeters) angezeigt werden, welche Spannungen gegenüber dem GND-Niveau an einzelnen Leitungen vorherrschen, so müssen diese mit einem Label versehen werden. Hierzu kann man wahlweise das zu vermessende Leiterstück mit einem doppelten Linksklick auswählen, oder das Label-Werkzeug mittels **Ctrl 1** aktivieren und dann das zu vermessende Leiterstück einmalig mit der linken Maustaste anklicken.



Fügt man dann (aus der Rubrik Diagramme) eine Messtabelle ein, so kann die so markierte Leiterstelle ausgewählt werden. Läuft eine DC- Simulation fehlerfrei durch, so wird damit in der Messtabelle der Messwert an der markierten Stelle angezeigt.³

Möchte man sich die Spannungen gegenüber dem GND-Niveau von *allen* Bauteilen anzeigen lassen, so kann man (nach dem Einfügen eines DC-Simulations-Symbols im Schaltplan) im Menü **Simulation -> Calculate DC bias** aufrufen.

Parameter-Sweeps

Mit so genannten „Parameter-Sweeps“ kann untersucht werden, wie sich die Simulationen von Schaltungen verändern, wenn sich die Größe eines einzelnen Bauteils (beispielsweise eines einzelnen Widerstands) verändert. Man kann also beispielsweise zusätzlich zu einer

³ Bei einer Messtabelle wird allgemein für jeden zu messenden Wert eine eigene Spalte angezeigt; jede einzelne Zeile in der Tabelle entspricht dann einem Simulationsschritt. Bei einer einfachen DC-Simulation gibt es nur einen Simulationsschritt, also enthält die Tabelle auch nur eine Zeile.

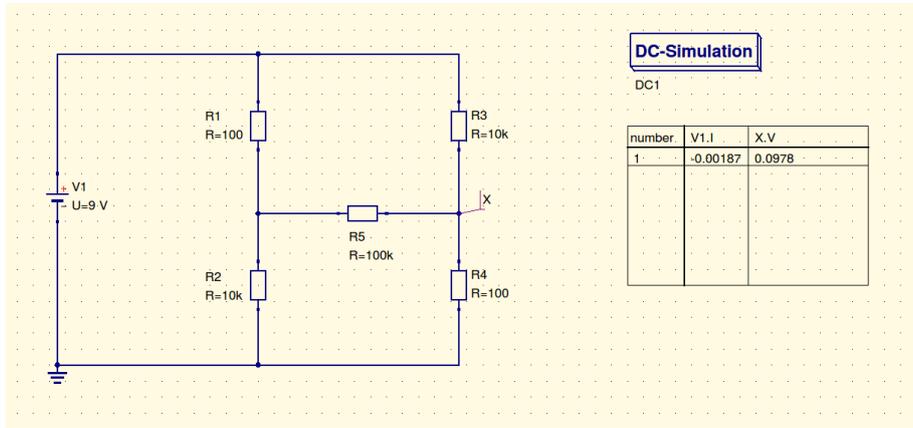


Abb. 108: Spannungsteiler-Schaltung mit Kabel-Label.

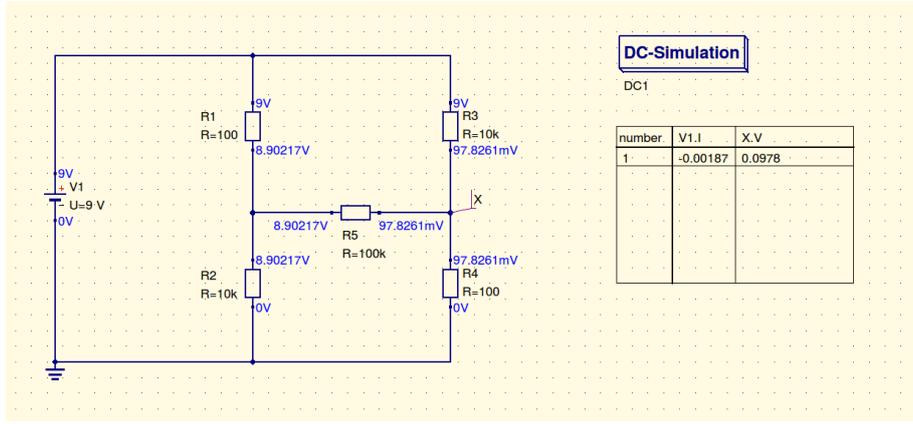


Abb. 109: Spannungsteiler-Schaltung mit DC-Bias-Kalkulation (Hotkey F8).

DC-Simulation eine Parameter-Sweep-Simulation in das Hauptfenster hinzufügen und mit dieser vorgeben, welches Bauteil Schwankungen unterworfen sein soll.

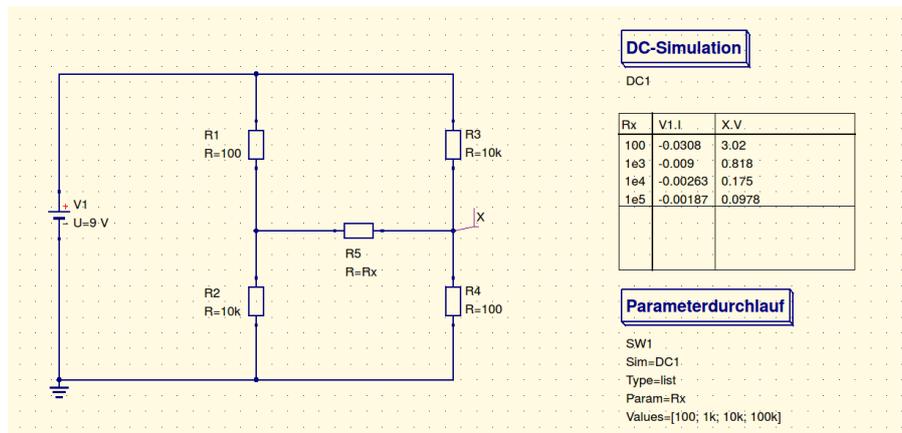


Abb. 110: Spannungsteiler-Schaltung mit Parameter-Sweep.

Soll beispielsweise ein Widerstandswert variiert werden, so weist man diesem keinen konkreten Wert, sondern vielmehr einen Variablennamen wie R_x zu. Fügt man dann eine Parameter-Sweep-Simulation hinzu und öffnet das entsprechende Dialog-Feld mit einem Doppelklick auf das Simulationsfeld, so kann die variable Größe R_x als Sweep-Parameter ausgewählt werden. Man kann zudem Start- und Stoppwerte für den Parameter angeben oder eine konkrete Liste an Werten, für welche die Simulation vorgenommen werden soll.

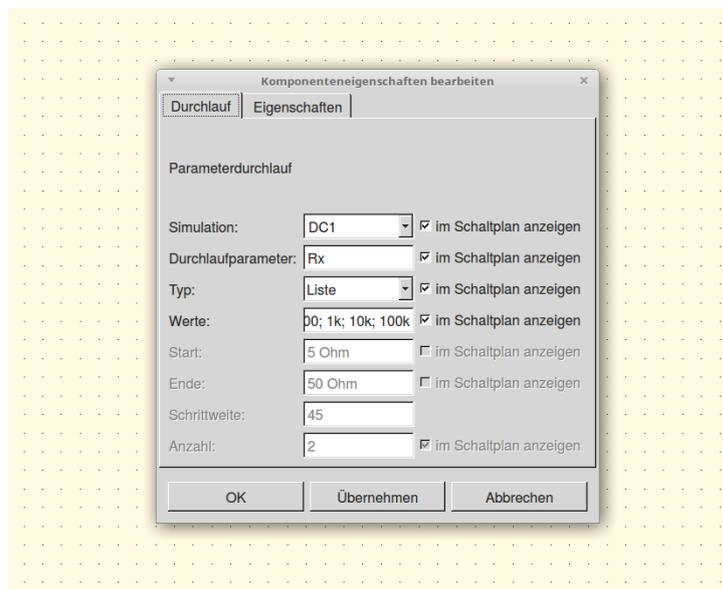


Abb. 111: Options-Fenster eines Parameter-Sweeps.

In dem Dialog-Fenster eines Parameter-Sweeps muss zudem festgelegt werden, zu welcher Simulation der Sweep gehören soll; man bekommt im Dialog-Fenster an dieser Stelle ein Auswahl-Menü angezeigt. Ist nur eine (andere) Simulation eingestellt, so ist die Auswahl eindeutig. Möchte man allerdings beispielsweise mehrere Parameter-Sweeps vornehmen, so kann man diese auch verschachteln, so dass der zweite Sweep den ersten als (Ausgangsbasis für die) Simulation verwendet.

Lässt man die Simulation erneut laufen, so erhält man für die jeweiligen Messgrößen nun mehrere Zeilen. Der Sweep-Parameter darf in der Tabelle allerdings nicht als anzuzeigender Wert aufgelistet werden; vielmehr werden die einzelnen Sweep-Werte von QUCS automatisch (anstelle der Numerierung) zur Kennzeichnung der Simulationsschritte verwendet.

Tabellen vs Graphen

Gibt man bei einem Parameter-Sweep nur wenige Werte, welche die zu variierende Größe annehmen soll, so bietet sich eine Tabelle als Ausgabeformat an: Man bekommt hierdurch die Ergebnis-Werte exakt und übersichtlich angezeigt.

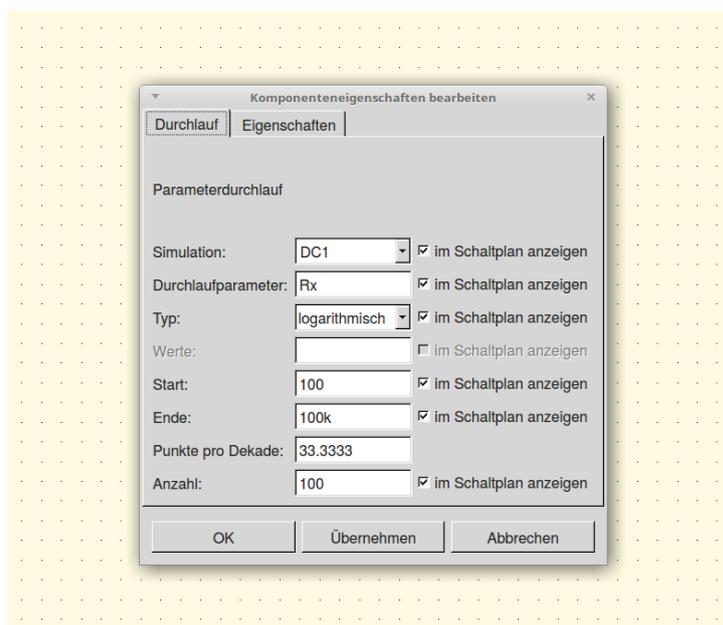


Abb. 112: Options-Fenster eines Parameter-Sweeps mit (logarithmischen) Wertebereich.

Durchläuft die variable Größe bei einem Parameter-Sweep einen Wertebereich mit vielen Prozess-Schritten, so ist hingegen ein Diagramm übersichtlicher, in dem die Resultate in Abhängigkeit von der variierenden Größe dargestellt werden.

Im Spannungsteiler-Beispiel zeigt sich, dass die Spannung an Knotenpunkt X mit einem zunehmenden Wert von R_x anfänglich stark absinkt, während bei großen Werten von R_x nur noch eine geringe Veränderung der Spannung zu beobachten ist. In diesem Fall ist also weniger die absolute Änderung der Sweep-Größe (beispielsweise in $100\ \Omega$ -Schritten) von Bedeutung; vielmehr sind relative Änderungen (beispielsweise in $\times 2$ -Schritten) interessant.

In einem „normalen“ Diagramm mit linear skalierten Achsen ist der Wertebereich zwischen $100\ \Omega$ und $1000\ \Omega$ kaum erkennbar: Die fünf Gitterlinien haben voneinander den Abstand $20000\ \Omega$. Um die Bereiche mit kleinen und großen Werten von R_x „gleichberechtigt“ darzustellen, kann das Options-Fenster des Diagramms mit einem Doppelklick geöffnet werden und unter der Rubrik "Eigenschaften ein Häkchen bei logarithmisch eingeteilte X-Achse gesetzt werden.

