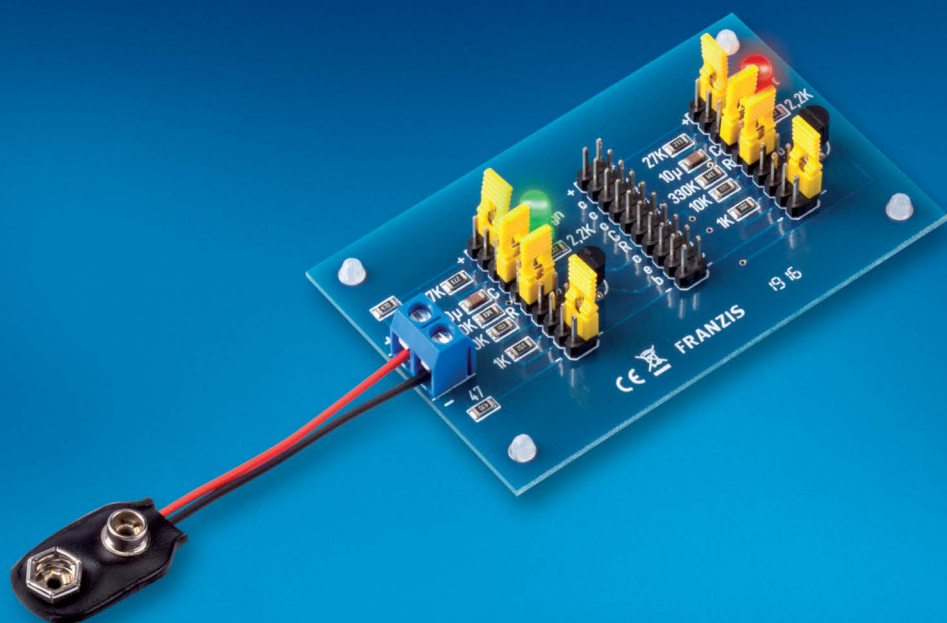


Das Franzis Lernpaket

Grundsaltungen der Elektronik



FRANZIS

Grundsaltungen der Elektronik

Das Franzis Handbuch

Grundsaltungen der Elektronik

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch vorgestellten Schaltungen und Programme wurden mit der größtmöglichen Sorgfalt entwickelt, geprüft und getestet. Trotzdem können Fehler im Buch und in der Software nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor haften in Fällen des Vorsatzes oder der groben Fahrlässigkeit nach den gesetzlichen Bestimmungen. Im Übrigen haften Verlag und Autor nur nach dem Produkthaftungsgesetz wegen der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit oder wegen der schulhaften Verletzung wesentlicher Vertragspflichten. Der Schadensersatzanspruch für die Verletzung wesentlicher Vertragspflichten ist auf den vertragstypischen, vorhersehbaren Schaden begrenzt, soweit nicht ein Fall der zwingenden Haftung nach dem Produkthaftungsgesetz gegeben ist.

Liebe Kunden!

Dieses Produkt wurde in Übereinstimmung mit den geltenden europäischen Richtlinien hergestellt und trägt daher das CE-Zeichen. Der bestimmungsgemäße Gebrauch ist in der beiliegenden Anleitung beschrieben.



Bei jeder anderen Nutzung oder Veränderung des Produktes sind allein Sie für die Einhaltung der geltenden Regeln verantwortlich. Bauen Sie die Schaltungen deshalb genau so auf, wie es in der Anleitung beschrieben wird. Das Produkt darf nur zusammen mit dieser Anleitung weitergegeben werden.

Das Symbol der durchkreuzten Mülltonne bedeutet, dass dieses Produkt getrennt vom Hausmüll als Elektroschrott dem Recycling zugeführt werden muss. Wo Sie die nächstgelegene kostenlose Annahmestelle finden, sagt Ihnen Ihre kommunale Verwaltung.



Autor: Burkhard Kainka

© 2016 Franzis Verlag GmbH, Richard-Reitzner-Allee 2, 85540 Haar

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Das Erstellen und Verbreiten von Kopien auf Papier, auf Datenträgern oder im Internet, insbesondere als PDF, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags gestattet und wird widrigenfalls strafrechtlich verfolgt.

Die meisten Produktbezeichnungen von Hard- und Software sowie Firmennamen und Firmenlogos, die in diesem Werk genannt werden, sind in der Regel gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen und sollten als solche betrachtet werden. Der Verlag folgt bei den Produktbezeichnungen im Wesentlichen den Schreibweisen der Hersteller.

VORWORT

Elektronik kann man lernen wie Rechnen, Schreiben und Lesen, wenn man nur die Gelegenheit bekommt, sich ausführlich damit zu beschäftigen. Am einfachsten geht dies mit einem kleinen Elektronik-Baukasten. Die Bauteile sind auf eine Platine gelötet und können nicht verloren gehen, nur die Verbindungen müssen noch gesteckt werden – und schon hat man eine fertige Schaltung, ein funktionierendes Gerät.

Die Platine hat drei Stiftleisten mit jeweils 2 x 10 Kontaktstiften. Auf die Stifte setzt man kleine Kontaktbrücken, die sich leicht wieder entfernen lassen. Man nennt sie auch „Jumper“, weil sie schnell und einfach hin und her „springen“ können. Nach einigen Versuchen kennt man das System in- und auswendig und kann blitzschnell neue Schaltungen aufbauen und eigene Ideen ausprobieren. Das geht viel schneller als mit dem LötKolben oder mit einer Steckplatine. Und die Bauteile können nicht verloren gehen. Nur ein kleiner Vorrat an Jumpern muss immer in Reichweite liegen.

Die Bauteile wurden so angeordnet, dass allein mit den Steckbrücken mehr als 50 sinnvolle Versuche aufgebaut werden können. Und wahrscheinlich findet man noch viel mehr. Die wichtigsten Bauteile sind vorhanden: Leuchtdioden (LEDs), Widerstände, Kondensatoren und Transistoren. Wer diese Bauteile kennt und genau verstanden hat, kann auch eigene Ideen umsetzen und neue Schaltungen entwickeln. Dabei geht der Aufbau wesentlich schneller als bei anderen Systemen. Und das Wichtigste ist, dass man niemals die Bauteile zusammensuchen muss.

Das Handbuch zeigt jeweils das Schaltbild und ein Aufbaubild mit allen Steckverbindungen. Wer nur mal ganz schnell etwas nachbauen möchte, kann sich an die Aufbaubilder halten, damit hat man den schnellsten Erfolg. Fehler sind fast unmöglich.

Wer tiefer einsteigen will, schaut sich auch die Schaltbilder genau an. Das Handbuch gibt zu jeder Schaltung detaillierte Erklärungen. Und oft kann man auch Variationen ausprobieren, um das Verhalten einer Schaltung zu ändern. Es geht darum, die Bauteile und die Schaltungen immer besser zu verstehen, sodass man das Verhalten einer Schaltung möglichst genau voraussagen kann.

Das Handbuch beschreibt auch die nötige Messtechnik und zeigt Messergebnisse für viele Versuche. Wer ein Multimeter zur Hand hat, sollte die Messungen an der eigenen Schaltung wiederholen. Das schärft den Blick für das Verhalten der Bauteile. Nur so bekommt man ein Gefühl für Bauteiltoleranzen und mögliche Abweichungen in einer Schaltung. Außerdem kann man nur mit Messungen die theoretischen Überlegungen und Berechnungen überprüfen. Mit genügend Übung wird man dann auf einen Blick erkennen, wie eine Schaltung funktioniert.

Nach einigen Versuchen kennt jeder die Platine so genau, dass er sogar ohne eine Zeichnung Schaltungen umsetzen oder neu entwickeln kann. Das eröffnet ganz neue Möglichkeiten für kleine Experimente an beliebigen Orten. Man kann in der Sonne sitzen, sich eine Schaltung ausdenken, und sie mal eben ausprobieren. Ein paar zusätzliche Jumper sollte man dazu immer bereithalten. Sie stecken beispielsweise auf einer Parkposition auf den unteren und oberen Kontakten für die Spannungsversorgung. Oder man kann spielerische Wettkämpfe austragen. Statt Karten oder Würfeln liegt die Platine auf dem Tisch. Dann deckt man sich eine kreative Aufgabe aus. Wer findet am schnellsten die beste Lösung?

Viel Erfolg beim Experimentieren!

Burkhard Kainka

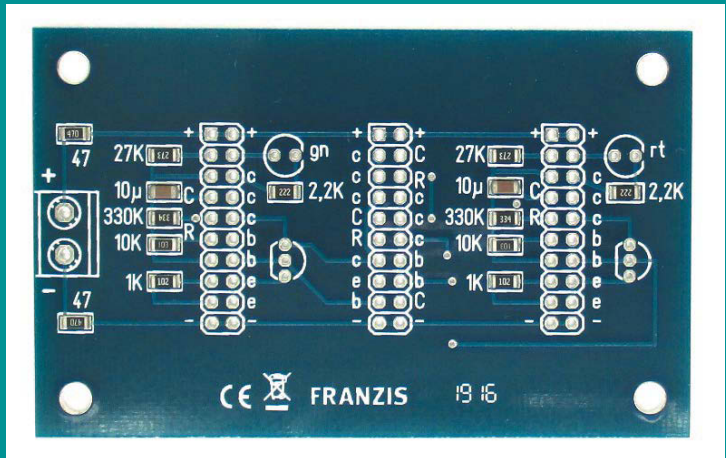
Weiterführende Versuche, Hinweise zu möglichen Problemen und Erfahrungen anderer Leser sowie häufig gestellte Fragen und Antworten zu diesem Experimentierpaket findet man auf meiner Homepage:

www.b-kainka.de

INHALT

1	Vorbereitungen und Zusammenbau.....	10
1.1	Bauteile	10
1.2	Lötarbeiten.....	11
1.3	Überblick	13
2	Leuchtdioden und Widerstände	18
2.1	LED im Stromkreis	18
2.2	Rot und Grün.....	22
2.3	Mehr Widerstand	24
2.4	Farbumschalter	29
3	Transistoren und Verstärker.....	34
3.1	Transistor-Schalter.....	34
3.2	Voll eingeschaltet?	36
3.3	Mehr Verstärkung.....	38
3.4	Alarmanlage	39
3.5	Gekoppelte Schalter	42
3.6	Alarmanlage mit Bereitschaftsanzeige.....	43
4	Kondensatoren und Zeitschalter.....	46
4.1	Laden und entladen	46
4.2	Energie sammeln.....	50
4.3	Verstärkter Blitz	52
4.4	Der Blitz-Merker.....	54
4.5	Nachlaufsteuerung	56
4.6	Langsame Entladung.....	58
5	Verstärker und Sensoren.....	64
5.1	Der Berührungssensor	64
5.2	Der Elektrofeldsensor	66
5.3	Der Lichtsensor	68
5.4	Ausschalten bei Berührung	70
6	Arbeitspunkt und Stabilisierung	74
6.1	Gegenkopplung	74
6.2	Arbeitspunkt-Stabilisierung.....	76
6.3	Arbeitspunkt-Anpassung	78
6.4	Temperaturkompensation.....	79
6.5	Konstantstromquelle	81

7	Dimmer und Zeitsteuerung	84
7.1	Gutenacht-Licht	84
7.2	Ende-Abschaltung	87
7.3	Kino-Lichtsteuerung	88
7.4	Touch-Dimmer	90
7.5	Abend-Licht	92
7.6	Verzögerter Berührungsschalter	94
8	Stromsiegel und Temperatursensoren	98
8.1	Einstellung der LED-Helligkeit	98
8.2	Temperaturabhängigkeiten	100
8.3	Mehr Strom	101
8.4	Weniger Strom	102
8.5	Temperatur und Verlustleistung	103
8.6	Lampenstrom-Überwachung	105
9	Dioden und Sperrschichten	108
9.1	Die BE-Diode in Durchlassrichtung	108
9.2	Die BC-Diode leitet	111
9.3	Die BC-Diode in Sperrrichtung	112
9.4	Die BE-Diode in Sperrrichtung	114
9.5	Batterieprüfer	115
9.6	Transistor invertiert	118
10	Flipflops und Blinker	122
10.1	RS-Flipflop	122
10.2	Rot/Grün-Flipflop	124
10.3	Langsamer Blinker	126
10.4	Schneller Blinker	127
10.5	Wechselblinker	129
10.6	Start/Stop-Blinker	131
10.7	Langsamer Wechselblinker	134
10.8	Unsymmetrischer Wechselblinker	136
10.9	Der Bye-Bye-Blinker	137
	Anhang	140



Zusätzlich gibt es ein vierfaches Kabel mit Steckbuchsen an beiden Enden, das auch in Einzelkabel aufgetrennt werden kann. Es dient für weiterführende Experimente, als Übergang zu anderen Elektronik-Baugruppen und zum Anschluss von Messgeräten.