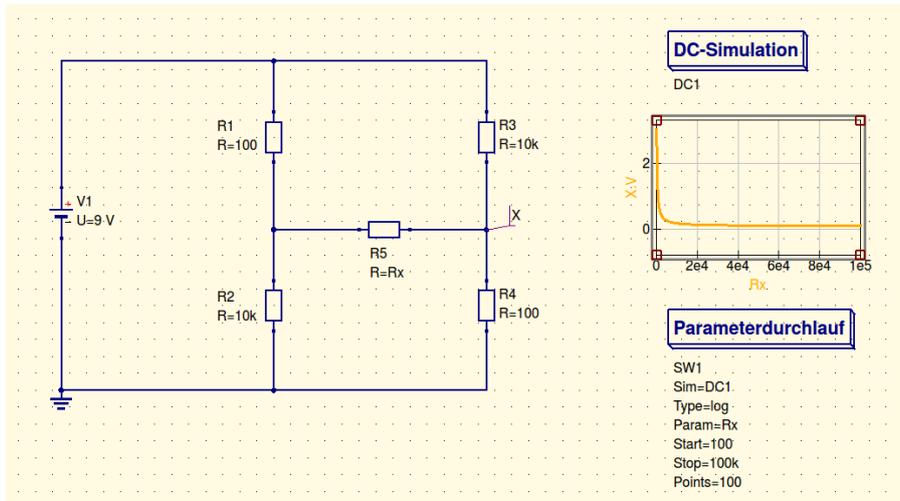


Abb. 113: Spannungsteiler-Schaltung mit Parameter-Sweep und Diagramm.

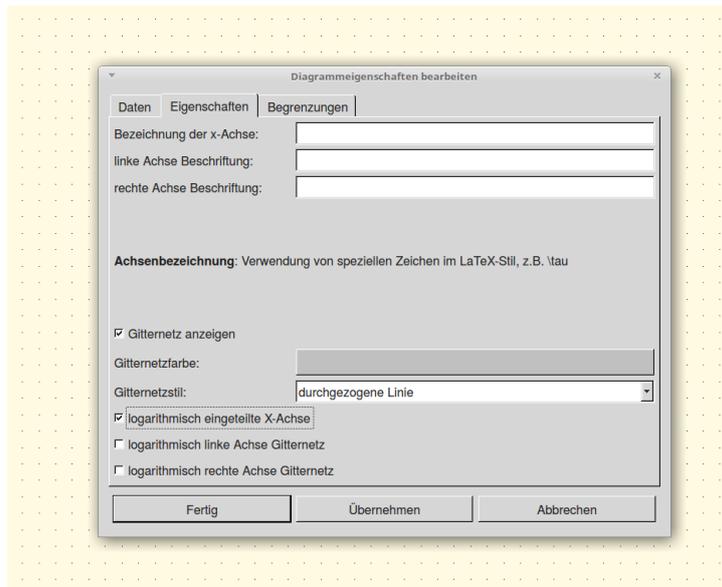


Abb. 114: Options-Fenster des Spannungs-Teiler-Diagramms.

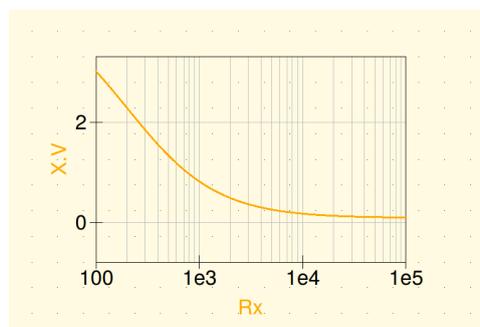


Abb. 115: Spannungs-Teiler-Diagramm mit logarithmisch skaliertem x -Achse.

In dem so skalierten Diagramm kann man nun – in Übereinstimmung mit der ursprünglichen Parameter-Liste – erkennen, dass die Spannung $X.V$ einen Wert von rund 3 V annimmt, wenn R_x den Wert 100Ω hat. Die Schaltung verhält sich hierbei in guter Näherung wie eine Reihenschaltung von R_1 , R_x und R_4 , bei der die beiden übrigen Widerstände kaum ins Gewicht fallen. Ist umgekehrt R_x sehr groß, so stellt die Schaltung eher zwei separate Spannungsteiler dar; der Wert von $X.V$ wird dann durch das Größen-Verhältnis der Widerstände R_3 und R_4 bestimmt.



Die exakten Werte von $X.V$ können aus dem Diagramm abgelesen werden, indem man einen „Marker“ in das Diagramm setzt. Dazu klickt man zunächst in der Symbolleiste auf das entsprechende Icon und anschließend auf das Diagramm.

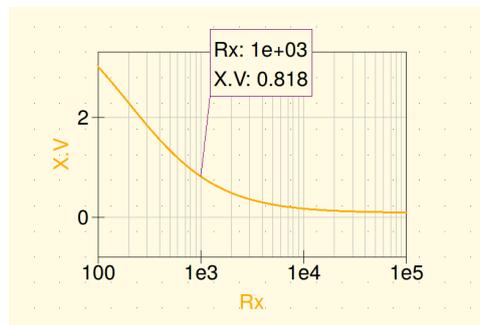


Abb. 116: Spannungs-Teiler-Diagramm mit logarithmisch skaliertem x -Achse und Marker.

Klickt man mit der linken Maustaste innerhalb des Diagramms auf das Marker-Feld, so kann man durch Drücken der linken beziehungsweise rechten Cursor-Taste den Marker zu weiter links beziehungsweise rechts gelegenen Punkten auf dem Graphen verschieben; bei Bedarf können auch mehrere Marker in ein Diagramm eingefügt werden. Die Verwendung von Markern kann somit eine zusätzliche Mess-Tabelle für exakte Werte überflüssig machen.

Doppelte Achselbelegung

Möchte man sowohl die Spannung als auch die Stromstärke im gleichen Diagramm angezeigt bekommen, so kann man dies durch eine zusätzliche Beschriftung der rechten Diagrammchse erreichen.

Allgemein ist eine zusätzliche Beschriftung der rechten Diagrammchse immer dann sinnvoll, wenn (mindestens) zwei Graphen im gleichen Diagramm dargestellt werden sollen und sich deren Wertebereiche stark voneinander unterscheiden.

Mehrfache Parameter-Sweeps

Diagramme sind insbesondere dann empfehlenswert, wenn zwei Parameter-Sweeps miteinander kombiniert werden. Dazu muss eine zweite Parameter-Sweep-Simulation in den

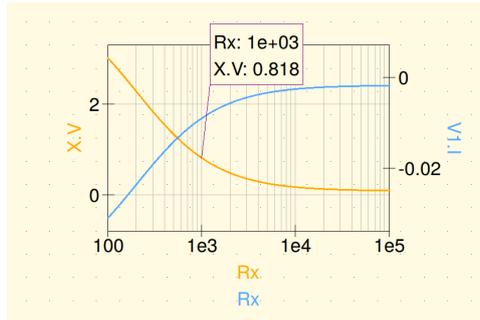


Abb. 117: Spannungs-Teiler-Diagramm doppelter Achsenbeschriftung (Spannung und Stromstärke)

Schaltplan hinzugefügt werden, und in deren Options-Fenster SW1 als zugrunde liegende Simulation eingestellt werden.

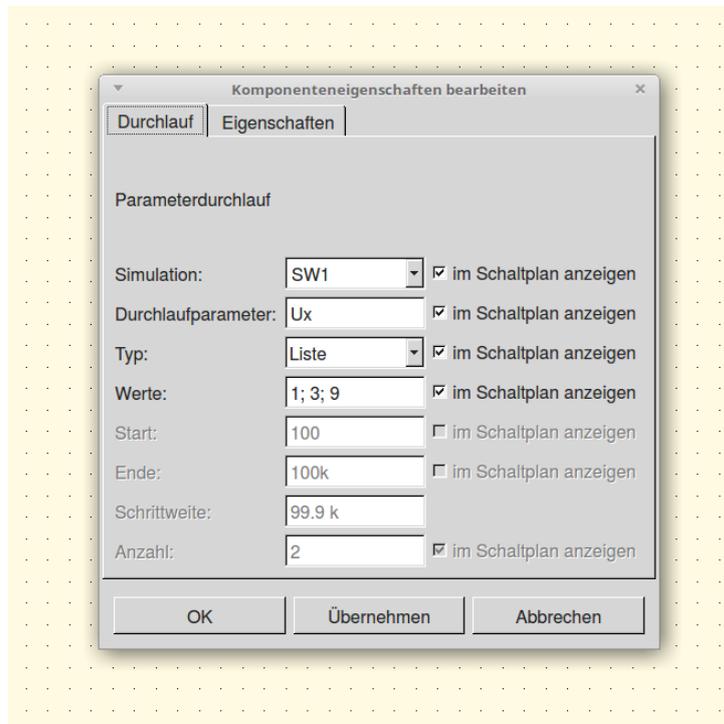


Abb. 118: Spannungs-Teiler-Beispiel mit mehrfachem Parameter-Sweep (Optionsfenster).

Variiert man beispielsweise nicht nur den Widerstand über 100 verschiedene Werte, sondern zusätzlich den Wert der Spannungsversorgung mit drei verschiedenen Werten, so ergibt sich im Diagramm entsprechend eine „Kurvenschar“ mit drei Linien.

Auch in diesem Diagramm können, sofern es ausgewählt ist, die Cursor-Tasten verwendet werden, um den Marker zu einer anderen Stelle zu bewegen; mit der Hoch- beziehungsweise Unten-Taste kann der jeweils höhere beziehungsweise niedriger verlaufende Graph ausgewählt werden.

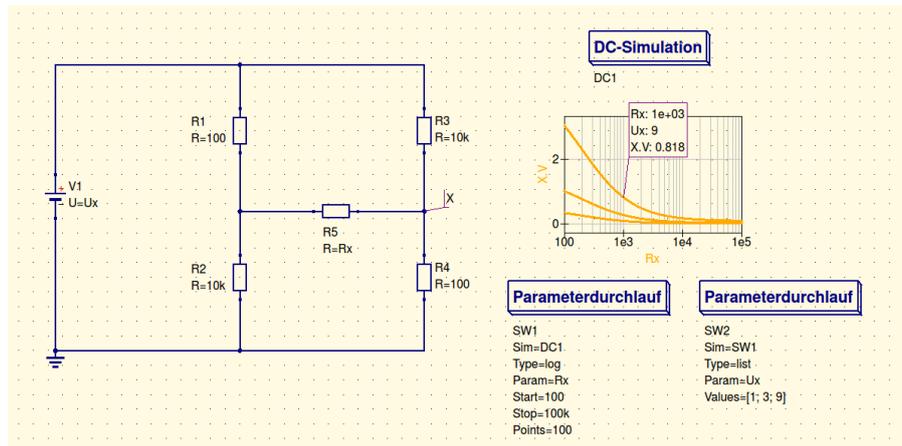


Abb. 119: Spannungs-Teiler-Beispiel mit mehrfachem Parameter-Sweep.

Transient-Simulationen

Bei Transient-Simulationen wird untersucht, wie sich das Verhalten einer Schaltung im Lauf eines Zeitabschnitts ändert; dies ist beispielsweise von Interesse, wenn eine Schaltung oszilliert, oder wenn an der Schaltung eine Wechselspannung (beliebiger Frequenz) anliegt.

Ein Beispiel für eine oszillierende Schaltung ist eine *astabile Kippstufe*. Möchte man eine solche Schaltung mit QUCS simulieren, so muss man allerdings darauf achten, sie nicht perfekt symmetrisch aufzubauen. In der Realität beginnt die Schaltung nämlich aufgrund von geringen Bauteil-Unterschieden und unterschiedlichen Kabellängen zu Blinken, in QUCS haben, während in QUCS Bauteile einer Sorte absolut identisch sind und alle Kabel keinen Widerstand haben. Zudem muss festgelegt werden, welche anfängliche Spannung die beiden Kondensatoren haben sollen; hierzu macht man einen Doppelklick auf je einen der beiden Kondensatoren und setzt im Eigenschafts-Fenster den Wert V auf 0.