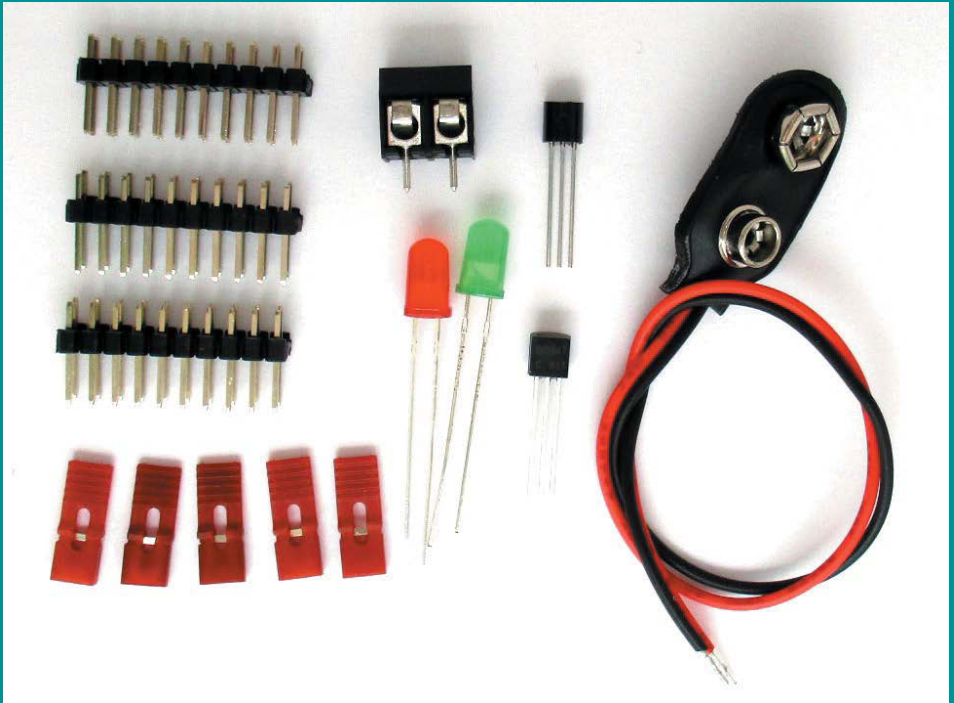


Abb. 1.2: Zusätzliche Bauteile

1.2 | Lötarbeiten

Bevor es richtig losgeht mit dem Experimentieren, muss gelötet werden. Man beginnt am besten mit den drei Pfostensteckleisten mit jeweils 2 x 10 Kontakten. Wenn man sie in die Platine einsetzt, kann danach alles umgedreht und auf eine flache Oberfläche gelegt werden, damit nichts mehr verwickelt. Dann können alle 60 Kontakte nacheinander angelötet werden.

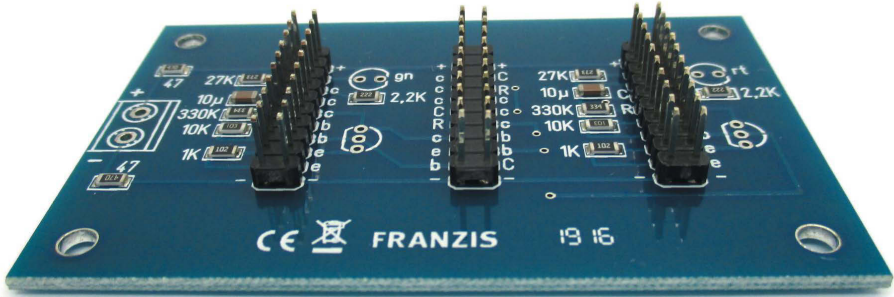


Abb. 1.3: Eingebaute Pfostenstecker

Das ist zugleich eine gute Lötübung, falls man noch nicht so fit im Löten ist. Jede Lötstelle muss richtig heiß werden, damit das Lötzinn tief in die Bohrung fließt und den Kontaktstift völlig umhüllt. Man darf aber auch nicht zu lange löten, damit nicht der letzte Rest des Flussmittels verdampft. Eine gute Lötstelle erkennt man daran, dass sich das Lötzinn rund an die verbunden Bauteile schmiegt und eine glatte Oberfläche hat. Falls es am Anfang noch nicht so gut klappt und immer besser wird, kann man die ersten Lötstellen problemlos noch einmal mit etwas frischem Lötzinn nachlöten.

Nun folgen die beiden Transistoren. Sie sollen so tief in die Lötlöcher gesteckt werden, dass oberhalb der Platine nur noch ein etwa 5 mm langes Drahtstück frei bleibt. Nach dem Löten müssen unten die überstehenden Drahtenden abgeschnitten werden. Achtung: Die Transistoren kann man auch falsch herum einbauen! Wie es richtig ist, zeigt der Bestückungsaufdruck der Platine. Die flache Seite weist zur zugehörigen Kontaktreihe.

Danach kommen die LEDs an die Reihe. Die Anoden sind die längeren Anschlussdrähte und weisen zur Kontaktreihe. Die Kathoden liegen am kürzeren Anschluss und sind zusätzlich durch eine flache Stelle am Gehäuse gekennzeichnet, die man auch auf dem Bestückungsaufdruck sieht. Wichtig sind auch die Farben. Die grüne LED wird links eingebaut, also auf der Seite mit dem Batterieanschluss. Rechts soll die rote LED eingesetzt werden. Beide LEDs sollen direkt auf der Platine sitzen, also vor dem Löten ganz eingesteckt werden, sodass nach dem Anlöten lange Drähte abgeschnitten werden müssen.

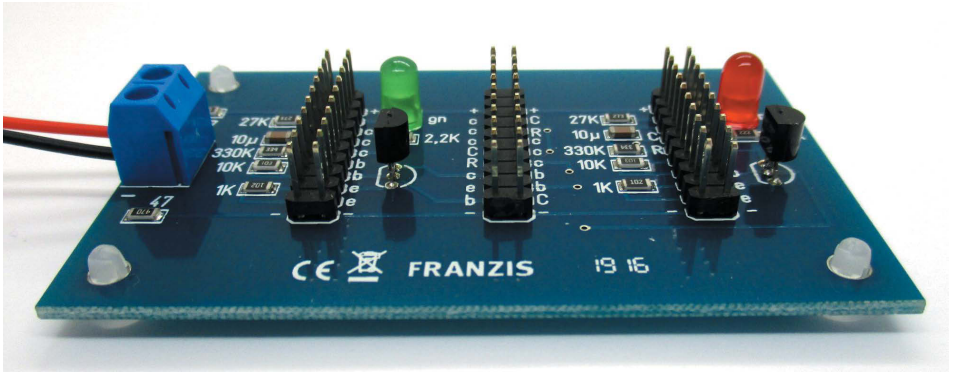


Abb. 1.4: Die fertig aufgebaute Experimentierplatine

Als Letztes kommt die Schraubklemme für den Batterieanschluss. Hier kann der Batterieclip angeschraubt werden. Das rote Kabel ist der Pluspol, das schwarze der Minuspol. Es hat sich bewährt, das abisolierte und verzinnte Kabelende nach hinten umzuknicken und das Kabelende zusammen mit der Isolierung in der Klemme anzuschrauben. Damit erhält man eine langlebige Verbindung und vermeidet einen Kabelbruch, der sonst nach häufigem Biegen des Batteriekabels droht.

Am Ende kann die Platine mit den vier beiliegenden Gummifüßen versehen werden. Dann sollten noch einmal alle Lötunkte sorgfältig überprüft werden. Jetzt darf der Lötcolben kalt werden. Alle weiteren Experimente kommen mit Steckverbindungen aus.

1.3 | Überblick

Die Anordnung der Bauteile auf der Platine ist bei allen Versuchen gleich. Einige Verbindungen sind schon vorhanden, und die Bauteile sind so platziert, dass man mit möglichst wenigen Brücken sinnvolle Schaltungen bauen kann. Außerdem sind Fehler, bei denen ein Bauteil kaputt gehen könnte, fast völlig unmöglich. Man braucht also keine Angst zu haben beim Ausprobieren. Die LEDs haben bereits einen integrierten Vorwiderstand und können nicht überlastet werden.

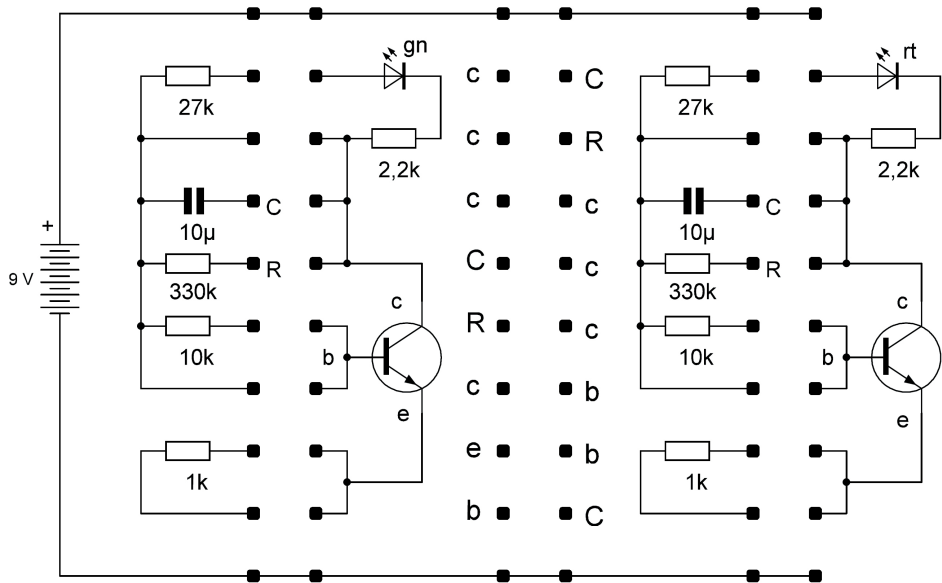


Abb. 1.5:
Zwei gleiche
Schaltungsblöcke

Außerdem gibt es zwei zusätzliche Widerstände von 47 Ohm in den beiden Zuleitungen zur Batterie. Falls doch einmal versehentlich ein Kurzschluss erzeugt wird, begrenzen sie den Strom auf 100 mA, sodass nichts Schlimmes passieren kann. Auch die Transistoren überstehen 100 mA ohne Schaden. Bei allen normalen Versuchen stören die Schutzwiderstände nicht. Sie erhöhen nur den Innenwiderstand der Batterie, wie es auch bei schon teilweise verbrauchten Batterien zu beobachten ist. In den Schaltplänen tauchen diese Schutzwiderstände nicht auf, denn sie spielen für die normale Funktion der Schaltungen keine Rolle.

Es gibt zwei gleiche Blöcke von Bauteilen, jeweils mit 20-poliger Stiftleiste, einem Transistor und einer LED. Deshalb kann man den Aufbau schnell durchschauen und hat schon nach kurzer Zeit keine Probleme mehr, eine Schaltung „freihändig“ aufzubauen. Jeder Block könnte eine eigene Schaltung werden, die völlig unabhängig vom anderen Block funktioniert. Aber wenn kompliziertere Schaltungen gebaut werden sollen, müssen Verbindungen zwischen den Blöcken hergestellt werden. Dazu dient die mittlere Stiftleiste. Allen Blöcken gemeinsam ist, dass die unteren beiden Stifte am Minuspol der Batterie liegen, die oberen beiden am Pluspol.