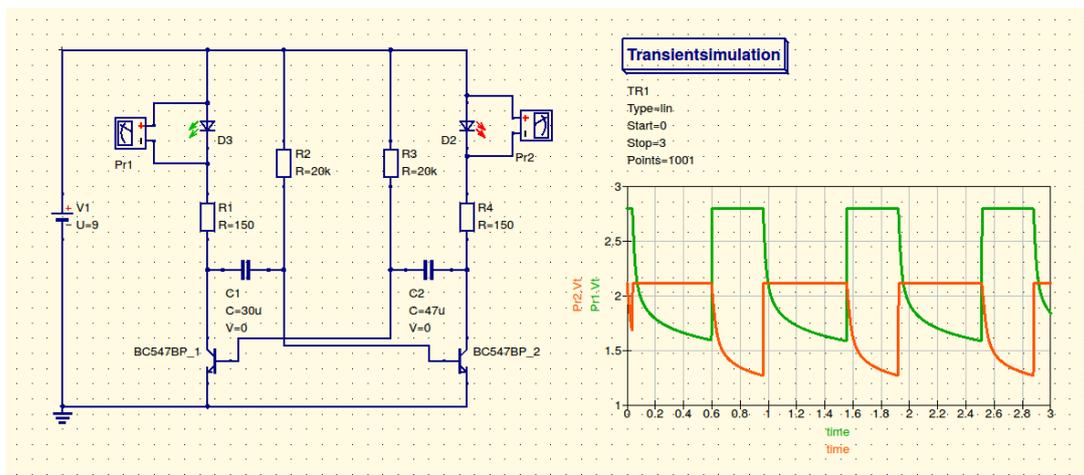


Abb. 120: Transient-Simulation einer astabilen Kippstufe.

Durch einen Doppelklick auf das Transient-Simulation-Symbol kann im Einstellungs-Fenster zudem festgelegt werden, über welchen Zeitbereich und in wie vielen Zeitschritten die Simulation erfolgen soll. Hierbei ist teilweise etwas Probieren angesagt: Es kann näm-

lich passieren, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt vom Simulationsprogramm keine numerische Lösung für die Schaltung mit den momentanen Strom- und Spannungswerten gefunden werden kann. Man bekommt bei der Simulation dann eine Meldung angezeigt, die etwa wie folgt aussieht:

```
ERROR: TR1: Jacobian singular at t = 5.683e-02, aborting transient
analysis
```

In diesem Fall kann es bereits genügen, eine andere Anzahl an Simulations-Schritten zu wählen und/oder die Bauteil-Parameter geringfügig zu ändern.

AC-Simulationen

Bei AC-Simulationen werden – im Gegensatz zu Transient-Simulation – die Start- und Stopwerte nicht als Zeitangaben, sondern als Frequenzen angegeben.

... to be continued ...

Links

- [QUCS Wiki](#)
- [QUCS Tutorial](#)
- [QUCS Technical Papers](#)
- [SPICE4QUCS Manual](#)

Elektronik mit Arduinos

Arduinos sind kleine Entwickler-Boards, die einen programmierbaren Mikrocontroller enthalten; sie lassen sich via USB mit einem Computer verbinden und lassen sich bei entsprechender Programmierung für vielseitige Elektronik-Projekte einsetzen.



Abb. 121: Das Entwicklerboard Arduino UNO.

Einen Mikrocontroller kann man sich allgemein als einen winzigen Computer vorstellen; er vereinigt eine Recheneinheit (CPU), einen Arbeitsspeicher, einen permanenten Speicher, eine USB-Schnittstelle, einen Display-Controller sowie einen Analog-Digital-Wandler auf einem einzigen Bauteil. Selbstverständlich ist ein Mikrocontroller, was die Performance anbelangt, nicht mit einem „echten“ Computer zu vergleichen; für einfache Sensor- oder Steuerungs-Schaltungen reichen Mikrocontroller jedoch meist völlig aus.

Im folgenden werden verschiedene Projekte für Arduino-UNO-Boards vorgestellt. Diese „klassischen“ Arduinos enthalten den Mikrocontroller „ATmega328“, der optional sogar vom Arduino-Board entnommen und direkt in elektronische Schaltungen eingebaut werden kann. Da ein ATmega328 als Baustein nur etwa drei Euro kostet, kann man Arduino-Boards also auch als Programmier-Hilfe für diese Bausteine nutzen.

Aufbau eines Arduino UNO

In der folgenden Abbildung sind die wichtigsten Komponenten eines Arduino UNO mit kurzen Beschreibungen aufgelistet.

Über die Pin-Leisten auf beiden Seiten des Arduinos kann dieser mittels Jumper-Kabeln mit externen Elektronik-Komponenten beziehungsweise einer Steckplatine verbunden werden:

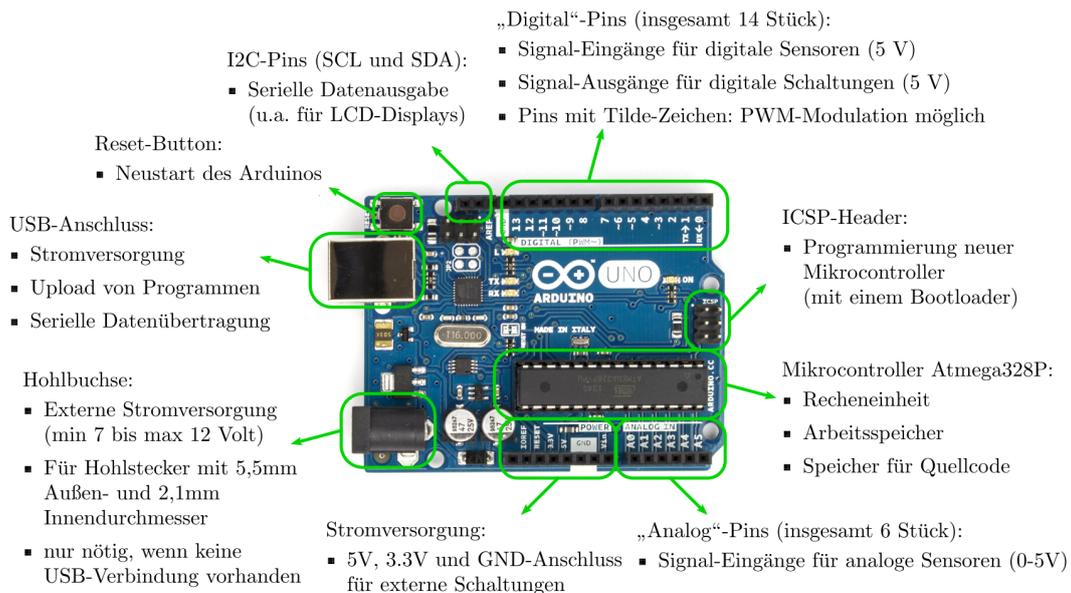


Abb. 122: Das Entwicklerboard Arduino UNO im Detail.

- Die analogen Pins A0 bis A5 sind als Sensor-Eingänge zum Messen von Spannungswerten zwischen 0 V und 5 V geeignet; durch einen eingebauten Analog-Digital-Wandler werden die gemessenen Spannungswerte auf einem Zahlenbereich von 0 (keine Spannung) bis 1023 (maximale Spannung, also 5 V) abgebildet.
- Die digitalen Pins 0 bis 13 können ebenfalls als Sensor-Eingänge festgelegt werden: Eine anliegende Spannung von $> 2,5$ V wird als HIGH (Zahlenwert 1), eine niedrigere Spannung als LOW (Zahlenwert 0) interpretiert.
- Die digitalen Pins 0 bis 13 können zudem als digitale Spannungs-Ausgänge festgelegt werden: Sie geben im Modus HIGH eine Spannung von etwa 5 V, im Modus LOW eine Spannung von 0 V aus. Die Stromstärke ist dabei allerdings auf 40 mA begrenzt; gegebenenfalls wird die Spannung der Pins automatisch herab geregelt, um diese Begrenzung zu erreichen.

Eine Besonderheit stellt der Digital-Pin 13 dar: Dort ist der Ausgabe-Strom auf nur 20 mA begrenzt, so dass dort eine LED direkt (ohne Vorwiderstand) angeschlossen werden kann (direkt neben Pin 13 ist ein GND-Pin, so dass dafür nicht einmal eine Steckplatine nötig ist). Bei neueren Versionen des Arduino UNO ist zwischen Pin 13 und GND sogar eine SMD-LED fest eingebaut.

- Die mit dem Tilde-Zeichen \sim versehenen Pins (3, 5, 6, 9, 10, 11) können, wenn sie als Ausgabe-Pins festgelegt werden, zudem mittels einer so genannter Pulsweiten-Modulation (PWM) sehr schnell zwischen 0 V und 5 V hin und her wechseln. Man kann dabei Werte zwischen 0 und 255 angeben, wobei 0 für „immer aus“ und 255 für „immer an“ steht.¹

¹ Beispielsweise kann man mittels PWM einen Motor oder eine Glühbirne bei einem Wert von 128 mit nur „halber Leistung“ ansteuern, da er nur die Hälfte der Zeit mit Spannung versorgt wird und sich die andere Hälfte der Zeit im Leerlauf befindet.

Eine LED lässt sich so ebenfalls „dimmen“: Die LED ist zwar schnell genug, um in der gleichen Frequenz mitzublinken, unser Auge jedoch nicht. Da wir nur 25 Einzelbilder je Sekunde wahrnehmen können,

Die übrigen Anschlüsse des Boards (AREF- und ICSP-Header) sind für eine normale Benutzung nicht von Bedeutung.

Installation der Arduino-Software

Damit ein Arduino die gewünschte Funktion erfüllen kann, muss er programmiert werden. Dafür benötigt man lediglich die gleichnamige Arduino-Entwicklungsumgebung und/oder das Programm „Fritzing“ (optional, aber empfohlen). Unter Linux Mint / Ubuntu lassen sich diese beiden Programme folgendermaßen installieren:

```
# Software-Pakete installieren:
sudo aptitude install arduino fritzing

# Benutzer zur Gruppe "dialout" hinzufügen:
sudo usermod -aG dialout BENUTZERNAME
```

Das Hinzufügen des angegebenen Benutzers zur Gruppe `dialout` ist nötig, damit dieser vom Linux-System notwendige Schreibrechte erhält: Schließt man ein Arduino-Board via USB am Computer an, so benötigt man diese Schreibrechte, um mittels des so genannten „Seriellen Ports“ Code an den Arduino senden zu können.¹

Wichtig: Die Rechte-Anpassung erfordert einen erneuten Login des Benutzers, um wirksam zu werden!

Nach der Installation kann die Arduino-Software aus einer Shell heraus mittels `arduino` oder über Startmenü -> Entwicklung -> Arduino IDE gestartet werden.

Im Hauptfenster des Programms kann wie mit einem Texteditor Quellcode eingegeben werden. Unten links wird die Nummer der aktuellen Zeile im Quellcode eingeblendet, unten rechts das derzeit ausgewählte Arduino-Board (Standard: Arduino UNO); ein anderes Arduino-Board über das Menü `Tool -> Boards` ausgewählt werden.

- Hat man den gewünschten Quellcode eingegeben, so kann man diesen mittels des Überprüfen-Icons in der Symbolleiste auf Syntax-Fehler testen.



erscheint uns eine LED, die nur die Hälfte der Zeit an ist, gegenüber einer permanent hellen LED als dunkler.

¹ Hat man ein Arduino-Board angeschlossen, kann man in einer Shell folgende Zeile eingeben:

```
ls -l /dev/ttyACM*
```

Der serielle USB-Port wird vom Linux-System automatisch als „Device“ erkannt; die Kommunikation findet über eine sich im `/dev/`-Verzeichnis befindende Datei dort befindende Datei namens `ttyACM0`, `ttyACM1` o.ä. statt (`tty` bezeichnet dabei die serielle Schnittstelle und `acm` das Datenübertragungsverfahren). Man erhält dabei also folgende Ausgabe:

```
crw-rw---- 1 root dialout 188, 0 5 apr 23.01 ttyACM0
```

Man kann daran erkennen, dass sowohl der Eigentümer als auch die Gruppe Lese- und Schreibrechte haben `rw-`, alle anderen Benutzer hingegen keine Rechte haben (`---`). Der Eigentümer ist `root`, die Gruppe ist `dialout`. Ein Benutzer kann also nur auf die serielle Schnittstelle zugreifen, wenn er die Arduino-Software mit SuperUser-Rechten startet oder (besser) wenn er Mitglied in der `dialout`-Gruppe ist.

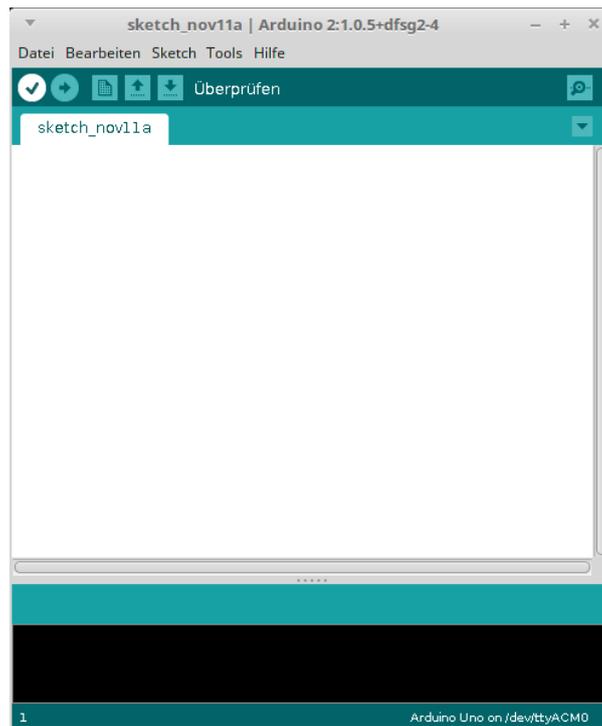


Abb. 123: Die Arduino-Entwicklungsumgebung.

- Wurde der Syntax-Check ohne Fehlermeldung durchlaufen, so kann man den Code kompilieren und an das Arduino-Board senden. Hierzu genügt ein Klick auf das Upload-Icon in der Symbolleiste: „Überprüfen“-Icons in der Symbolleiste auf Syntax-Fehler testen.



Der Syntax-Check ist optional, man kann auch unmittelbar auf das Upload-Icon klicken, wenn man den Code kompilieren und an das Arduino-Board senden möchte. Falls während des Kompilierens oder des Sendens ein Fehler auftritt, so werden im unteren Teil des Arduino-Fensters entsprechende Meldungen ausgegeben, die bei der Fehlersuche hilfreich sein können.

Erste Arduino-Programmbeispiele

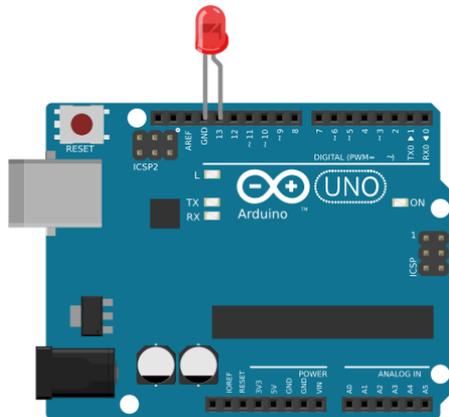
Das erste Beispiel in jeder Programmiersprache ist es, einfach den Text „Hallo Welt“ auf dem Bildschirm auszugeben. Arduinos kommunizieren allerdings weniger mit dem Computer-Bildschirm als vielmehr bevorzugt mit anderen elektronischen Komponenten. Ein einfaches Minimal-Beispiel ist also beispielsweise eine einzelne LED zum Blinken zu bringen.

Blinken einer LED

In der Arduino-IDE kann man über das Menü Datei -> Beispiele einige Beispiel-Quellcode-Dateien laden. Unter der Rubrik 01.Basics findet sich beispielsweise der Eintrag „Blink“ mit folgendem Inhalt:

```
1 // Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
2 // give it a name:
3 int led = 13;
4
5 // the setup routine runs once when you press reset:
6 void setup() {
7   // initialize the digital pin as an output.
8   pinMode(led, OUTPUT);
9 }
10
11 // the loop routine runs over and over again forever:
12 void loop() {
13   digitalWrite(led, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
14   delay(1000);             // wait for a second
15   digitalWrite(led, LOW);  // turn the LED off by making the voltage LOW
16   delay(1000);             // wait for a second
17 }
```

Der zugehörige Aufbau sieht etwa folgendermaßen aus:



Jeder Text, der hinter einem doppelten Schrägstrich-Zeichen // erscheint, wird vom Compiler ignoriert und dient somit lediglich als Kommentar für sich selbst und/oder andere Programmierer. Allgemein werden die Arduino-Programme mit einer Syntax geschrieben, die auf der Programmiersprache C aufbaut; beispielsweise muss daher jede einzelne Anweisung mit einem Strichpunkt-Zeichen beendet werden.

Eine Besonderheit ist, dass *jedes* Arduino-Programm eine Funktion `setup()` und eine Funktion `loop()` beinhalten muss:

- Die Funktion `setup()` wird einmalig nach dem Aufspielen eines neuen Programms sowie bei jedem Neustart des Arduinos ausgeführt.

- Die Funktion `loop()` beinhaltet Code, der anschließend in einer Endlos-Schleife ausgeführt wird: Ist die letzte Zeile der `loop()`-Funktion erreicht, so wird anschließend wieder die erste Zeile dieser Funktion ausgeführt.

Die Funktionsblöcke der `setup()`- beziehungsweise `loop()`-Funktion müssen nicht zwingend Code beinhalten; lässt man beide Blöcke leer und überträgt dieses Programm auf den Arduino, so wird jedes vorherige Programm gelöscht, und der Arduino ist „wie neu“.¹

Im obigen Beispiel wird innerhalb der `setup()`-Funktion mittels der vordefinierten `pinMode()`-Funktion der Digital-Pin 13 als Ausgabe-Pin festgelegt (OUTPUT). Innerhalb der `loop()`-Funktion wird an diesem dann mittels der ebenfalls vordefinierten `digitalWrite()`-Funktion die Ausgangs-Spannung abwechselnd an- und ausgeschaltet. Damit dies für das menschliche Auge wahrnehmbar wird – ein Arduino kann rund 20 000 Zeilen Code je Sekunde ausführen – wird mittels der `delay()`-Funktion das Programm immer wieder um die angegebene Anzahl an Milli-Sekunden unterbrochen.

Einfache Sensor-Schaltungen

In diesem Abschnitt soll zunächst die Verwendung eines Tasters als digitalem Sensor, später dann die Verwendung eines Potentiometers als analogem Sensor kurz vorgestellt werden.

Taster als Digital-Sensor

In der Arduino-IDE kann man über das Menü `Datei -> Beispiele` ein Beispielprogramm für die Verwendung eines Eingabe-Tasters. Unter der Rubrik `01.Basics` findet sich ein Eintrag „DigitalReadSerial“ mit folgendem Inhalt:²

```

1  /*
2   DigitalReadSerial
3   Reads a digital input on pin 2, prints the result to the serial monitor
4
5   This example code is in the public domain.
6   */
7
8   // digital pin 2 has a pushbutton attached to it. Give it a name:
9   int pushButton = 2;
10
11  // the setup routine runs once when you press reset:
12  void setup() {
13    // initialize serial communication at 9600 bits per second:
14    Serial.begin(9600);

```

(continues on next page)

¹ Allgemein kann der Mikrocontroller Atmega328 eines Arduino-UNO-Boards gut 10 000 mal neu beschrieben werden; zudem kann auf dem Board jederzeit der Mikrocontroller durch einen neuen ersetzt werden.

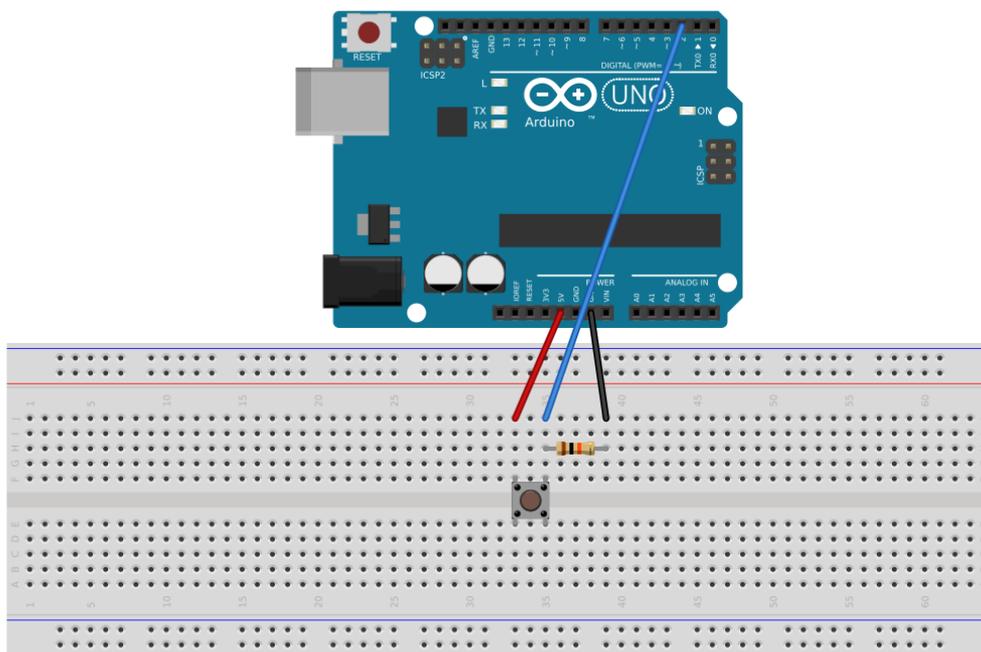
² Als Alternative zu diesem Programm kann auch unter der Rubrik `02.Digital` das Beispielprogramm `Button` gewählt werden. Dieses ist strukturell sehr ähnlich, bietet umfangreichere Erklärungen zum Aufbau der Schaltung, lässt andererseits jedoch den seriellen Monitor außen vor.

```

15 // make the pushbutton's pin an input:
16 pinMode(pushButton, INPUT);
17 }
18
19 // the loop routine runs over and over again forever:
20 void loop() {
21 // read the input pin:
22 int buttonState = digitalRead(pushButton);
23 // print out the state of the button:
24 Serial.println(buttonState);
25 delay(1); // delay in between reads for stability
26 }

```

Die zugehörige Schaltung sieht etwa folgendermaßen aus:



Der digitale Pin 2, der in diesem Beispiel als Sensor-Eingang verwendet werden soll, ist einerseits über einen $10\text{ k}\Omega$ -Widerstand mit GND, andererseits über den Eingabetaster mit der Spannung VCC (5 V) verbunden. Diese Schaltung stellt letztlich einen *Spannungsteiler* dar, wobei der Taster die Rolle des ersten Widerstands R_1 übernimmt:

- Ist der Taster gedrückt, so beträgt sein Widerstandswert nahezu $R_1 = 0\ \Omega$; fast die gesamte anliegende Spannung fällt somit über dem Widerstand $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, also zwischen dem mit Pin 2 verbundenen Punkt und GND ab. Am Pin 2 wird somit eine Spannung von $> 2,5\text{ V}$ gemessen, was beim Einlesen mittels der `digitalRead()`-Funktion den Wert HIGH beziehungsweise 1 liefert.
- Ist der Taster nicht gedrückt, so beträgt sein Widerstandswert nahezu $R_1 = \infty\ \Omega$. Würde man den Pin 2 nicht über einen Widerstand mittels GND verbinden, so hänge der Anschluss gewissermaßen „in der Luft“ – die `digitalRead()`-Funktion würde dann zufällig entweder den Wert HIGH (1) oder LOW (0) ausgeben. Durch den Wider-

stand und den so geschlossenen Stromkreis ist Pin 2 hingegen mit GND verbunden, und die `digitalRead()`-Funktion gibt verlässlich den Wert LOW beziehungsweise 0 aus.

Serieller Monitor – Anzeige der Sensor-Werte

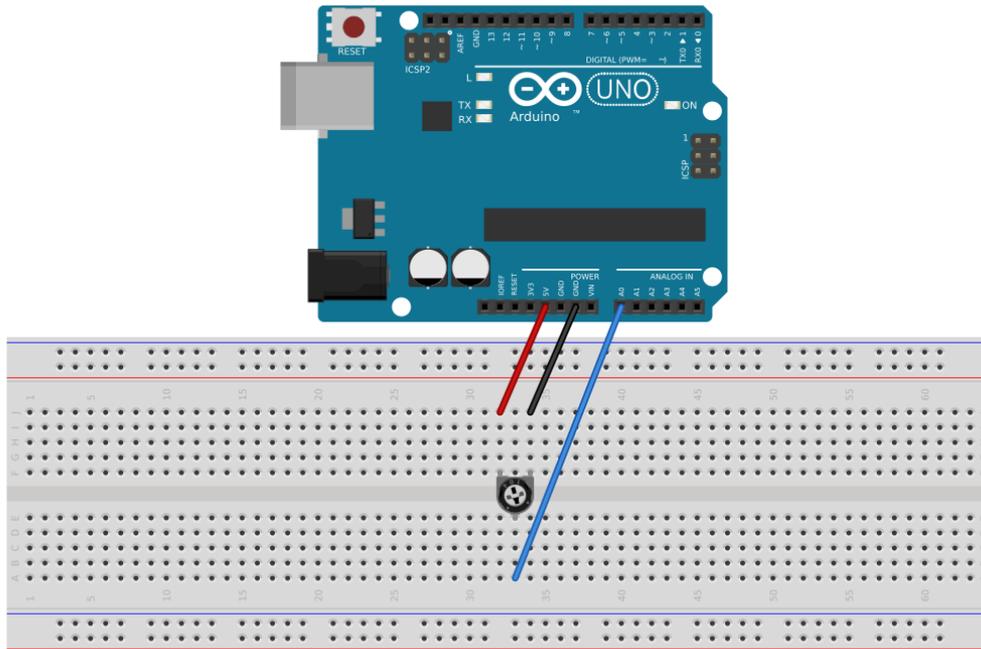
Ist der Arduino mittels eines USB-Kabels mit dem Computer verbunden, so können dort mittels des so genannten „Seriellen Monitors“ die Eingabe-Werte des Sensors zum jeweils aktuellen Zeitpunkt angezeigt werden.