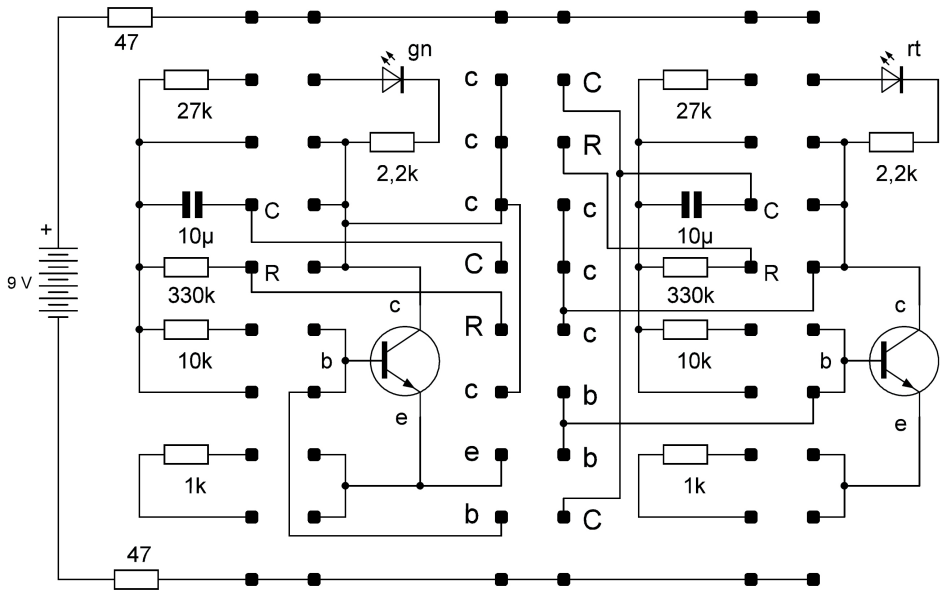


Abbildung 1.6 zeigt den Plan mit allen Verbindungen. Das mag kompliziert aussehen, ist aber nach kurzer Zeit schon leicht durchschaubar. Beim Aufbauen hilft auch die Beschriftung auf der Platine. Und man kann sich den Plan im Anhang dieses Handbuchs ausschneiden oder kopieren und immer zusammen mit den Steckbrücken aufheben. Die zusätzlichen Verbindungsleitungen werden meist nicht benötigt, können aber wertvolle Dienste leisten, wenn man besondere Verbindungen in einer Schaltung testen, Verbindungen zu anderen Experimenten herstellen oder Messgeräte für umfangreiche Messreihen anschließen möchte.

Abb. 1.6: Verbindungen zur mittleren Kontaktleiste

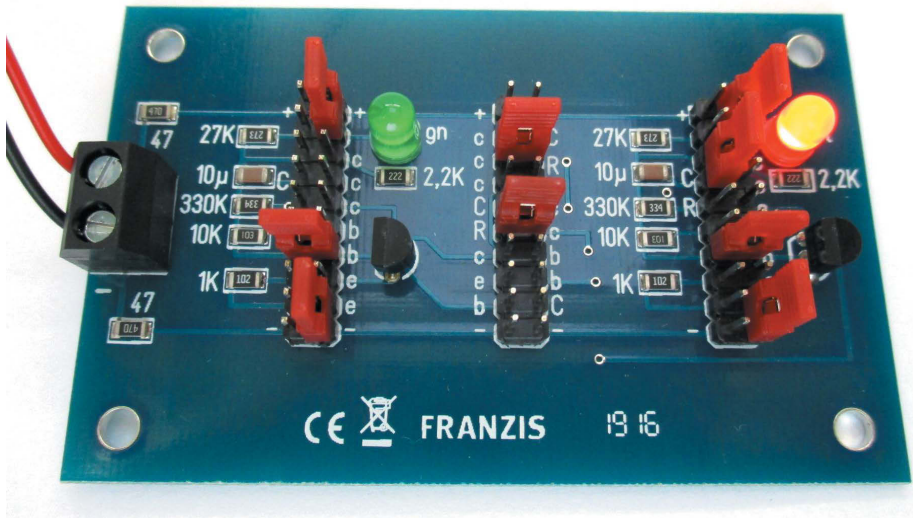


Abb. 1.7: Ein aufgebauter Versuch

2 LEUCHTDIODEN UND WIDERSTÄNDE

Der Elektronik-Baukasten enthält eine grüne und eine rote Leuchtdiode (LED). Eine LED sollte nie direkt an eine Batterie angeschlossen werden, denn dann könnte sie überlastet werden und kaputt gehen. Man braucht immer einen Vorwiderstand, der für eine Begrenzung des Stroms sorgt. Hier sind jedoch die passenden Widerstände von $2,2\text{ k}\Omega$ schon eingebaut, man hat also immer schon eine LED mit einem Vorwiderstand.

2.1 | LED im Stromkreis

Also los! Als Erstes soll einmal die grüne LED zum Leuchten gebracht werden. Das Schaltbild zeigt einen geschlossenen Stromkreis mit Batterie, LED und Widerstand. Man nennt diese Schaltung auch Reihenschaltung, weil alle Bauteile in einer Reihe nacheinander angeordnet sind.

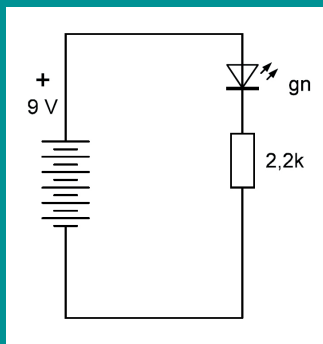
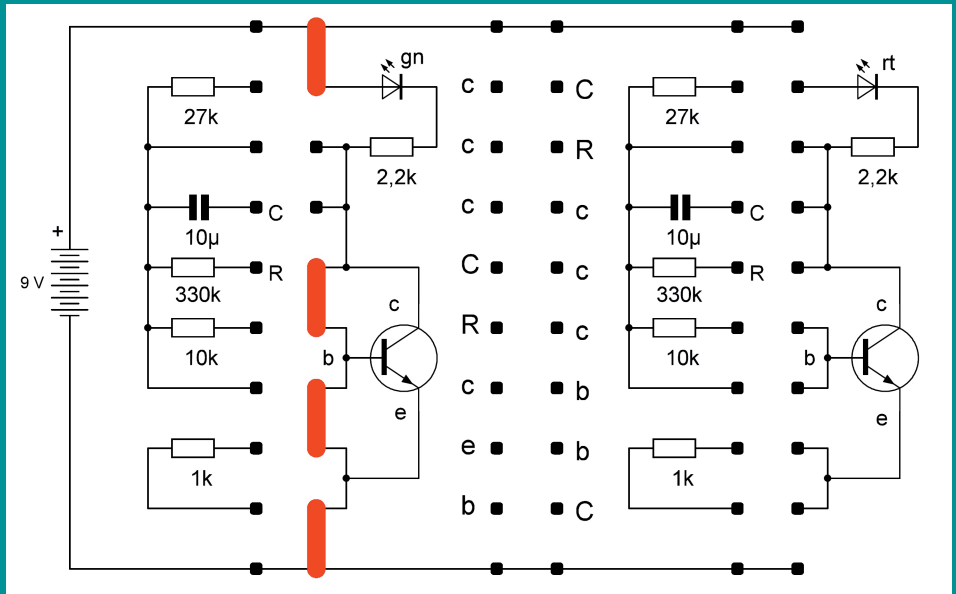


Abb. 2.1:
Ein Stromkreis
mit LED

Damit der Stromkreis auch im wirklichen Experiment geschlossen ist, braucht man insgesamt vier Kontaktbrücken (Jumper). Eigentlich versperrt nämlich der Transistor mit seinen drei Anschlüssen den Weg. Er leitet den Strom nicht. Deshalb sorgen erst die zusätzlichen Brücken

dafür, dass wirklich Strom fließen kann. Sie sind hier als dicke rote Verbindungen eingezeichnet.



Mit diesen vier Brücken funktioniert es. Die grüne LED leuchtet. Alle Bauteile, die entweder überhaupt nicht oder nur mit einem Beinchen angeschlossen sind oder durch Jumper kurzgeschlossen werden, sind sozusagen gar nicht da. Das ist so ähnlich wie beim fünften Rad am Wagen: Es fährt zwar mit, hat aber keine Funktion. In diesem Fall ist der Transistor durch zwei Jumper ganz außer Funktion gesetzt.

Abb. 2.2: Die nötigen Kontaktbrücken

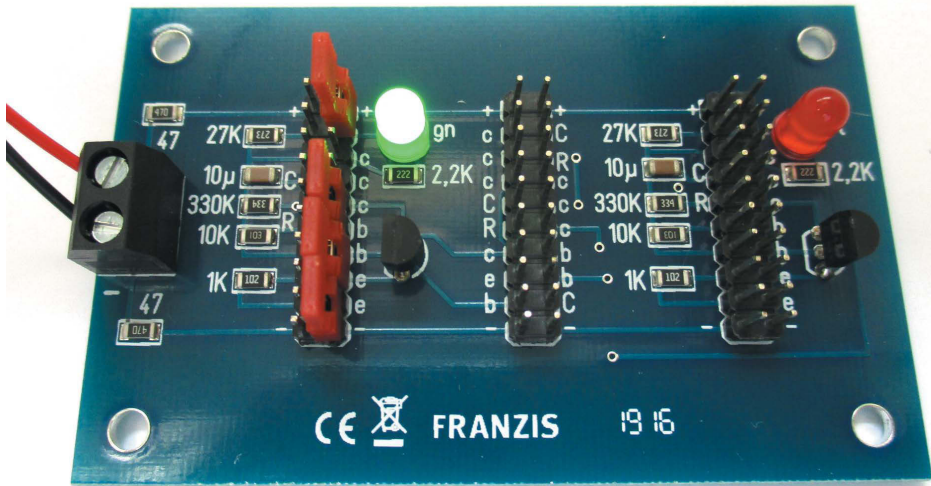


Abb. 2.3: Ein erfolgreich aufgebauter Versuch

Was wird wohl passieren, wenn man einzelne Brücken entfernt? In den meisten Fällen wird der Stromkreis dann unterbrochen und die LED geht aus. Nur bei der zweiten Brücke von unten ist das anders. Wenn man sie entfernt, bleibt die LED an. Das hat etwas mit der Funktion des Transistors zu tun und wird erst später ganz genau untersucht.

Eine Diode leitet den Strom nur in einer Richtung. Strom fließt von der Anode zur Kathode. An der Anode muss also der Pluspol angeschlossen werden. Anders herum funktioniert es nicht. Die Diode verhält sich in „Sperr-Richtung“ wie ein Isolator, sie versperrt dem Strom den Weg. Bei diesem einfachen Versuch kann man das ausprobieren, indem man einfach die Batterie vom Kabel trennt und falsch herum an den Batterieclip hält. Die LED bleibt dann aus. Sobald man die Batterie wieder umdreht, fließt der Strom wieder. Achtung: Das darf man nicht mit jedem Gerät so machen. Viele Schaltungen gehen bei einer Falschpolung der Spannungsquelle kaputt. Für eine LED ist es kein Problem.

Messungen

Wer ein geeignetes Multimeter besitzt, sollte es möglichst oft einsetzen, um die aufgebauten Schaltungen ganz genau zu untersuchen. Meist werden Spannungen gemessen. Eine Spannung herrscht zwischen zwei Punkten einer Schaltung, also z. B. zwischen den Anschlüssen der Batterie, zwischen beiden Drähten der LED oder zwischen beiden Anschlüssen

des Widerstands. Bei einer Spannungsmessung hält man die Messkabel an die beiden Messpunkte.

Typische Messergebnisse:

Spannung der Batterie: 9,0 V

Spannung an der LED: 2,7 V

Spannung am Vorwiderstand: 6,3 V

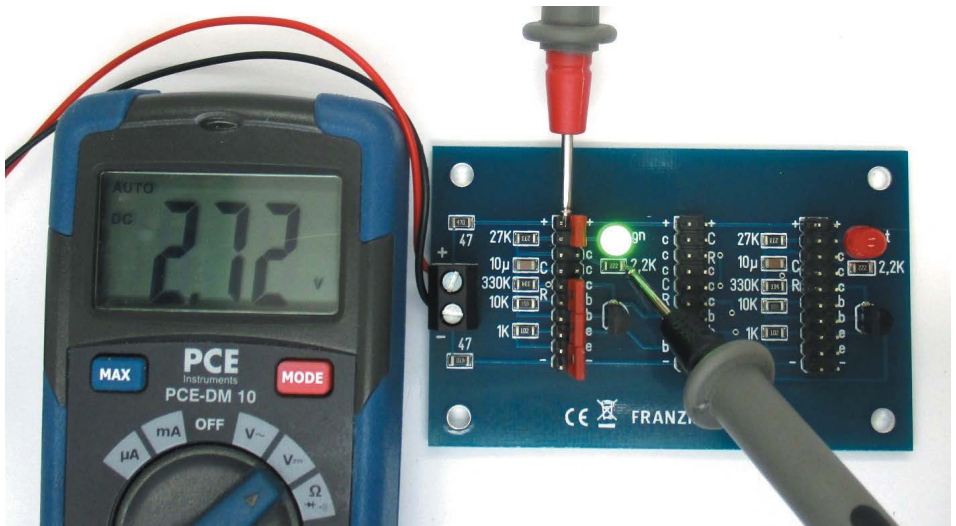


Abb. 2.4:
Spannungsmessung an der LED

Eine Rechnung ergibt: $2,7 \text{ V} + 6,3 \text{ V} = 9 \text{ V}$. Das kann kein Zufall sein, dahinter steckt ein physikalisches Gesetz: In einer Reihenschaltung addieren sich die Spannungsabfälle an den einzelnen Verbrauchern zur Gesamtspannung.