Potentiometer als Analog-Sensor

Über das Menü `Datei -> Beispiele` kann man unter der Rubrik `01.Basics` ebenfalls ein Beispielprogramm für die Verwendung eines Potentiometers als Analog-Sensors abrufen. Das Beispiel „AnalogReadSerial“ hat folgenden Inhalt:

```
1  /*
2   AnalogReadSerial
3   Reads an analog input on pin 0, prints the result to the serial monitor.
4   Attach the center pin of a potentiometer to pin A0, and the outside pins
5   to +5V and ground.
6
7   This example code is in the public domain.
8  */
9
10 // the setup routine runs once when you press reset:
11 void setup() {
12     // initialize serial communication at 9600 bits per second:
13     Serial.begin(9600);
14 }
15
16 // the loop routine runs over and over again forever:
17 void loop() {
18     // read the input on analog pin 0:
19     int sensorValue = analogRead(A0);
20     // print out the value you read:
21     Serial.println(sensorValue);
22     delay(1);        // delay in between reads for stability
23 }
```

Die zugehörige Schaltung sieht etwa folgendermaßen aus:



Der Analog-Pin A0 ist in diesem Beispiel mit dem mittleren Anschluss eines Potentiometers (beispielsweise $10\text{ k}\Omega$) verbunden; die äußeren Anschlüsse des Potentiometers sind mit 5V beziehungsweise mit GND verbunden. Die Schaltung stellt somit wiederum einen *Spannungsteiler* dar, wobei das Verhältnis der Teilwiderstände R_1 und R_2 mittels des Potentiometers variiert werden können.

Arduino-Programmierung

Im folgenden Abschnitt wird die für das Programmieren eines Arduinos notwendige Syntax schrittweise, aber möglichst knapp vorgestellt.

Definition von Variablen

Variablen sind dafür da, um bestimmte Werte (Zahlen oder Zeichenketten) zu speichern und an einer oder mehreren anderen Stellen im Programm wieder abrufen zu können. Bei der Definition einer Variablen wie in Zeile 3 des obigen Programmbeispiels muss angegeben werden, welchen Datentyp die Variable speichern soll.

Typ	Bits/Bytes	Umfang	Beschreibung
<code>boolean</code>	1 Bit	0 bis 1	Falsch oder Wahr
<code>byte</code>	1 Byte	0 bis 255	Natürliche Zahl
<code>int</code>	2 Bytes	-32\,768 bis +32\,767	Ganze Zahl mit Vorzeichen
<code>unsigned int</code>	2 Bytes	0 bis 65\,535	Ganze Zahl ohne Vorzeichen
<code>float</code>	4 Bytes	-3.4028235E+38 bis +3.4028235E+38	Rationale Zahl
<code>double</code>	8 Bytes	10E-308 bis 10E+308	Rationale Zahl mit doppelter Genauigkeit
<code>char</code>	1 Byte	-128 bis 127	Ein einzelnes Zeichen (ASCII)

Im Unterschied zur Programmiersprache C können Variablen auch lokal, also innerhalb einer Funktion definiert werden; sie haben dann allerdings auch nur innerhalb dieser Funktion ihre Gültigkeit: Beispielsweise kann eine Variable, die innerhalb der `setup()`-Funktion definiert wurde, nicht innerhalb der `loop()`-Funktion verwendet werden. Erfolgt die Definition einer Variablen hingegen am Beginn der Datei (noch vor der `setup()`-Funktion), so kann diese in allen Programm-Teilen genutzt werden.

Ist der Datentyp einer Variablen (einmalig) festgelegt, so kann dieser mittels des Zuweisungs-Operators `=` ein neuer Wert zugewiesen werden.

Zeichenketten („Strings“) lassen sich als Listen („Arrays“) von `char`-Variablen abspeichern; die Syntax dafür lautet beispielsweise:

```
char string1[] = "Arduino";    // Definition einer konkreten Zeichenkette
char string2[50] ;            // Deklaration einer Zeichenkette
                               // (mit maximal 49 Zeichen)
```

Wird bei der Deklaration einer Zeichenkette die Länge mittels eines Zahlenwerts explizit angegeben, so muss beachtet werden, dass stets ein Zeichen weniger als angegeben genutzt werden kann, da jede Zeichenkette automatisch mit dem „String-Ende“-Zeichen `\0` beendet wird.

Mehrere Zahlen lassen sich ebenfalls in Form einer Liste speichern; die Syntax hierfür lautet beispielsweise:

```
int numbers[5] = {0, 5, 10, 15}; // Definition eines Zahlen-Arrays
```

In einem Zahlen-Array können maximal genauso viele Werte gespeichert werden, wie bei der Deklaration beziehungsweise Definition angegeben wurden.

Standard-Funktionen

Operatoren

Kontrollstrukturen

... to be continued ...

INO: Arduino aus einer Shell heraus ansteuern (optional)

Die Arduino-IDE ist zwar einfach zu bedienen; wer allerdings einen so komfortablen Editor wie `Vim` in Kombination mit dem `Vicle-Plugin` und `tmux` gewohnt ist, der wird auf seine gewohnte Umgebung kaum verzichten wollen.

Unter Linux müssen hierfür folgende Pakete installiert werden:

```
sudo aptitude install picocom python-setuptools  
  
sudo easy_install ino
```

Das Hauptprogramm, das die Kommunikation mit dem Arduino übernimmt, heißt `Ino`; momentan gibt es allerdings nur eine Variante für Python2. Hat man die obigen Pakete installiert, so kann man, wie im [Quickstart-Tutorial \(en.\)](#): ausführlich beschrieben, ein neues Projekt anlegen:

```
# Projekt-Ordner erstellen:  
mkdir arduino-projekte  
  
# In den Projekt-Ordner wechseln:  
cd arduino-projekte  
  
# Projekt initiieren:  
ino init -t blink
```

Durch die obigen Anweisungen wird im Projekt-Ordner ein `lib`-Verzeichnis für mögliche externe Programm-Bibliotheken sowie ein `src`-Verzeichnis für den eigentlichen Quellcode des Projekts angelegt. In diesem Verzeichnis wird durch den Aufruf von `ino init` automatisch die Datei `sketch.ino` neu angelegt; durch die optionale Angabe von `-t blink` enthält diese Datei ein minimales Beispielprogramm; bei einem Aufruf von `ino init` ohne weitere Argumente enthält diese Datei lediglich eine leere `setup()` und `loop()`-Funktion als Template.

Um ein Arduino-Programm (häufig auch „Sketch“ genannt) zu kompilieren, kann man im Projekt-Ordner folgendes eingeben:

```
# Projekt kompilieren:  
ino build
```

Wurde der Kompilierungs-Vorgang erfolgreich durchlaufen, so kann man das Programm anschließend auf den Arduino hochladen:

```
# Projekt auf Arduino hochladen:  
ino upload
```

Fertig! Wurde der oben optional gewählte Beispielcode `blink` nicht verändert, so beginnt die im Arduino am Pin 13 fest eingebaute LED zu blinken.

Möchte man ein anderes Arduino-Board als ein Arduino-UNO nutzen, so kann man die unterstützten Typen mittels `ino list-models` anzeigen und beispielsweise bei Verwendung eines Arduino Mega 2560 mittels `ino build -m mega2560` als Ziel festlegen; das gleiche gilt für die Einstellung einen anderen seriellen Ports, der beispielsweise mittels `ino upload -m mega2560 -p /dev/ttyACM1` festgelegt werden kann. Wie im [Quickstart-Tutorial](#) beschrieben, kann hierfür auch eine Konfigurations-Datei im Projektordner angelegt werden.

Weitere Hilfe zu Ino erhält man, indem man `ino --help` oder beispielsweise `ino build --help` für eine Beschreibung des Build-Subprogramms eingibt.

INO: Ausgabe des seriellen Monitors in einer Shell (optional)

Auch der so genannte „Serielle Monitor“ ist über die Shell erreichbar. Um dies zu testen, kann man hierfür das Beispiel-Programm in der Datei `src/sketch.ino` durch folgenden Code ersetzen:

```
void setup()  
{  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop()  
{  
  Serial.println(millis());  
  delay(1000);  
}
```

Ruft man wiederum `ino build` und `ino upload` auf, so kann man sich anschließend über folgenden Aufruf die Ausgabe des seriellen Monitors anzeigen lassen:

```
# Programm kompilieren und hochladen:  
ino build && ino init  
  
# Seriellen Monitor starten  
ino serial
```

Man bekommt mit dem obigen Beispielcode damit angezeigt, wie viele Millisekunden seit dem letzten Aufruf des seriellen Monitors vergangen sind. Der serielle Monitor kann durch die Tastenkombination `Ctrl a Ctrl x` wieder beendet werden.

... to be continued ...

Links

- [Arduino-Arbeitsheft für Schüler](#)
- [Arduino-Projekte \(Kreative Kiste\)](#)
- [Arduino-Tutorial von Frerk Popovic](#)

Experimente, Übungsaufgaben und Lösungen

Übungsaufgaben

Aufgaben zu elektronischen Bauteilen

Widerstände

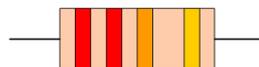
Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf den Abschnitt *Widerstände*.

- Der Widerstand in der unteren Abbildung hat vier Farbringe mit folgenden Farben aufgedruckt: Braun, schwarz, gelb, und goldfarben. Welchen Widerstandswert und welche Toleranz besitzt der Widerstand?



Lösung

- Welchen Widerstandswert besitzt der Widerstand in der folgenden Abbildung? Die Farbringe haben die Farben rot, rot, orange und goldfarben.



Lösung

- Ein Widerstand hat den Wert 332 Ohm. Welche Farbringe sind auf dem Widerstand mit Sicherheit aufgedruckt? Handelt es sich um einen Kohleschicht- oder einen Metallschicht-Widerstand?

Lösung

- Welchen Widerstandswert und welche Toleranz hat der Widerstand in der folgenden Abbildung? Die Farbringe haben die Farben braun, grün, schwarz, orange und violett.



Abb. 124: Farbringe-Beispiel 03.

Lösung

Kondensatoren

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf den Abschnitt *Kondensatoren*.

- (*) Welche Ladung hat ein auf $U = 9,0\text{ V}$ aufgeladener Kondensator mit einer Kapazität von $C = 100\ \mu\text{F}$? Welche Energiemenge ist in diesem Fall im Kondensator gespeichert?

Lösung

- (**) Ein zunächst vollständig entladener Kondensator mit einer Kapazität von $C = 470\ \mu\text{F}$ wird durch eine Spannungsquelle mit $U = 9,0\text{ V}$ über einen Widerstand $R = 10\ \text{k}\Omega$ geladen. Wie lange dauert es, bis sich im Kondensator eine Spannung von $U_1 = 3,0\text{ V}$ beziehungsweise $U_2 = 6,0\text{ V}$ aufgebaut hat?¹

Lösung

Transformatoren

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf den Abschnitt *Transformatoren*.

- An einen idealen Transformator, der eine (Primär-)Spule mit $n_1 = 300$ Windungen besitzt, wird eine Spannung von $U_1 = 230\text{ V}$ angelegt. Wie viele Windungen muss die zweite Spule haben, damit an ihr eine Spannung von $U_2 = 100\text{ V}$ abgegriffen werden kann?

Lösung

¹ Diese Aufgabe stammt aus Clifford Wolfs Skript, Seite 35.

- Ein Transformator hat zwei Spulen mit unterschiedlicher Windungszahl ($n_1 \neq n_2$). An welcher Seite liegt stets die höhere Spannung beziehungsweise niedrigere Spannung an?

Lösung

- In der Primärspule (Windungszahl $n_1 = 300$) eines idealen Transformators fließt eine Stromstärke von $I_1 = 2$ A. Wie hoch ist die Stromstärke in der Sekundärspule, wenn diese $n_2 = 1200$ Windungen besitzt?

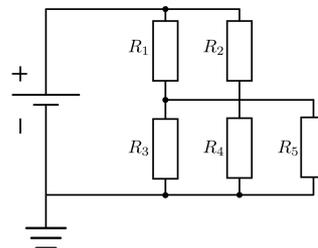
Lösung

Aufgaben zu elektronischen Schaltungen

Netzwerke und Netzwerk-Knoten

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf den Abschnitt *Netzwerke und Netzwerk-Knoten*.

- (*) Wie viele Netzwerk-Knoten gibt es in folgendem Schaltplan?¹



Lösung

Reihen- und Parallelschaltungen

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf den Abschnitt *Reihen- und Parallelschaltungen*.

Reihen- und Parallelschaltung von Stromquellen

- (*) Welche Spannung ergibt sich durch eine Reihenschaltung dreier 1,5 V-Batterien? Welche Spannung ergibt sich, wenn zwei 1,5 V-Batterien parallel zueinander geschaltet werden?

¹ Diese Aufgabe stammt aus Clifford Wolfs Skript, Seite 13.

Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen

- (**) Wie lässt sich das Gesetz $R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$ für die Reihenschaltung zweier Widerstände anhand des Ohmschen Gesetzes und der Kirchhoffschen Gesetze herleiten?

Tipp: Betrachte einen Schaltplan mit den beiden Reihen-Widerständen und beispielsweise einer Batterie als Spannungsquelle!

Lösung

- (*) Zwei Stromzweige werden parallel zueinander geschaltet; im ersten tritt eine Stromstärke von 1,8 A, im zweiten eine Stromstärke von 2,2 A auf. Wie groß ist die sich ergebende Gesamt-Stromstärke?

Lösung

- (*) In einem Stromkreis sind zwei Widerstände $R_1 = 100 \Omega$ und $R_2 = 50 \Omega$ in Reihe geschaltet. Welchen Gesamtwiderstand hat der Stromkreis? Welche Stromstärke fließt, wenn eine Stromquelle mit einer Spannung von 9 V angeschlossen wird? Welche Spannungen U_1 beziehungsweise U_2 ergeben sich an den beiden Widerständen?

Lösung

- (*) In einem Stromkreis sind zwei Widerstände $R_1 = 100 \Omega$ und $R_2 = 50 \Omega$ parallel zueinander geschaltet. Welcher Gesamtwiderstand ergibt sich in diesem Fall? Welche Stromstärken I_1 beziehungsweise I_2 fließen durch die einzelnen Widerstände, wenn die Spannung der Stromquelle eine 9 V beträgt?

Lösung

- (**) Welche Stromstärken und Spannungen treten in einem Stromkreis auf, der aus einer Parallelschaltung von drei Widerständen $R_1 = 100 \Omega$, $R_2 = 470 \Omega$ und $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ aufgebaut ist und an dem eine Spannung von $U = 9 \text{ V}$ anliegt? Welche Werte ergeben sich bei einer Reihenschaltung der drei Widerstände?

Lösung

- (**) In einem Stromkreis sind zwei Widerstände $R_1 = 470 \Omega$ und $R_2 = 220 \Omega$ parallel zueinander geschaltet; zusätzlich ist der Widerstand $R_3 = 560 \Omega$ in Reihe eingebaut. Welche Ströme beziehungsweise Spannungen ergeben sich an den einzelnen Widerständen, wenn eine Spannung von 9 V anliegt?

Lösung

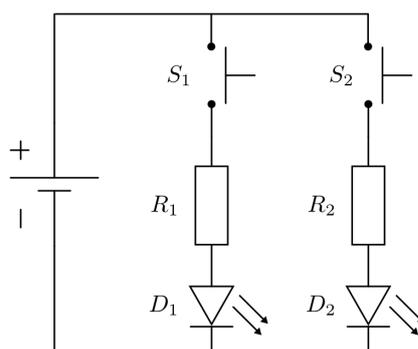
Grundschaltungen

Die folgenden Aufgaben beziehen sich auf den Abschnitt *Grundschaltungen*.

- (**) An einem Spannungsteiler, dessen zwei Teilwiderstände R_1 und R_2 über ein Potentiometer mit einem Widerstand von $R_{\text{ges}} = 1,0 \text{ k}\Omega$ eingestellt werden können, liegt eine Spannung von $U_{\text{ges}} = 9,0 \text{ V}$ an.
 - Auf welchen Wert muss der Widerstand R_2 eingestellt werden, damit die Spannung U_2 am unbelasteten Spannungsteiler $6,0 \text{ V}$ beträgt?
 - Welche prozentuale Veränderung von ergibt sich für U_2 , wenn der Spannungsteiler mit einem Verbraucherwiderstand von $R_V = 500 \Omega$ belastet wird?

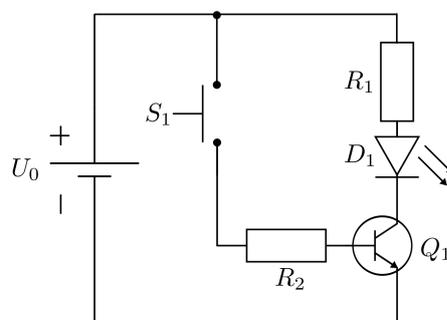
Lösung

- (*) Ist es möglich, den in der folgenden Abbildung dargestellten Stromkreis durch den Einbau einer Diode so zu verändern, dass durch Drücken des Tasters S_2 beide Leuchtdioden (D_1 und D_2) aufleuchten?



Lösung

- (**) In der folgenden Abbildung ist eine einfache *npn*-Transistor-Schaltung dargestellt. Wie lässt sich die gleiche Schaltung mit einem *pnp*-Transistor realisieren?



Lösung

Lösungen

Lösungen zu elektronischen Bauteilen

Widerstände

Die folgenden Lösungen beziehen sich auf die *Übungsaufgaben* zum Abschnitt *Widerstände*.

- Der erste Ring ist braun, somit ist die erste Ziffer des Widerstandswertes gleich 1. Der zweite Ring ist schwarz, somit ist die zweite Ziffer des Widerstandswertes gleich 0. Der dritte Ring ist gelb, somit sind vier Nullen an den Zahlenwert anzuhängen. Insgesamt ergibt sich somit ein Widerstandswert von $100\,000\ \Omega = 100\ \text{k}\Omega$.

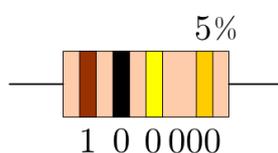


Abb. 125: Farbringe-Beispiel 01 (Lösung).

Der goldfarbene Ring am rechten Rand zeigt an, dass der Toleranzbereich bei 5% liegt. Der tatsächliche Wert des Widerstands liegt somit zwischen $95\ \text{k}\Omega$ und $105\ \text{k}\Omega$.

Zurück zur Aufgabe

- Die ersten beiden Ringe des Widerstands sind rot, somit haben die ersten beiden Ziffern des Widerstandswertes jeweils den Wert 2. Der dritte Ring ist orange, so dass an den Zahlenwert drei Nullen anzuhängen sind. Der Widerstand hat somit einen Wert von $22\,000\ \Omega = 22\ \text{k}\Omega$.

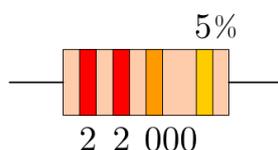


Abb. 126: Farbringe-Beispiel 02 (Lösung).

Zurück zur Aufgabe

- Der Zahlenwert 332 des Widerstands hat drei von Null verschiedene Ziffern; somit muss es sich um einen Metallschicht-Widerstand mit fünf Ringen handeln. Die ersten beiden Ziffern des Zahlenwertes sind jeweils 3; somit müssen die ersten beiden Farbringe orange sein. Die dritte Ziffer ist 2; somit muss der dritte Farbring rot sein. Es muss keine Null angehängt werden, somit ist der vierte Farbring schwarz.

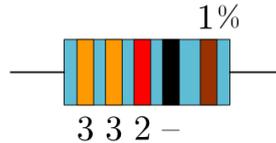


Abb. 127: Farbringe-Beispiel 03 (Lösung).

Der fünfte Farbring ist ohne Angabe eines Toleranzbereiches nicht festgelegt. (Metallschicht-Widerstände haben üblicherweise einen Toleranzbereich von 1% oder geringer.)

Zurück zur Aufgabe

- Der Widerstand hat fünf Ringe, somit geben die ersten drei Ziffern den Zahlenwert und die vierte Ziffer den Multiplikator bzw. die Anzahl an Nullen an.

Der erste Ring ist braun, somit ist die erste Ziffer des Widerstandswertes gleich 1. Der zweite Ring ist grün, somit ist die zweite Ziffer des Widerstandswertes gleich 3. Der dritte Ring ist schwarz, somit ist die dritte Ziffer des Widerstandswertes gleich 0. Der vierte Ring ist orange, somit sind drei Nullen an den Zahlenwert anzuhängen. Insgesamt ergibt sich somit ein Widerstandswert von $150\,000\ \Omega = 150\ \text{k}\Omega$.

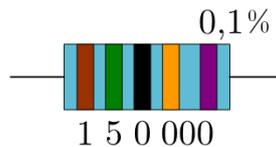


Abb. 128: Farbringe-Beispiel 04 (Lösung).

Der fünfte Ring ist violett, somit liegt der Toleranzbereich bei 0,1%. Der tatsächliche Wert des Widerstands liegt somit zwischen $95\ \text{k}\Omega$ und $105\ \text{k}\Omega$.

Zurück zur Aufgabe

Kondensatoren

Die folgenden Lösungen beziehen sich auf die *Übungsaufgaben* zum Abschnitt *Kondensatoren*.

- Für die im Kondensator gespeicherte Ladung Q gilt:

$$Q = C \cdot U = 100 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot 9,0 \text{ V} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

Die Einheit ergibt sich aus der Beziehung $F = \frac{Q}{V}$. Im Kondensator ist somit eine Ladung von knapp einem Mili-Coulomb gespeichert.

Für die gespeicherte Energiemenge E gilt:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot (9,0 \text{ V})^2 \approx 0,004 \text{ J}$$

Die Einheit ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$\text{F} \cdot \text{V}^2 = \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot \text{V}^2 = \text{C} \cdot \text{V} = \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V} = \text{W} \cdot \text{s} = \text{J}$$

Im Kondensator sind somit rund 4 mJ an Energie gespeichert.

Zurück zur Aufgabe

- Für den zeitlichen Spannungsverlauf während des Ladevorgangs gilt für Kondensatoren:

$$\begin{aligned} U_C &= U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \\ &= U - U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

Um die Gleichung zu lösen, müssen zunächst die Terme sortiert werden:

$$\begin{aligned} U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} &= U - U_C \\ e^{-\frac{t}{\tau}} &= \frac{U - U_C}{U} \end{aligned}$$

Nun können beide Seiten der Gleichung logarithmiert werden. Man erhält:

$$\begin{aligned} -\frac{t}{\tau} &= \ln\left(\frac{U - U_C}{U}\right) \\ \Rightarrow t &= -\ln\left(\frac{U - U_C}{U}\right) \cdot \tau \end{aligned}$$

Durch ein Einsetzen der Werte erhält man:

$$\begin{aligned} t(U_C = 3 \text{ V}) &= -\ln\left(\frac{(9,0 - 3,0) \text{ V}}{9,0 \text{ V}}\right) \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega \cdot 470 \cdot 10^{-6} \text{ F} \approx 1,9 \text{ s} \\ t(U_C = 6 \text{ V}) &= -\ln\left(\frac{(9,0 - 6,0) \text{ V}}{9,0 \text{ V}}\right) \cdot 10 \cdot 10^3 \Omega \cdot 470 \cdot 10^{-6} \text{ F} \approx 5,2 \text{ s} \end{aligned}$$

Das negative Vorzeichen hebt sich durch die Multiplikation mit dem Logarithmus auf, da das Argument des Logarithmus kleiner als Eins ist und der Logarithmus somit als Ergebnis einen negativen Wert liefert.

Die Einheit ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$\Omega \cdot \text{F} = \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{Q}}{\text{V}} = \frac{\text{Q}}{\text{A}} = \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \text{s}$$

Es dauert also rund 1,9 s, bis der Kondensator auf 3 V und 5,2 s, bis der Kondensator auf 6 V geladen ist.

Man kann nach dieser Rechenmethode somit auch indirekt bestimmen, wie lange der Kondensator für den Ladevorgang von 3 V bis 6 V benötigt, nämlich $(5, 2 - 1, 9) \text{ s} \approx 3, 3 \text{ s}$.