Mit den Messwerten lässt sich der Strom in der Schaltung berechnen:

Stromstärke = Spannung / Widerstand

$$I = U / R$$

$$I = 6,3 \text{ V} / 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$I = 2,9 \text{ mA}$$

Die Ergebnisse können je nach Zustand der Batterie etwas abweichen. Eine ganz neue Alkali-Blockbatterie hat mehr als 9 V. Gemessen wurden zum Beispiel 9,4 V. Aber es gibt auch noch Spannungsabfälle an den

2

Schutzwiderständen zur Batterie, sodass die Spannung auf der Platine bei rund 9 V liegen kann.

2.2 | Rot und Grün

Eine Batterie schafft mehr als nur eine LED. Also kann man einen zweiten Stromkreis schließen und auch die rote LED leuchten lassen. Auch der zweite Stromkreis besteht aus einer Reihenschaltung mit LED und Widerstand. Aber zusammen hat man eine Parallelschaltung. Wenn man eine LED zusammen mit ihrem Widerstand als einen Verbraucher oder eine Lampe betrachtet, liegen beide parallel. Die Parallelschaltung wird auch als „verzweigter Stromkreis“ bezeichnet, denn der Strom der Batterie verzweigt sich auf zwei Verbraucher (in diesem Fall LEDs mit ihren Vorwiderständen).

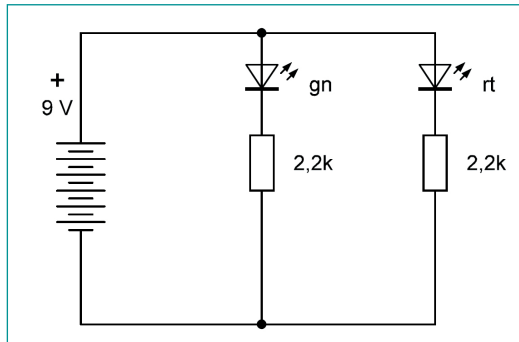


Abb. 2.5: Parallelschaltung

Auch im rechten Teil des Aufbaus werden vier Brücken gebraucht. Da braucht man eigentlich schon keinen Aufbauplan mehr, denn es ist ja klar, dass die Jumper auf der rechten Seite genau so gesteckt werden müssen wie auf der linken.

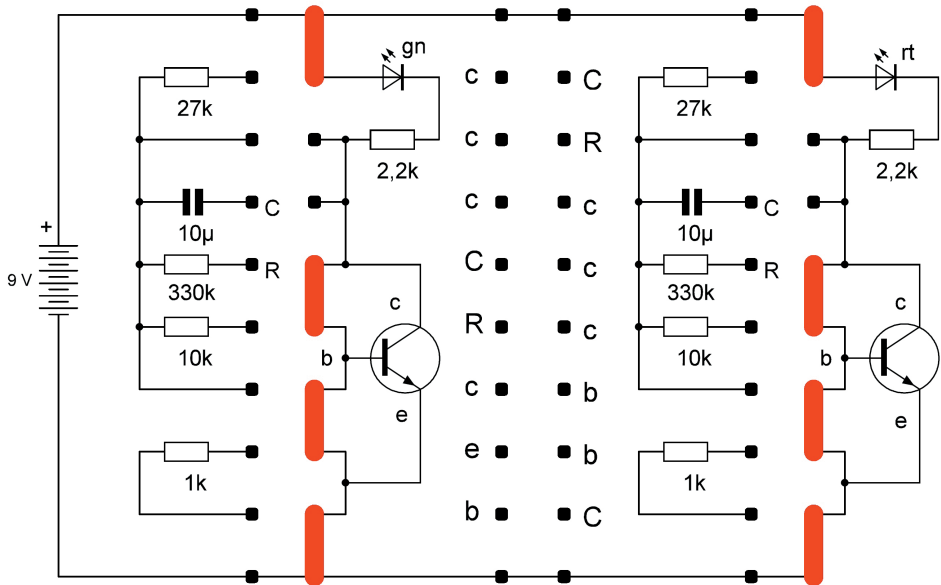


Abb. 2.6: Leuchte mit zwei LEDs

Nun leuchten beide LEDs. Damit hat man eine brauchbare kleine Leuchte gebaut, die man auch einmal im Dunkeln testen sollte. Meist reicht das Licht sogar zum Lesen. Man darf aber nicht vergessen, die Lampe am Ende wieder auszuschalten, denn sonst wird die Batterie unnötig belastet und schneller unbrauchbar. Zum Ausschalten muss man zwei Brücken entfernen. Am besten verwendet man dazu immer die oberen Brücken an der Plus-Leitung. Denn dann sieht man es auf einen Blick: Die Batterie ist abgeschaltet.

An der roten LED findet man eine etwas kleinere Spannung als an der grünen LED, nämlich nur etwa 1,8 V. Am Widerstand liegt dafür eine etwas größere Spannung von 7,2 V, wenn die Versorgungsspannung genau 9 V beträgt. Bei diesem Versuch fließt aber insgesamt ein relativ großer Strom von 6 mA, sodass ein Spannungsabfall von insgesamt 0,6 V an den beiden Schutzwiderständen der Schaltung entsteht. Mit einer ganz neuen Alkali-Batterie mit der Anschlussspannung 9,4 V wurde deshalb eine Betriebsspannung von 8,8 V gemessen.

Messung

2

2.3 | Mehr Widerstand

Widerstand ist die Eigenschaft eines elektrischen Verbrauchers, die dafür sorgt, dass der Strom geringer wird. Ein Draht hat fast keinen Widerstand. Wenn man einen Stromkreis nur aus einer Batterie und einem Draht schließt, hat man einen Kurzschluss gebaut. Es fließt dann sehr viel Strom, der Draht könnte heiß werden oder die Batterie explodieren, in jedem Fall aber wird die Batterie sehr schnell unbrauchbar. Mit den Schutzwiderständen auf der Platine wird es nicht ganz so schlimm, aber die Batterie würde immer noch zu schnell verbraucht. Die Widerstände an den LEDs sorgen dagegen bei einer korrekten Schaltung dafür, dass nur wenig Strom fließt, oder gerade so viel, wie man braucht.

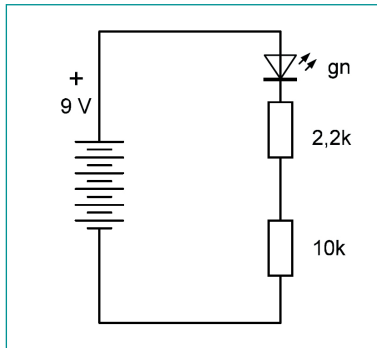


Abb. 2.7: Ein zusätzlicher Vorwiderstand

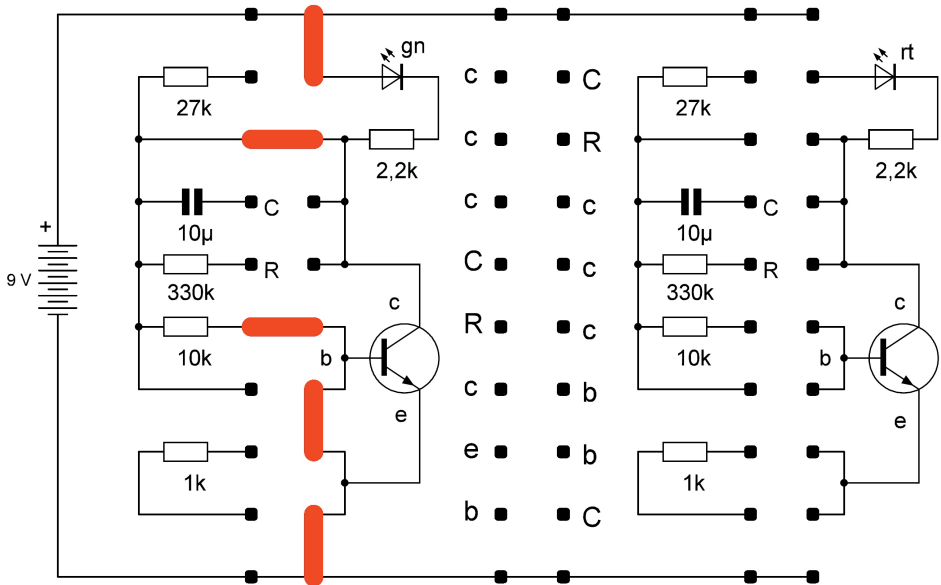


Abb. 2.8: Mehr Widerstand und weniger Helligkeit

Um noch mehr Strom zu sparen, soll nun eine Reihenschaltung mit der LED und ihrem Vorwiderstand von $2,2\text{ k}\Omega$ und einem zusätzlichen Widerstand von $10\text{ k}\Omega$ gebaut werden. Insgesamt hat man dann einen Widerstand von $12,2\text{ k}\Omega$ in der Schaltung, also etwa fünfmal mehr als vorher. Der Strom durch die LED wird also ungefähr fünfmal kleiner, und auch das Licht wird wesentlich schwächer. Aber es ist immer noch gut zu sehen. Der Transistor hat übrigens in dieser Schaltung keinen Einfluss, weil die Verbindung b–e ihn völlig anschaltet. Das wird bei späteren Experimenten mit Transistoren noch eine wichtige Rolle spielen.

Spannung an der LED: $2,6\text{ V}$

Spannung am Widerstand $2,2\text{ k}\Omega$: $1,2\text{ V}$

Spannung am Widerstand $10\text{ k}\Omega$: $5,2\text{ V}$

Wichtige Erkenntnis: Obwohl der LED-Strom nun wesentlich kleiner ist, hat sich die LED-Spannung nur geringfügig verändert, nämlich von $2,7\text{ V}$ auf $2,6\text{ V}$. Zwischen den grünen LEDs gibt es übrigens erhebliche Unterschiede. Während der hier verwendete Typ mit grün-blauer Farbe

Messung

2

eine besonders hohe Spannung zeigt, findet man bei anderen Typen mit grün-gelbem Farbton eine deutlich kleinere Spannung.

Der größte Widerstand auf der Platine hat $330\text{ k}\Omega$. Wenn man ihn verwendet, wird der Strom noch viel kleiner. Vielleicht muss man jetzt schon in einem abgedunkelten Raum arbeiten, um das Licht der LED noch klar zu sehen. Andererseits ist erstaunlich, wie viel Licht immer noch erzeugt wird, obwohl nur noch ein Hundertstel des für die LED erlaubten Stroms fließt.

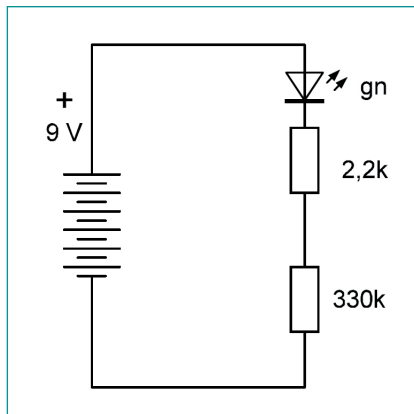
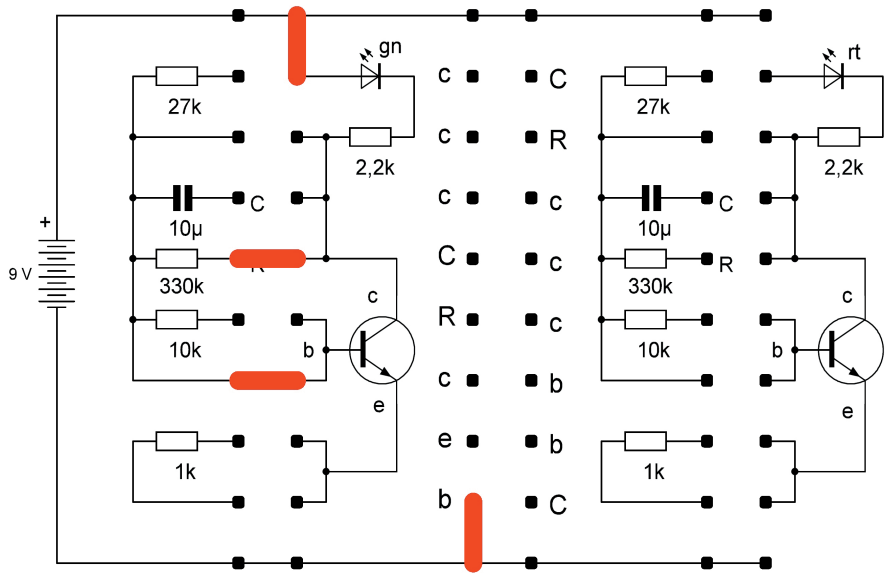


Abb. 2.9: Ein großer Vorwiderstand



Weniger Strom bedeutet auch, dass die Batterie länger durchhält. Die folgende Tabelle zeigt den Widerstand, den Strom und die vermutliche Lebensdauer der Batterie, wenn man mit einer frischen Alkali-Batterie beginnt. Wie man so etwas ausrechnen kann, wird noch besprochen. Man muss dazu auch etwas über die genauen Eigenschaften der LED wissen.

Abb. 2.10: Geringste Helligkeit

Widerstand	Strom	Betriebsdauer
2,2 kΩ	3 mA	Eine Woche
12,2 kΩ	0,5 mA	Zwei Monate
332,2 kΩ	0,02 mA	Drei Jahre

Um den Strom direkt zu messen, lässt man den Jumper zum Pluspol weg und berührt die beiden Kontakte mit den Messkabeln eines Amperemeters. Es kann ein Digitalmultimeter benutzt werden, und es sollte der passende Bereich bis 20 mA gewählt sein. Wenn längere Messungen durchgeführt werden sollen, können zusätzlich Kabel mit Steckbuchsen für die Verbindung zum Messgerät eingesetzt werden.

Messung

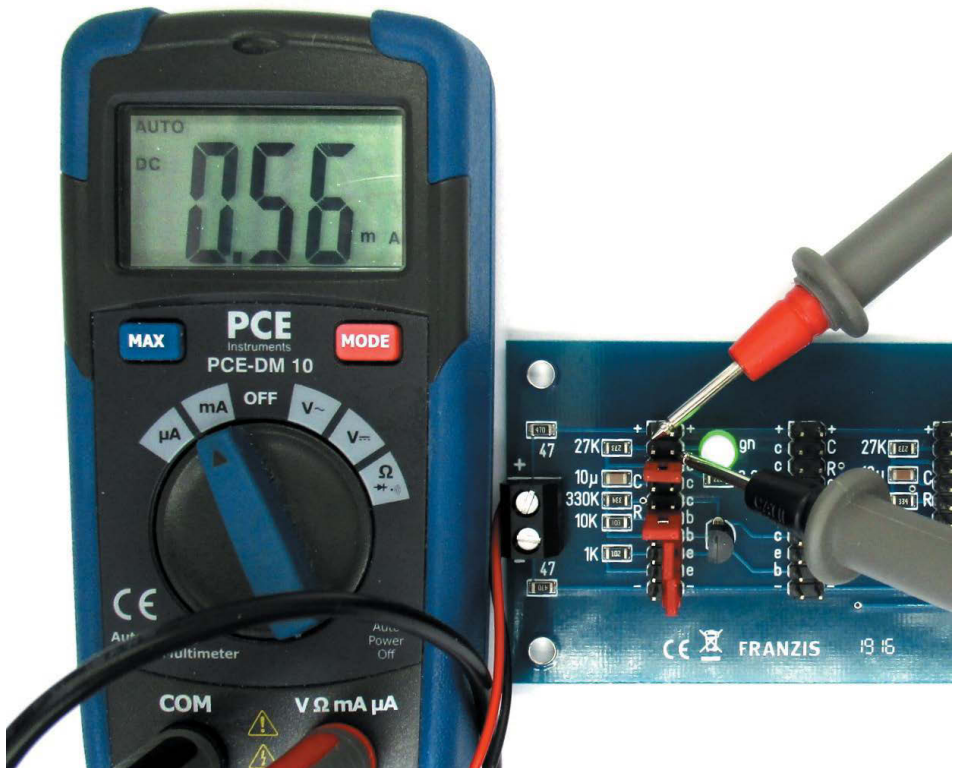


Abb. 2.11: Messung der Stromstärke

Oft ist es unbequem, dass man in einer Schaltung den Stromkreis erst unterbrechen muss, um ein Amperemeter einzufügen. Man kann stattdessen den Spannungsabfall an einem bekannten Widerstand messen und daraus den Strom berechnen. Bei einer Reihenschaltung bietet sich ein 10-k Ω -Widerstand dafür an, weil man die Aufgabe im Kopf lösen kann. An diesem Widerstand wird beispielsweise eine Spannung von 5,2 V gemessen. Daraus ergibt sich ein Strom von 0,52 mA. Im Rahmen der Messgenauigkeit findet man das gleiche Ergebnis wie bei einer direkten Stromstärkemessung.

$$I = U / R$$

$$I = 5,2 \text{ V} / 10 \text{ k}\Omega$$

$$I = 0,52 \text{ mA}$$

Darf es noch etwas mehr Widerstand sein? Man kann $2,2\text{ k}\Omega + 330\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega = 342,2\text{ k}\Omega$ erreichen. Das macht allerdings keinen merklichen Unterschied mehr. Trotzdem muss es mal probiert werden, am besten gleich für beide LEDs. Der Transistor ist übrigens weiterhin ohne Funktion, weil seine Anschlüsse b und e kurzgeschlossen sind.

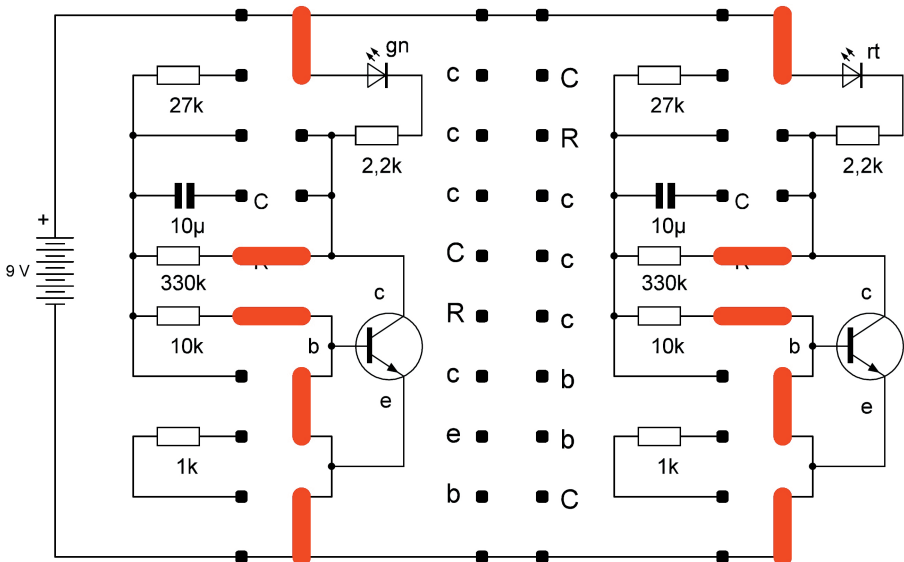


Abb. 2.12: Drei Widerstände in Reihe

Eine interessante Frage ist, wie sich die Helligkeiten beider LEDs bei kleinem Strom verhalten. Die grüne LED ist auch jetzt deutlich heller, aber beide LEDs sind noch gut erkennbar. Bei diesem geringen Strom leuchten die LEDs nur noch so schwach, dass man sich ausnahmsweise den LED-Kristall in Aktion ganz genau ansehen darf, ohne Schaden für die Augen befürchten zu müssen. Die Linsenform der Gehäuse funktioniert wie ein Vergrößerungsglas. Deshalb kann man die rechteckige Form der LED-Kristalle erkennen.

2.4 | Farbumschalter

Wenn man zwei LEDs mit ihren Vorwiderständen parallel schaltet und an eine Batterie legt, leuchten beide. Das wurde ja schon im Abschnitt 2.2 ausprobiert. Jetzt kommt noch ein gemeinsamer Widerstand mit $330\text{ k}\Omega$

2

dazu. Was der bewirkt, wurde ja auch schon ausprobiert. Er verkleinert den Strom und macht das Licht schwächer. Aber nun wird die zweite LED mit angeschlossen.

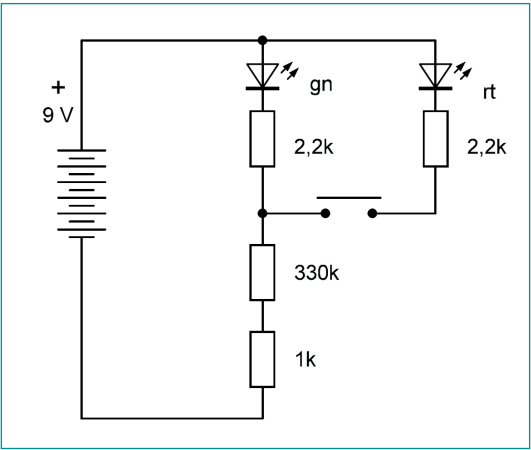


Abb. 2.13: Parallelschaltung von LEDs

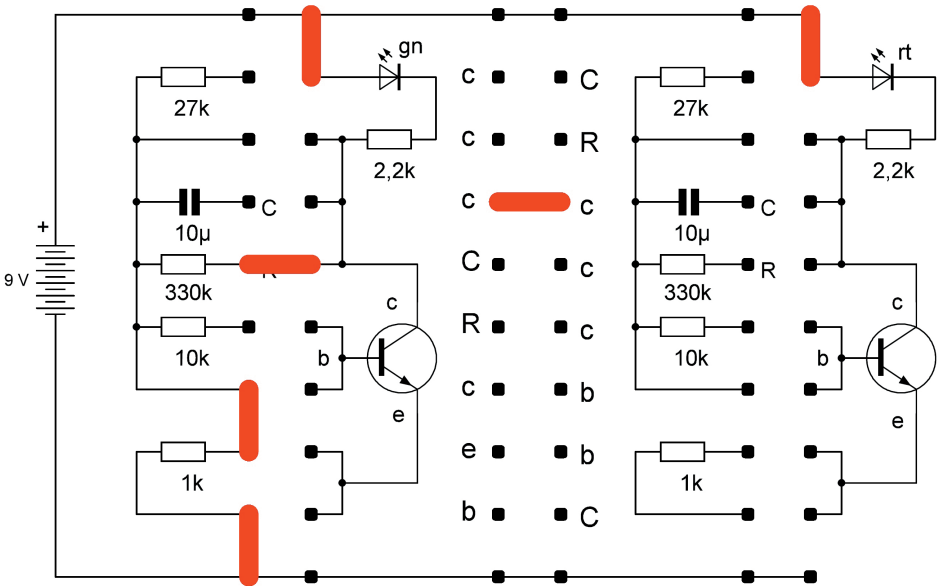


Abb. 2.14: Verbindung zur roten LED

Hier wird zum ersten Mal eine Verbindung zwischen dem linken und dem rechten Teil des Baukastensystems hergestellt. Die Verbindung c–c verbindet die beiden LEDs. Die Bezeichnung c stammt von den Transistoren, die da ebenfalls angeschlossen sind, jetzt aber noch ohne Funktion. An den Anschlüssen liegt nämlich der dritte Anschluss, der „Kollektor“ (engl. collector, abgekürzt c).

Wenn die Brücke c–c gesteckt ist, leuchtet nur die rote LED. Das erscheint zunächst sonderbar, denn die grüne LED ist ja parallel angeschlossen. Zieht man die Brücke ab, dann leuchtet nur die grüne LED. So kann man mit nur einer Verbindung gleich zwei Dinge gleichzeitig erreichen, nämlich die rote LED einschalten und die grüne LED ausschalten. Die Kontaktbrücke c–c wirkt also wie ein Umschalter: rot, grün, rot, grün ...