Zurück zur Aufgabe

Transformatoren

Die folgenden Lösungen beziehen sich auf die *Übungsaufgaben* zum Abschnitt *Transformatoren*.

- Um die Windungszahl der Sekundärspule zu bestimmen, löst man die Transformator-Gleichung nach n_2 auf:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \Leftrightarrow n_2 = \frac{n_1 \cdot U_2}{U_1}$$

Eingesetzt ergibt sich mit $n_1 = 300$, $U_1 = 230 \text{ V}$ und $U_2 = 100 \text{ V}$:

$$n_2 = \frac{n_1 \cdot U_2}{U_1} = \frac{300 \cdot 100 \text{ V}}{230 \text{ V}} \approx 130$$

Die Sekundärspule muss somit $n_2 = 130$ Windungen besitzen.

Zurück zur Aufgabe

- Die Windungszahlen stehen nach der Transformator-Gleichung $\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}$ im gleichen Verhältnis wie die anliegenden Spannungen. An der Spule mit der höheren Anzahl an Windungen liegt daher auch stets die höhere Spannung, an der Spule mit der geringeren Anzahl an Windungen die niedrigere Spannung an.

Zurück zur Aufgabe

- Um die Stromstärke in der Sekundärspule zu bestimmen, löst man die Transformator-Gleichung nach I_2 auf:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \Leftrightarrow I_2 = \frac{n_1 \cdot I_1}{n_2}$$

Eingesetzt ergibt sich mit $n_1 = 300$, $n_2 = 1200$ und $I_1 = 2 \text{ A}$:

$$I_2 = \frac{n_1 \cdot I_1}{n_2} = \frac{300 \cdot 2 \text{ A}}{1200} = 0, 5 \text{ A}$$

Die Stromstärke in der Sekundärspule des Transformators beträgt somit $I_2 = 0, 5 \text{ A}$.

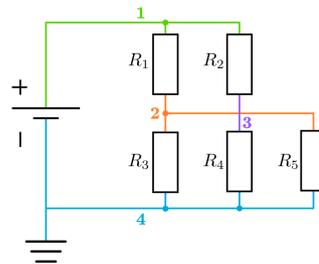
Zurück zur Aufgabe

Lösungen zu elektronischen Schaltungen

Netzwerke und Netzwerk-Knoten

Die folgenden Lösungen beziehen sich auf die *Übungsaufgaben* zum Abschnitt *Netzwerke und Netzwerk-Knoten*.

- In dem Schaltplan gibt es insgesamt vier Netzwerk-Knoten:



Hinweis: Jeder Knoten entspricht einer unmittelbaren leitenden Verbindung zu einem anderen Bauteil (oder gegebenenfalls mehreren anderen Bauteilen).

Zurück zur Aufgabe

Reihen- und Parallelschaltungen

Die folgenden Lösungen beziehen sich auf die *Übungsaufgaben* zum Abschnitt *Reihen- und Parallelschaltungen*.

Reihen- und Parallelschaltungen von Stromquellen

- Bei einer Reihenschaltung von n Stromquellen addieren sich die Werte der Spannungen U_1, U_2, \dots, U_n zu einer Gesamtspannung U_{ges} . Wenn drei Batterien mit einer Spannung von je $1,5\text{ V}$ in Reihe geschaltet werden, ergibt sich somit folgende Gesamt-Spannung:

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + U_3 = 1,5\text{ V} + 1,5\text{ V} + 1,5\text{ V} = 4,5\text{ V}$$

Bei einer Parallelschaltung von (gleichartigen) Stromquellen ist die Gesamtspannung gleich der Spannung einer einzelnen Stromquelle.¹ Eine Parallelschaltung zweier $1,5\text{ V}$ -Batterien liefert somit eine Gesamt-Spannung von ebenfalls $1,5\text{ V}$.

Zurück zur Aufgabe

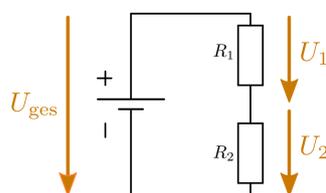
¹ Durch eine Parallelschaltung mehrerer Batterien oder Akkus kann allerdings deren gespeicherte Energiemenge und damit die „Haltbarkeit“ der Stromquelle vergrößert werden.

Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen

- Bei einer Reihenschaltung von Widerständen treten keine Verzweigungen auf; in jeden Netzwerk-Knoten fließt somit gleich viel Strom hinein, wie aus ihm auch wieder hinausfließt. Es gilt somit $I = \text{konst}$ an allen Stellen in der Schaltung.

Eine Reihenschaltung bildet zudem gemeinsam mit der Spannungsquelle eine Masche. Innerhalb dieser Masche ergeben alle Spannungen in Summe Null. Nach dem Ohmschen Gesetz gilt:

$$\begin{aligned}U_1 &= R_1 \cdot I \\U_2 &= R_2 \cdot I \\U_{\text{ges}} &= R_{\text{ges}} \cdot I\end{aligned}$$



Aus der *Maschenregel* ergibt sich:

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

Setzt man die aus dem Ohmschen Gesetz resultierenden Ausdrücke in diese Gleichung ein, so erhält man:

$$\begin{aligned}R_{\text{ges}} \cdot I &= R_1 \cdot I + R_2 \cdot I \\ \Rightarrow R_{\text{ges}} &= R_1 + R_2 \quad \checkmark\end{aligned}$$

Die Formel $R_{\text{ges}} = R_1 + R_2$ für die Reihenschaltung zweier Widerstände folgt somit unmittelbar aus dem Ohmschen Gesetz sowie der Kirchhoffschen Maschenregel.

Zurück zur Aufgabe

- In einer Parallelschaltung ist die Gesamt-Stromstärke I_{ges} gleich der Summe der (Teil-)Stromstärken I_1, I_2, \dots, I_n . Betragen die Stromstärken I_1 und I_2 in zwei Stromzweigen 1,8 A bzw. 2,2 A, so ergibt sich damit folgende Gesamt-Stromstärke:

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 = 1,8 \text{ A} + 2,2 \text{ A} = 4,0 \text{ A}$$

Die Gesamt-Stromstärke beträgt somit $I_{\text{ges}} = 4,0 \text{ A}$.

Zurück zur Aufgabe

- Bei einer Reihenschaltung ist der Gesamtwiderstand R_{ges} gleich der Summe der einzelnen Widerstandswerte; für eine Reihenschaltung zweier Widerstände $R_1 = 100 \Omega$ und $R_2 = 50 \Omega$ gilt somit:

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 = 100 \Omega + 50 \Omega = 150 \Omega$$

Durch Einsetzen des Werts der anliegenden Spannung $U_{\text{ges}} = 9 \text{ V}$ und des Gesamtwiderstandes $R_{\text{Ges}} = 150 \Omega$ in das Ohmsche Gesetz $U_{\text{ges}} = R_{\text{ges}} \cdot I$ folgt damit für die fließende Stromstärke I :

$$U_{\text{ges}} = R_{\text{ges}} \cdot I \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}}$$

$$I = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}} = \frac{9 \text{ V}}{150 \Omega} = 0,06 \text{ A} = 60 \text{ mA}$$

Die Stromstärke beträgt somit $I = 60 \text{ mA}$ (an allen Stellen der Reihenschaltung). Wiederum mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes können damit die beiden Teilspannungen $U_1 = R_1 \cdot I$ und $U_2 = R_2 \cdot I$ an den beiden Widerständen berechnet werden:

$$U_1 = R_1 \cdot I = 100 \Omega \cdot 0,06 \text{ A} = 6 \text{ V}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 50 \Omega \cdot 0,06 \text{ A} = 3 \text{ V}$$

Die beiden Teilspannungen U_1 und U_2 betragen somit 6 V bzw. 3 V . In der Summe ergeben sie die Gesamtspannung $U_{\text{ges}} = 9 \text{ V}$, zueinander stehen sie im gleichen Verhältnis wie die Werte R_1 und R_2 der Widerstände ($\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{2}{1}$).

Zurück zur Aufgabe

- Bei einer Parallelschaltung ist der Kehrwert des Gesamtwiderstands $\frac{1}{R_{\text{ges}}}$ gleich der Summe der Kehrwerte der einzelnen Widerstandswerte; für eine Reihenschaltung zweier Widerstände $R_1 = 100 \Omega$ und $R_2 = 50 \Omega$ gilt somit:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{100 \Omega} + \frac{1}{50 \Omega} = \frac{3}{100} \frac{1}{\Omega}$$

$$\Rightarrow R_{\text{ges}} = \frac{100}{3} \Omega \approx 33,3 \Omega$$

Durch Einsetzen des Werts der anliegenden Spannung $U = 9 \text{ V}$ und des Gesamtwiderstandes $R_{\text{Ges}} = 33,3 \Omega$ in das Ohmsche Gesetz $U = R \cdot I$ folgt damit für die im unverzweigten Teil fließende Stromstärke I_{ges} :

$$U = R_{\text{ges}} \cdot I_{\text{ges}} \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U}{R_{\text{ges}}}$$

$$I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{9 \text{ V}}{33,3 \Omega} = 0,27 \text{ A} = 270 \text{ mA}$$

Die Stromstärke beträgt im unverzweigten Teil der Schaltung somit $I = 270 \text{ mA}$.

Zurück zur Aufgabe

-
- Bei einer Parallelschaltung lässt sich der Kehrwert des Gesamtwiderstands $\frac{1}{R_{\text{ges}}}$ als Summe der Kehrwerte der einzelnen Widerstandswerte berechnen:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{100 \Omega} + \frac{1}{470 \Omega} + \frac{1}{1000 \Omega} \approx 0,013 \frac{1}{\Omega}$$
$$\Rightarrow R_{\text{ges}} \approx 76,2 \Omega$$

Die Spannung $U = 9 \text{ V}$ bleibt an allen Stellen der Parallelschaltung unverändert. Die Gesamt-Stromstärke I_{ges} sowie die Stromstärken I_1, I_2, I_3 durch die Widerstände R_1, R_2, R_3 lassen sich mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes berechnen:

$$I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{9 \text{ V}}{76,2 \Omega} = 0,12 \text{ A}$$
$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{9 \text{ V}}{100 \Omega} = 0,09 \text{ A}$$
$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{9 \text{ V}}{470 \Omega} = 0,02 \text{ A}$$
$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{9 \text{ V}}{1000 \Omega} = 0,01 \text{ A}$$

Bei einer Reihenschaltung lässt sich der Gesamtwiderstand R_{ges} als Summe der einzelnen Widerstandswerte berechnen:

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R_3 = 100 \Omega + 470 \Omega + 1000 \Omega = 1570 \Omega$$

Durch Einsetzen der anliegenden Spannung $U_{\text{ges}} = 9 \text{ V}$ und des Gesamtwiderstands $R_{\text{ges}} = 1570 \Omega$ in das Ohmsche Gesetz folgt:

$$U_{\text{ges}} = R_{\text{ges}} \cdot I \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}}$$
$$I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_{\text{ges}}} = \frac{9 \text{ V}}{1570 \Omega} \approx 0,0057 \text{ A} = 5,7 \text{ mA}$$

Auch die an den einzelnen Widerständen anliegenden Spannungen lassen sich mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes berechnen, wenn für die Stromstärke $I = I_{\text{ges}} \approx 0,0057 \text{ A}$ eingesetzt wird:

$$U_1 = R_1 \cdot I \approx 100 \Omega \cdot 0,0057 \text{ A} \approx 0,6 \text{ V}$$
$$U_2 = R_2 \cdot I \approx 470 \Omega \cdot 0,0057 \text{ A} = 2,7 \text{ V}$$
$$U_3 = R_3 \cdot I \approx 1000 \Omega \cdot 0,0057 \text{ A} = 5,7 \text{ V}$$

Die Summe der drei Teilspannungen entspricht (von Rundungsfehlern abgesehen) wieder der Gesamtspannung ($U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + U_3 = 9 \text{ V}$).