Dass die Schaltung so funktioniert, hängt mit den ganz besonderen Eigenschaften einer LED zusammen. Die grüne LED braucht mindestens eine Spannung von etwa 2,0 V, damit sie zu leuchten beginnt. Wenn man die Spannung nur wenig erhöht, steigt der Strom stark an. Bei 2,8 V hat man schon den maximal erlaubten Strom von 20 mA erreicht (vgl. die Kennlinien in Abschnitt 7.4). Deshalb ist es auch ganz schlecht, wenn man eine LED ohne Widerstand an eine Batterie mit mehr als der erlaubten Spannung legt. Bei der roten LED ist es ganz ähnlich. Allerdings sind die Spannungen bei gleichem Strom etwas kleiner. Bei 1,5 V fließt gerade ein ganz kleiner Strom, bei 1,8 V ist bereits die volle Helligkeit erreicht. Wenn nur ein kleiner Strom fließt, sorgt die rote LED dafür, dass sich eine geringe Spannung einstellt. Diese reicht aber nicht für die grüne LED. Wenn man aber die Verbindung zur roten LED öffnet, steigt die Spannung so weit an, dass die grüne LED leuchtet. Kurz gesagt, die rote LED kann der grünen LED die Spannung abgraben. Das Verhalten von LEDs wird weiter unten noch viel genauer untersucht.

Die Spannung an der grünen LED zusammen mit dem Vorwiderstand von 2,2 k Ω beträgt 2,3 V. Sie sinkt bei eingeschalteter roter LED auf nur noch 1,7 V.

Messung

Und was passiert, wenn die rote LED ihren eigenen Widerstand bekommt? Bei geöffneter Verbindung leuchten beide LEDs. Aber wenn die Verbindung geschlossen wird, leuchtet die rote LED heller, und die grüne LED geht aus.

2

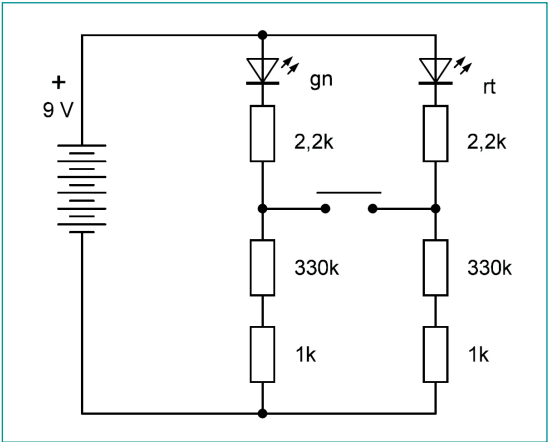


Abb. 2.15: Getrennt oder zusammen

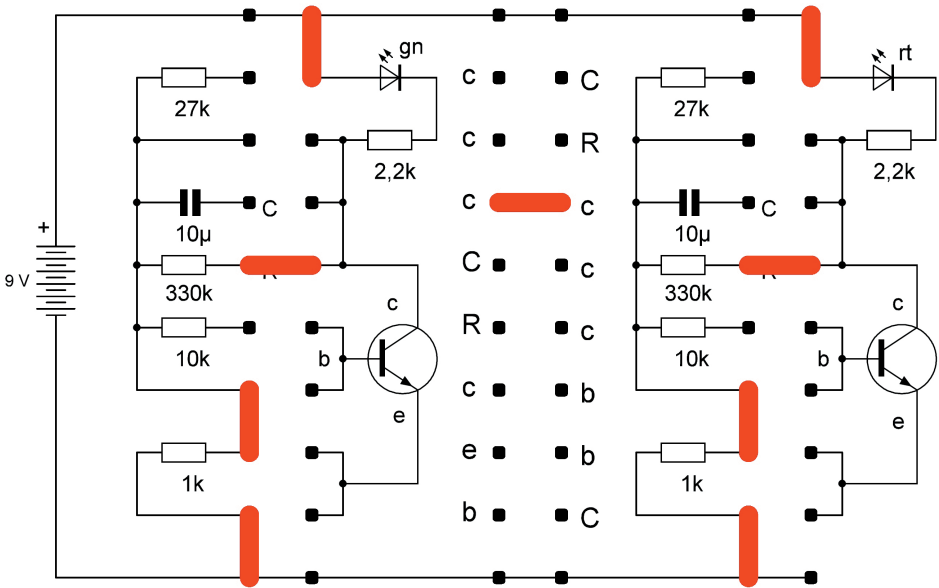


Abb. 2.16: Beide LEDs parallel

Das funktioniert allerdings nur, wenn beide Zusatzwiderstände $330\text{ k}\Omega$ haben. Versucht man es mit $10\text{ k}\Omega$, geht die grüne LED nicht mehr ganz aus. Das liegt an den Vorwiderständen von $2,2\text{ k}\Omega$ an den LEDs. Je größer der Strom wird, desto größer wird auch der zusätzliche Spannungsabfall an diesen Widerständen, und damit wird der eigentlich sehr deutliche Unterschied zwischen der roten und der grünen LED verwischt.

3 TRANSISTOREN UND VERSTÄRKER

Der Transistor ist ein vielseitig einsetzbares Bauteil. Er kann als Verstärker verwendet werden oder auch als Schalter oder für ganz andere Zwecke. Das Experimentiersystem enthält zwei gleiche Transistoren. Es handelt sich um NPN-Transistoren vom Typ BC547C. Es gibt noch viele andere Arten von Transistoren. Wer aber einfache Experimente mit NPN-Transistoren durchführt, erhält bereits einen guten Überblick über die Anwendung von Halbleiter-Bauelementen.

3.1 | Transistor-Schalter

Die Grundfunktion des Transistors ist nicht schwer zu verstehen. Der Emitter (e) soll an den Minuspol der Batterie angeschlossen werden, der Kollektor (c) mit einem Verbraucher in Reihe an den Pluspol. Der Verbraucher besteht in diesem Fall aus der LED mit ihrem Vorwiderstand. Im Grundzustand ist der Transistor ein Nichtleiter, es fließt also kein Strom. Wenn man aber einen kleinen Strom durch den Basisanschluss (b) leitet, fließt ein sehr viel größerer Strom durch den Kollektor und den Emitter. Ein kleiner Basisstrom wird also zu einem großen Kollektorstrom verstärkt. Der Kollektorstrom kann 500 Mal größer sein als der Basisstrom. Man spricht dann davon, dass der Transistor eine 500-fache Stromverstärkung hat.

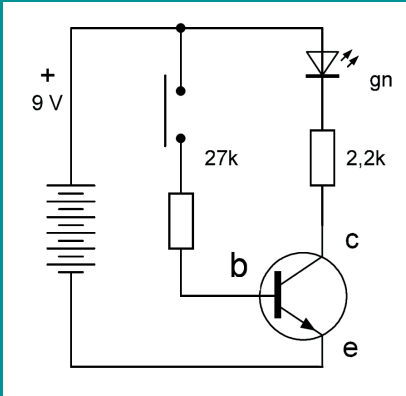


Abb. 3.1: Den Basisstrom einschalten

Im ersten Versuch soll ein kleiner Basisstrom über den Widerstand von $27\text{ k}\Omega$ fließen. Wenn man zuerst nur den Jumper an der LED und den am Emitter aufsteckt, ist der Stromkreis scheinbar schon geschlossen und besteht aus Batterie, LED, dem Widerstand mit $2,2\text{ k}\Omega$ und dem Transistor mit seinen beiden Anschlüssen Kollektor und Emitter. Aber der Transistor leitet nicht und verhält sich wie ein geöffneter Schalter.

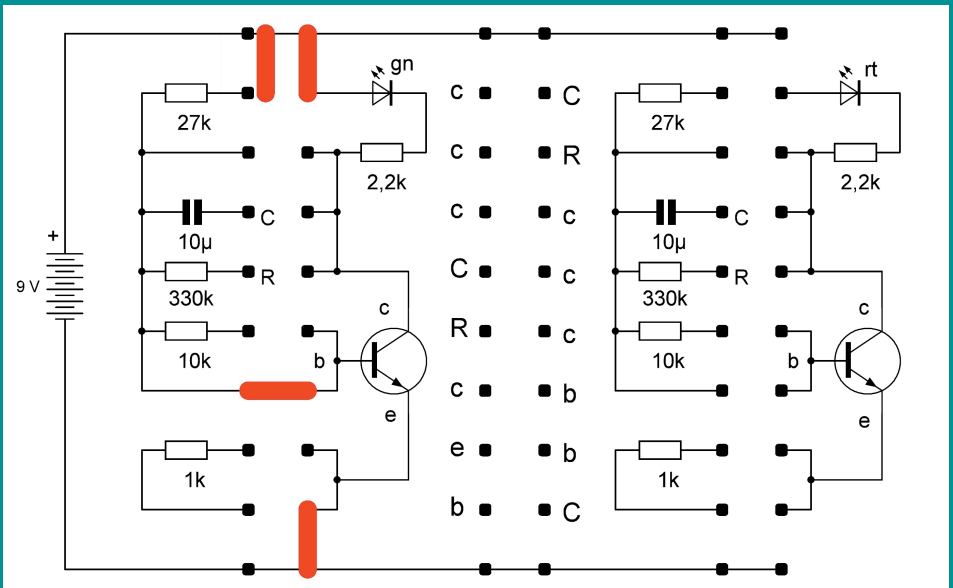


Abb. 3.2: Grundversuch zur Funktion des Transistors

3

Nun soll auch noch der Basis-Stromkreis geschlossen werden. Dazu braucht man einen Jumper, der den 27-k Ω -Widerstand an Plus legt und einen zweiten, der die Basis damit verbindet. Sobald beide Jumper gesteckt sind, leuchtet die LED. Der Basiswiderstand ist viel größer als der Widerstand an der LED. Daher weiß man, dass nur ein kleiner Basisstrom fließt. Trotzdem zeigt die LED die volle Helligkeit. Der kleine Basisstrom wurde also zu einem großen Kollektorstrom verstärkt. Man kann es auch so sagen: Der kleine Basisstrom hat den Transistor dazu gebracht, dass er den größeren Kollektorstrom einschaltet. Und wenn man den Basisstrom abschaltet, schaltet der Transistor die LED aus.

Messung

Die Spannung zwischen Basis und Emitter beträgt im eingeschalteten Zustand ungefähr 0,6 V bis 0,7 V, in diesem Fall wurden 0,69 V gemessen. Am Basiswiderstand von 27 k Ω liegt eine Spannung von 8,3 V. Daraus kann man den Basisstrom von 0,31 mA berechnen. Der Kollektorstrom ist mit etwa 3 mA wesentlich größer.

3.2 | Voll eingeschaltet?

Eine wichtige Frage ist nun, ob der Transistor den Strom genauso gut einschaltet wie ein Schalter oder ein Jumper. Es könnte ja sein, dass der Transistor immer noch einen gewissen Widerstand hat, sodass ein echter Schalter die LED noch heller schalten könnte. Um das zu testen, soll eine zusätzliche Verbindung zwischen Emitter und Kollektor gesteckt werden.

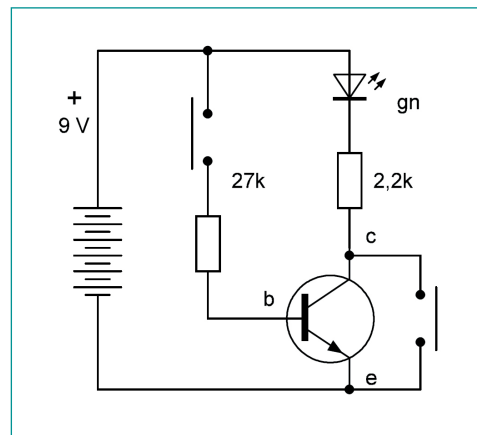


Abb. 3.3: Überbrücken des Transistors

Damit diese Verbindung mit Jumpern möglich ist, muss man einen Umweg über den rechten Transistor nehmen. Dessen Basis und Emmitter werden nach Minus verbunden. Dann kann ein Jumper zwischen c (links) und b (rechts) auf der mittleren Kontaktleiste die Verbindung schließen. Der Kollektor des linken Transistors wird also mit dem Minuspol verbunden. Aber wird die LED dadurch noch heller? Nein! Das Ergebnis lautet also, dass der Transistor allein schon ein sehr guter Schalter ist.

Nun kann man noch mehr ausprobieren. Die LED soll einmal vom Transistor und einmal vom Schalter eingeschaltet werden. Dazu öffnet man den Basisstromkreis, indem man einen der linken Jumper abzieht. Die LED geht aus. Mit dem Jumper in der Mitte kann sie aber wieder eingeschaltet werden. Egal, ob der Transistor den Strom einschaltet oder der Jumper, das Ergebnis ist gleich.

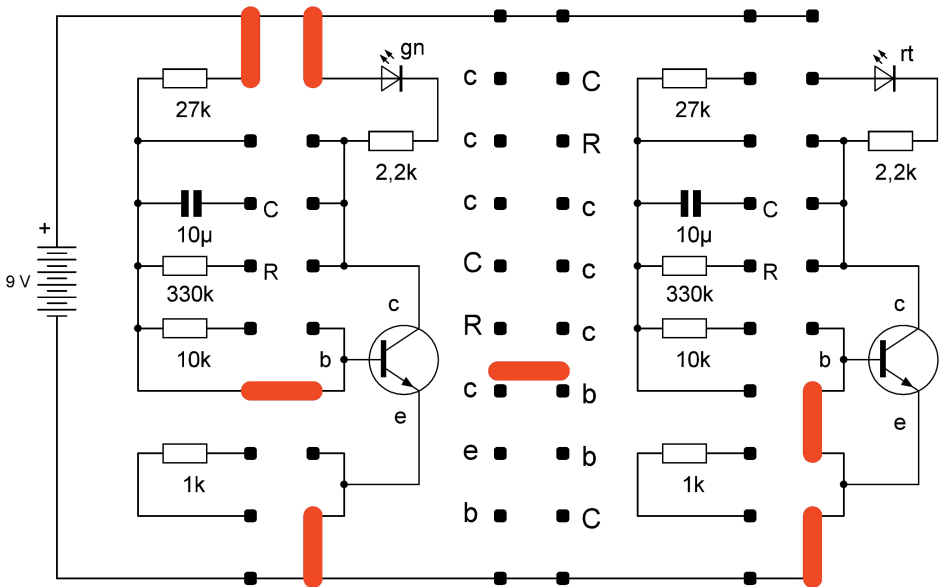


Abb. 3.4: Test mit direkter Verbindung

Jetzt könnte jemand natürlich den Nutzen des Transistors anzweifeln, weil ja ein Schalter gebraucht wird, um den Transistor einzuschalten. Aber das ist nur ein erstes Beispiel. Später kommen Schaltungen hinzu, bei denen sich die Transistoren gegenseitig ein- und ausschalten. Dann zeigt der Transistor, was er kann.

3

Messung

Die Kollektor-Emitter-Restspannung beträgt im eingeschalteten Zustand nur etwa 0,03 V [30 mV] und ist damit nur unwesentlich größer als der Spannungsabfall an einem geschlossenen Jumperkontakt, der so klein ist, dass man ihn mit einem einfachen Digitalmultimeter nicht mehr sicher feststellen kann.

3.3 | Mehr Verstärkung

Jetzt wird der Basiswiderstand auf 330 k Ω vergrößert. Damit man sehen kann, wie klein der Basisstrom ist, soll die rote LED ihn anzeigen. Und tatsächlich, die grüne LED leuchtet sehr hell, die rote nur ganz schwach.

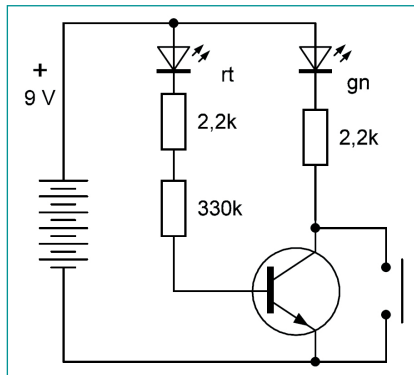


Abb. 3.5: Geringer Basisstrom

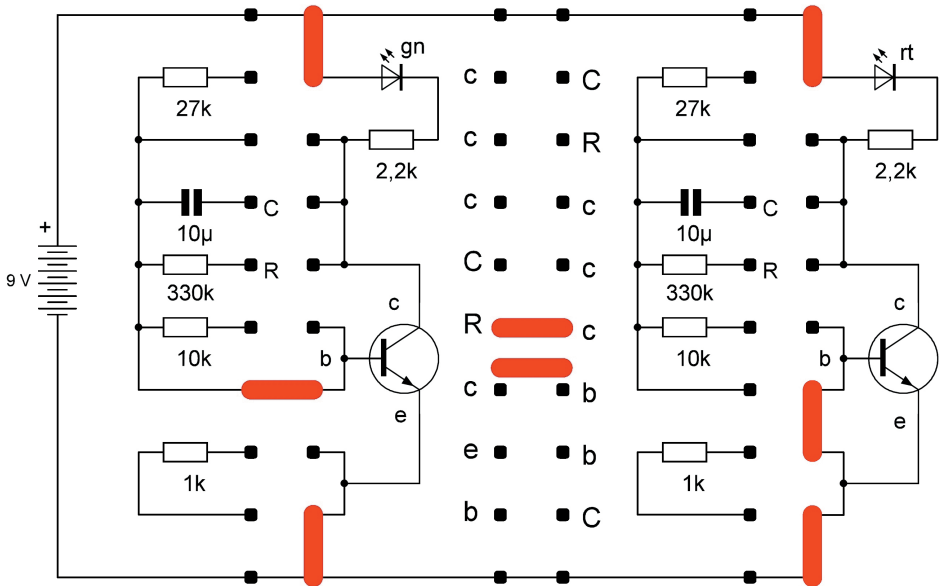


Abb. 3.6: Anzeige des Basisstroms

Der Basiswiderstand ist 150 Mal größer als der Kollektorwiderstand. Deshalb ist auch der Basisstrom ungefähr 150 Mal kleiner als der Kollektorstrom. Da muss der Transistor den Basisstrom mindestens 150-fach verstärken können. Aber ist er dann noch in der Lage, so gut wie ein Draht oder ein Schalter zu leiten? Das verrät ein Test mit der zusätzlichen Verbindung zum Minuspol. Tatsächlich wird die grüne LED nicht merklich heller.

Eine Messung zeigt eine Kollektor-Emitter-Spannung von 0,11 V. Das bedeutet, dass der Transistor auch bei diesem sehr geringen Basisstrom noch fast perfekt einschaltet.

3.4 | Alarmanlage

Eine Alarmanlage kann einen Kontakt oder einen dünnen Draht verwenden, den ein Einbrecher versehentlich durchtrennt. Dadurch wird der Alarm ausgelöst. Wenn der Einbrecher den Draht entdecken sollte und ihn durchschneidet, um die Anlage außer Betrieb zu setzen, dann passiert das Gleiche: Es gibt einen Alarm. In diesem Fall geht die grüne LED an.

3

Normalerweise würde man erwarten, dass die LED an ist, solange der Kontakt geschlossen ist. Hier ist es genau umgekehrt. Das ist möglich, weil der Kontakt zwischen Basis und Emitter des Transistors liegt und die Basisspannung kurzschließt. Deshalb fließt kein Basisstrom, und der Transistor bleibt gesperrt.

„Kurzschluss“ hört sich gefährlich an, aber in diesem Fall besteht keine Gefahr, weil der Strom durch den Basiswiderstand begrenzt wird. Man sieht auch ein schwaches Leuchten der roten LED. Wenn der Kontakt geöffnet und geschlossen wird, ist kaum ein Unterschied zu bemerken. Nur die grüne LED reagiert. Bei offenem Kontakt leuchtet sie mit voller Helligkeit und zeigt den Alarm an.

Man kann den Jumper als Kontaktbrücke verwenden und mit einem Faden versehen. Der Faden wird an einer Tür oder an einem Fenster befestigt. Beim Öffnen soll der Faden den Jumper abziehen, sodass der Alarm losgeht.

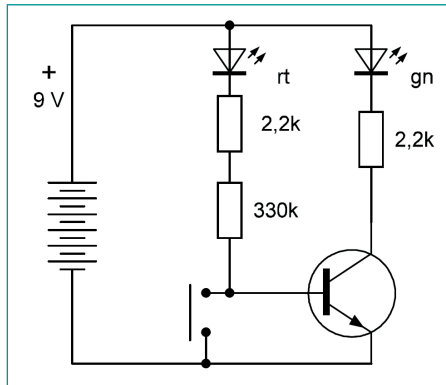


Abb. 3.7: Kurzschluss der Basisspannung

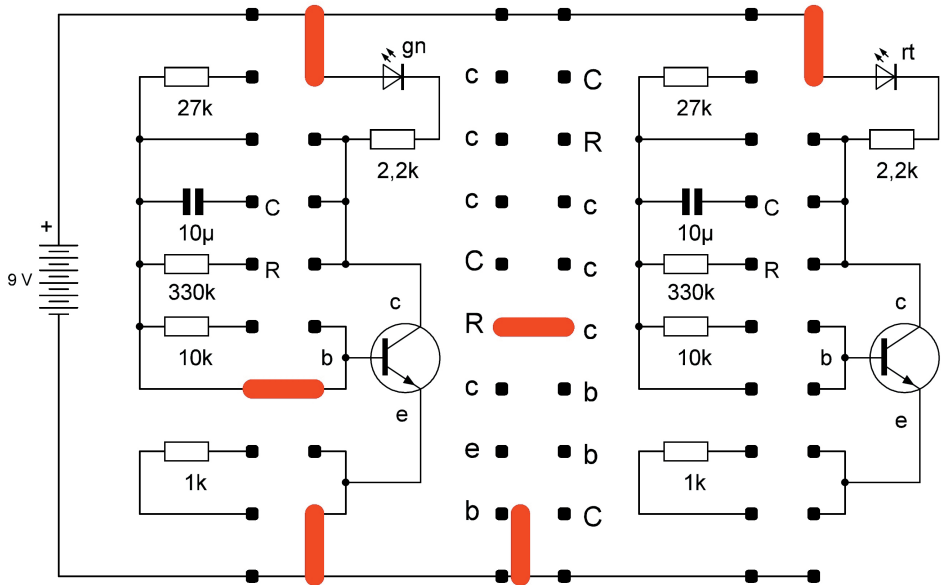


Abb. 3.8: Geöffnete Stromschleife

Wie groß ist der Basisstrom im geschlossenen und im geöffneten Zustand? Man kann schon vermuten, dass der Unterschied gering ist, weil der Spannungsabfall am $330\text{-k}\Omega$ -Widerstand bei geöffnetem Kontakt nur um die Basis-Emitter-Spannung von $0,6\text{ V}$ kleiner wird. Eine Messung der Spannung an diesem Widerstand zeigt $7,7\text{ V}$ [geschlossen] und $6,8\text{ V}$ [geöffnet]. Die gemessene Differenz ist mit $0,9\text{ V}$ größer als erwartet, weil sich durch die Belastung mit dem LED-Strom auch die Betriebsspannung etwas ändert. Das zeigt auch eine direkte Messung zwischen Plus und Minus.

Messung

Aus den gemessenen Spannungen errechnet man einen Strom von $23\text{ }\mu\text{A}$ oder $21\text{ }\mu\text{A}$. Um den Strom direkt zu messen, kann man den Jumper der roten LED nach Plus öffnen und dort das Strommessgerät einfügen.

3

3.5 | Gekoppelte Schalter

Mit einem Kontakt kann man gleich zwei Transistoren einschalten. Am Emittterwiderstand des ersten Transistors entsteht im eingeschalteten Zustand ein Spannungsabfall, der den zweiten Transistor einschaltet. Und es gibt in dieser Schaltung einen zweiten Kontakt, der das Gegenteil bewirkt: Er schaltet beide Transistoren ab. Das Ganze kann als Alarmanlage verwendet werden, wobei der obere Kontakt die Anlage scharf schaltet und der untere den Alarmkontakt bildet.