Zurück zur Aufgabe

- Die Parallelschaltung der beiden Widerstände $R_1 = 470 \Omega$ und $R_2 = 220 \Omega$ wirkt nach außen wie ein einzelner „Ersatzwiderstand“ R_{Ers} mit folgendem Wert:

$$\frac{1}{R_{\text{Ers}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{470 \Omega} + \frac{1}{220 \Omega} \approx 0,0067 \frac{1}{\Omega}$$

$$\Rightarrow R_{\text{Ers}} \approx 150 \Omega$$

Der gesamte Stromkreis kann damit als eine Reihenschaltung des Ersatzwiderstands $R_{\text{Ers}} \approx 150 \Omega$ und des Widerstands $R_3 = 560 \Omega$ aufgefasst werden. Für den Gesamtwiderstand R_{ges} folgt:

$$R_{\text{ges}} = R_{\text{Ers}} + R_3 \approx 150 \Omega + 560 \Omega = 710 \Omega$$

Mit dem Ohmschen Gesetz lässt sich in Folge die Stromstärke I_{ges} im unverzweigten Teil des Stromkreises ($U_{\text{ges}} = 9 \text{ V}$, $R_{\text{ges}} \approx 710 \Omega$) bestimmen:

$$U = R_{\text{ges}} \cdot I_{\text{ges}} \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U}{R_{\text{ges}}}$$

$$I_{\text{ges}} = \frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}} \approx \frac{9 \text{ V}}{710 \Omega} \approx 0,013 \text{ A} = 13 \text{ mA}$$

Mit $I = I_{\text{ges}} \approx 0,013 \text{ A}$ lassen sich die an den Widerständen R_{Ers} und R_3 anliegenden Spannungen U_{Ers} bzw. U_3 bestimmen:

$$U_{\text{Ers}} = R_{\text{Ers}} \cdot I \approx 150 \Omega \cdot 0,013 \text{ A} \approx 1,9 \text{ V}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I \approx 560 \Omega \cdot 0,013 \text{ A} \approx 7,1 \text{ V}$$

Die Spannung $U_{\text{Ers}} \approx 1,9 \text{ V}$ liegt an beiden parallelen Widerständen R_1 und R_2 an. Für die Stromstärken I_1 und I_2 in diesen beiden Stromzweigen ergibt sich somit:

$$I_1 = \frac{U_{\text{Ers}}}{R_1} \approx \frac{1,9 \text{ V}}{470 \Omega} \approx 0,004 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_{\text{Ers}}}{R_2} \approx \frac{1,9 \text{ V}}{220 \Omega} \approx 0,009 \text{ A}$$

Die Summe der beiden Stromstärken ist wiederum gleich der Stromstärke I_{ges} im unverzweigten Stromkreis.

Zurück zur Aufgabe

Grundsaltungen

Die folgenden Lösungen beziehen sich auf die *Übungsaufgaben* zum Abschnitt *Grundsaltungen*.

- Für den unbelasteten Spannungsteiler gilt:

$$\frac{R_2}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_2}{U_{\text{ges}}} \iff R_2 = \frac{U_2}{U_{\text{ges}}} \cdot R_{\text{ges}} = \frac{6,0 \text{ V}}{9,0 \text{ V}} \cdot 1,0 \text{ k}\Omega \approx 667 \Omega$$

Für R_1 ergibt sich folglich $R_1 = R_{\text{ges}} - R_2 \approx 333 \Omega$. Wird parallel zum Widerstand R_2 der Widerstand $R_V = 500 \Omega$ geschaltet, so erhält man als Ersatz-Widerstand R_2^* :

$$R_2^* = \frac{R_2 \cdot R_V}{R_2 + R_V} = \frac{667 \Omega \cdot 500 \Omega}{667 \Omega + 500 \Omega} \approx 286 \Omega$$

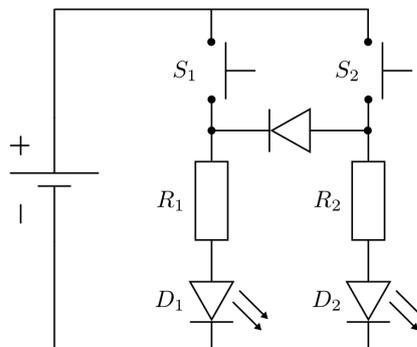
Damit ergibt sich als neue Spannung U_2^* des belasteten Spannungsteilers:

$$U_2^* = \frac{R_2^*}{R_1 + R_2^*} \cdot U_{\text{ges}} = \frac{286 \Omega}{333 \Omega + 286 \Omega} \cdot 9,0 \text{ V} \approx 4,15 \text{ V}$$

Die Spannung fällt durch den hinzugeschalteten Verbraucher somit auf 4,15 V ab; dies entspricht nur noch 69,2% der Spannung am unbelasteten Spannungsteiler. Die Spannung ist durch das Hinzuschalten des Verbrauchers folglich um rund 30,8% gesunken.

Zurück zur Aufgabe

- Baut man die Diode, wie in der folgenden Abbildung dargestellt, zwischen den Taster S_2 und Widerstand R_1 ein, so können die Leuchtdiode D_1 und D_2 durch Betätigung von S_2 eingeschaltet werden.

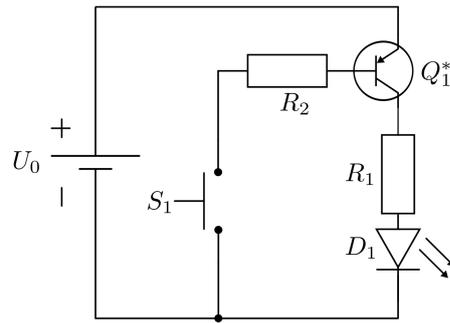


In der umgekehrten Richtung sperrt die Diode, so dass der Taster S_1 zwar die Leuchtdiode D_1 , jedoch nicht D_2 aktivieren kann.

Zurück zur Aufgabe

- Bei einem *pnp*-Transistor fließen die Ströme genau umgekehrt. Der Kollektor-Anschluss muss somit mit GND, der Verbraucher (LED mit Vorwiderstand) muss entsprechend mit dem Kollektor verbunden werden. Schließlich muss der Basis-Anschluss nicht mit dem Plus-, sondern mit dem Minus-Pol der Batterie (GND) verbunden werden.

Insgesamt erhält man somit folgendes Schaltbild:



Wer die Schaltung nachbauen möchte, kann beispielsweise bei einer Batteriespannung von $U_0 = 9\text{ V}$ als Bauteilwerte $R_1 = 470\ \Omega$ und $R_2 = 1\text{ k}\Omega$ wählen. Als *npn*-Transistor kann beispielsweise ein BC547, als entsprechender *pnp*-Transistor ein BC557 gewählt werden.

Zurück zur Aufgabe

Links

Elektronik-Anleitungen

Die folgenden Seiten bieten gute Einsteiger-Tutorials und/oder Pläne zum Nachbau eigener Schaltungen:

- Die Elektronikerseite
- Elektronik-Fibel
- Electronicsplanet
- Elektronikbasteln
- Elektronik-Ecke
- Ferromel Elektronik
- Loetstelle
- Elektroniktutor
- Electronicsplanet
- JugendTechnikSchule
- Kreative Kiste
- Elexs Grundlagen und Experimente

Elektronik-Bücher

- Grundlagen der Elektronik (Stefan Goßner)

Datenblätter

- All Datasheets (de.)
- Datasheet-Catalog (de.)

Elektronik-Programme

Obwohl Elektronik sehr weit verbreitet ist, gibt es nur wenige frei nutzbare Programme zum Simulieren von elektronischen Schaltungen am Computer. Die besten Erfahrungen habe ich bislang mit folgenden beiden Programmen gemacht:

- **Fritzing**: Dieses an der Fachhochschule Potsdam entwickelte Open-Source-Programm ermöglicht es, erprobte Schaltungen auf einem virtuellen Steckbrett (Breadboard) nachzubauen und dabei einen entsprechenden Schaltplan bzw. ein passendes Platinen-Layout zu erhalten. Für letzteres gibt es eine optimierende „Auto-Routing“-Funktion, die fertig entwickelbare Platinen-Layouts liefert (ähnlich wie das bekannte Freeware-Programm *Eagle*).
- **Qucs**. („Quite Universal Circuit Simulator) ist ein freies Programm zum Simulieren von Schaltkreisen; auf dieses Programm wird im Abschnitt *Qucs* näher eingegangen.
- **LT-Spice**: Dieses Programm ist zwar nicht Open Source, aber immerhin als Freeware frei nutzbar; unter Linux läuft es mittels *Wine* ohne Probleme. Als Simulations-Werkzeug ermöglicht LTSpice es, ohne Lernaufwand innerhalb kürzester Zeit Schaltpläne nachzubilden und auftretende Spannungen bzw. Stromstärken zu simulieren; der zeitliche Verlauf an beliebigen Stellen des Schaltplans wird in Diagramm-Form (wie bei einem Oszilloskop) angezeigt.
- Eine weitere kostenlose, aber nicht quellfreie Webbrowser-Applikation gibt es unter <http://www.partsim.com/>.
- Für die Programmiersprache *Python3* gibt es ebenfalls ein Simulations-Modul namens *PySpice*; dieses ist allerdings noch im Aufbau (es gibt beispielsweise noch keine Bedienoberfläche).

Videos: Allgemeine Elektronik

- [Elektronik-Live-Kurs von Clifford Wolf](#)
- [Video-Reihe von PyroElectro 1 \(en.\)](#)
- [Video-Reihe Technik von „Educational Videos and Lectures“](#)

Videos: Analog-Elektronik

- [Video-Reihe von PyroElectro 2 \(en.\)](#)

Videos: Digital-Elektronik

- [Video-Reihe von PyroElectro 3 \(en.\)](#)
- [Video-Reihe von Derek Molloy \(en.\)](#)
- [Video-Reihe 8-Bit-Steckbrett-Computer von Ben Eater](#)

Videos: Mikro-Controller

- Video-Reihe von PyroElectro 4 (en.)

Videos und Projekte: Arduino

- Arduino-Projekte von Alexander Hinkel
- Arduino-Projekte von Robert Jänisch
- Arduino Projektseite „101“ (en.)

Elektronik-Shops

Wer selbst elektronische Schaltungen ausprobieren möchte, findet bei folgenden Online-Shops eine reichliche Auswahl an Bauteilen:

- CSD
- Pollin
- Reichelt
- Conrad
- ELV

Arduino-Zubehör

Folgende Shops haben sich auf Open Hardware, Arduinos und allgemein Maker-Artikel spezialisiert:

- Madtronics
- Komputer Open Source Hardware
- Exp-Tech Maker Shop
- Elmicro Shop

Messleitungen, Stecker und Buchsen:

- Elektronische Bauteile und Lichtsysteme (Firma Schnepf)

Stichwortverzeichnis

A

Anode, 29
Arduino, 102
 Pin-Belegung, 103
 Software (IDE), 105
Außenwiderstand, 6

D

Darlington-Schaltung, 74
Diode, 29
 Leuchtdiode (LED), 31
 Photodiode, 32
Dreieck-Stern-Umwandlung, 59

E

Elektrolyt-Kondensator, 26
Elektronik, 1
Elektronische Bauteile, 1
Emitter (Transistor), 34

F

Fritzing (Software), 133

G

Glühbirne, 21
Ground, 10

I

Innenwiderstand, 6

K

Kathode, 29
Kippschaltung, 77
 astabil, 79
 bistabil, 77
 monostabil, 80
Kirchhoffsche Regeln, 58
 Knotenregel, 52
 Maschenregel, 53
Klemmenspannung, 7
Knotenregel, 52

Kollektor (Transistor), 34
Kondensator, 21
 Elektrolytkondensator, 26
 Trimmkondensator, 26

L

Lastwiderstand, 6
Leerlaufspannung, 7
Leuchtdiode (LED), 31
LT-Spice (Simulations-Software), 133

M

Maschenregel, 53
Masse, 10

N

Netz-Liste, 51
Netzwerk, 51
Netzwerk-Knoten, 51
NTC-Widerstand, 18

P

Parallelschaltung, 53
 von Kondensatoren, 59
 von Stromquellen, 57
 von Widerständen, 55
Photodiode, 32
Potentiometer, 20
PTC-Widerstand, 18
Pulsweiten-Modulation (PWM), 103

Q

QUCS (Simulations-Software), 88

R

Reihenschaltung, 53
 von Kondensatoren, 58
 von Stromquellen, 56
 von Widerständen, 54
Relais, 14

S

Schalter, 12

Spannungsmessung, 63

Spannungsteiler, 67

 belastet, 69

 unbelastet, 67

Stern-Dreieck-Umwandlung, 59

Strommessung, 64

Stromquelle, 1

T

Taster, 12

Transformator, 44

Transistor, 34

 Emitterschaltung, 75

 nnp, 34

 pnp, 36

Trimmwiderstand, 20

W

Wheatstonesche Messbrücke, 66

Widerstand, 14

 Fotowiderstand, 18

 Potentiometer, 20

 Trimmwiderstand, 20

Widerstandsmessung, 65

Z

Z-Diode, 33

Zener-Diode, 33