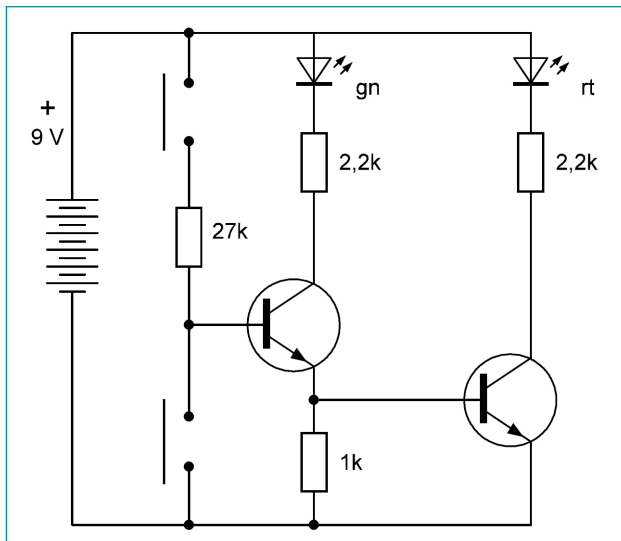


Abb. 3.9:
Direkt gekoppelte
Transistoren

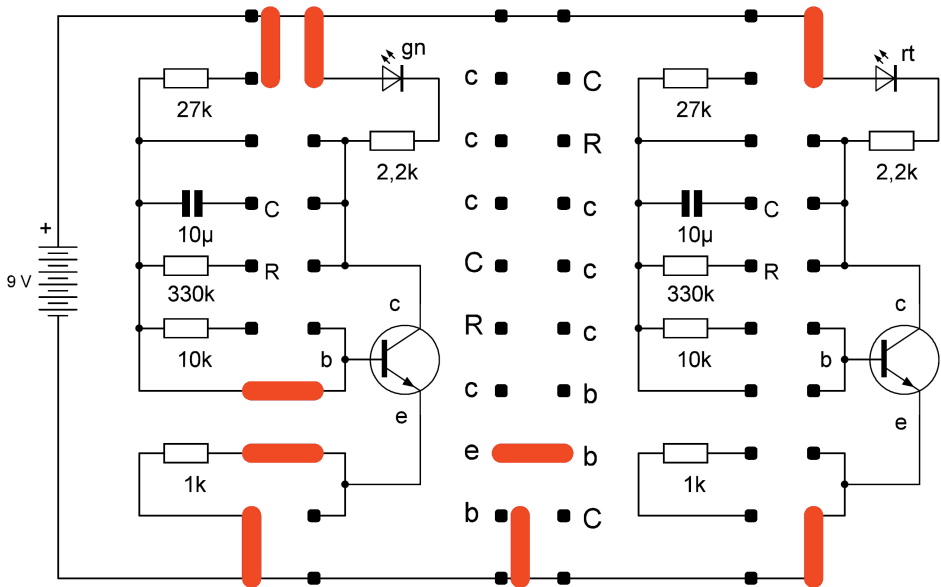


Abb. 3.10: Ein- und Ausschalten beider LEDs

Eine Messung zeigt 0,7 V an der Basis des rechten Transistors und 1,4 V an der Basis des linken Transistors, jeweils gemessen gegen den Minuspol. Beide Transistoren sind voll durchgesteuert und haben eine Kollektor-Emitter-Spannung von 0,03 V (links) und 0,02 V (rechts). Der rechte Transistor ist also etwas stärker durchgesteuert, weil er wesentlich mehr Basisstrom erhält.

3.6 | Alarmanlage mit Bereitschaftsanzeige

Bei einer Alarmanlage kommt es darauf an, dass sie den Alarm sehr deutlich anzeigt und dass die Batterie möglichst lange hält. Diese Schaltung leistet beides. Durch den großen Basiswiderstand von 330 k Ω wird nur ein sehr kleiner Ruhestrom von rund 20 μ A gebraucht. Und dieser kleine Strom fließt auch durch die grüne LED, die dauernd schwach leuchtet. Damit hat man zusätzlich eine Bereitschaftsanzeige. Aber wenn die Drahtbrücke entfernt wird, reicht der Strom für eine große Aussteuerung des linken Transistors aus, der dann gleichzeitig auch den rechten Transistor einschaltet. Im Alarmfall leuchten also beide LEDs hell auf.

3

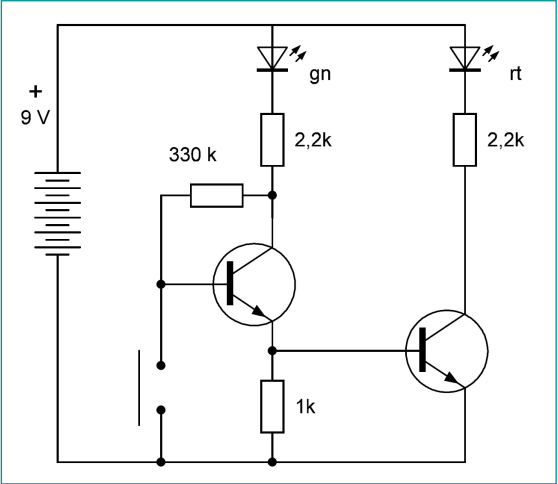


Abb. 3.11:
Die verbesserte
Alarmanlage

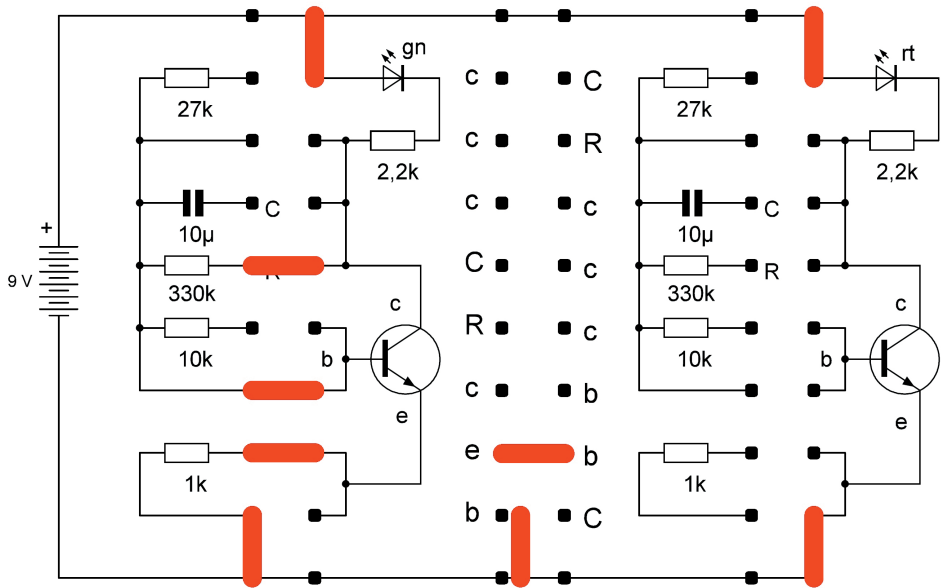


Abb. 3.12: Aufbau
mit Basiswiderstand
330 kΩ

4 KONDENSATOREN UND ZEITSCHALTER

Drei Arten von Bauteilen wurden bisher schon verwendet: LEDs, Transistoren und Widerstände. Nun kommt als weiteres Bauteil der Kondensator hinzu. Das ist ein kleiner Speicher elektrischer Energie. Er besteht aus zwei Metallplatten oder Metallfolien, die sich eng gegenüberstehen, ohne sich zu berühren. Auf diesen Platten sammelt sich elektrische Ladung, wenn man eine elektrische Spannung anlegt.

4.1 | Laden und entladen

Jeder hat schon seine Erfahrungen mit elektrischer Ladung gemacht, wenn er sich einmal auf einem Teppich elektrisch aufgeladen hat. Der eigene Körper ist dann von einem elektrischen Feld umgeben. Und wenn man eine Türklinke berührt, gibt es eine schmerzhaft Entladung. In einem Kondensator ist es ganz ähnlich, aber das elektrische Feld ist auf den kleinen Raum zwischen den Platten konzentriert, deshalb kann auch bei einer geringen Spannung schon viel Ladung gespeichert werden. Der Kondensator auf der Platine hat eine Kapazität von 10 Mikrofaraad [10 μF]. Zum Vergleich: Schon bei einer Spannung von nur 9 V speichert dieser Kondensator mehr elektrische Energie als der eigene Körper, wenn er sich auf 1000 V aufgeladen hat. Diese Energie sollte für einen kleinen Lichtblitz ausreichen.

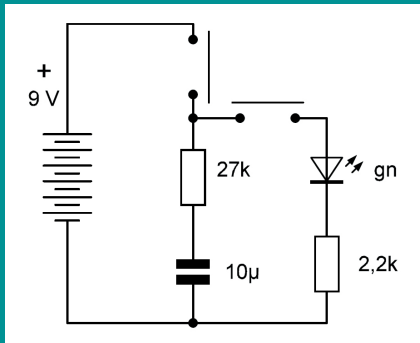


Abb. 4.1: Laden und entladen

Also los, der Kondensator soll auf 9 V aufgeladen werden. Bei diesem Versuch liegt ein zusätzlicher Widerstand von 27 k Ω in Reihe zum Kondensator. Er bewirkt nur, dass das Aufladen und das Entladen etwas langsamer abläuft, es ist aber jeweils nach dem Bruchteil einer Sekunde abgeschlossen.

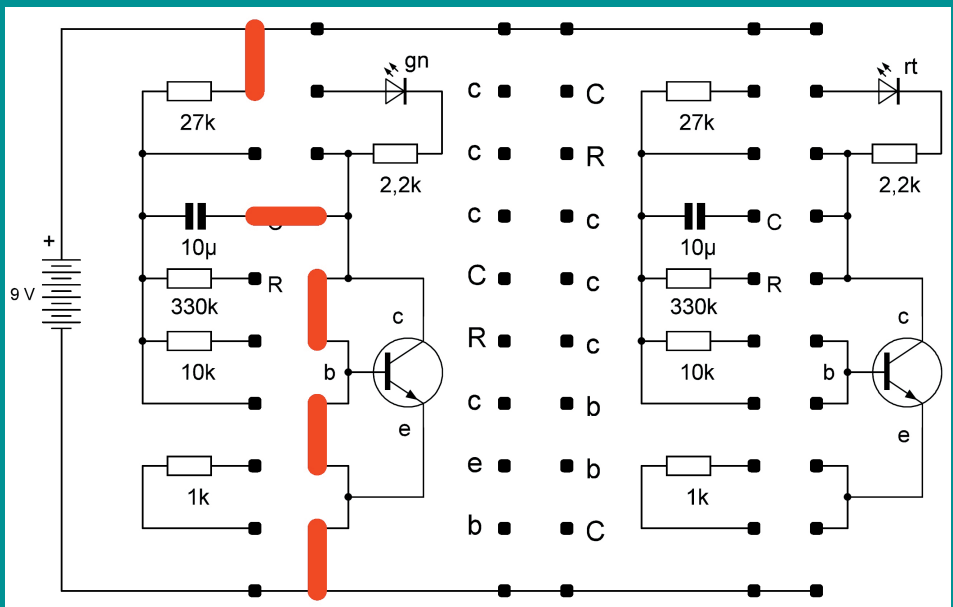


Abb. 4.2: Aufladen des Kondensators

4

Nun wird die Lade-Brücke entfernt und in anderer Richtung wieder aufgesetzt. Die gespeicherte Ladung fließt über die LED. Dabei entsteht ein Lichtblitz. Das ist ganz schnell vorbei, aber man kann den Kondensator ja beliebig oft neu aufladen und wieder entladen. Anders als ein Akku hat ein Kondensator eine praktisch unbegrenzte Anzahl von Ladezyklen.

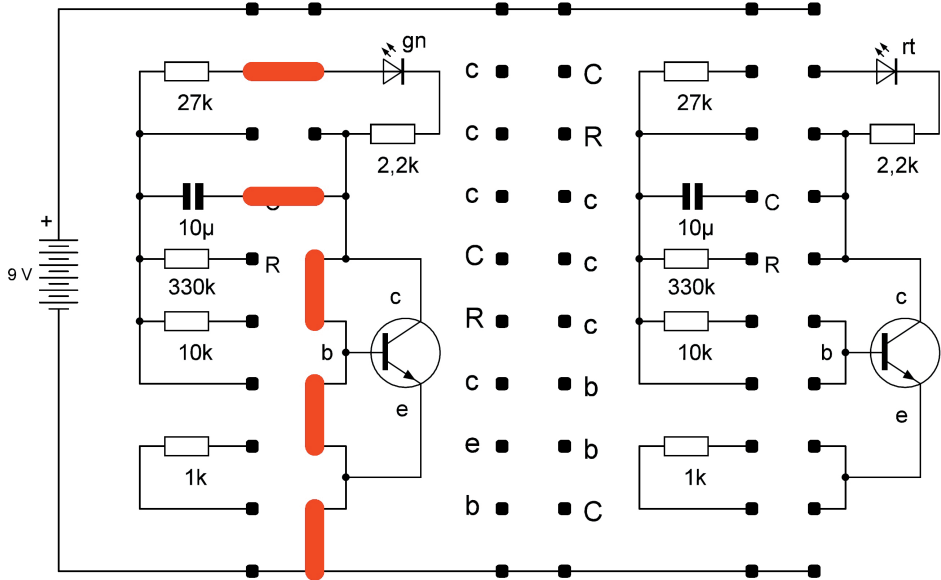


Abb. 4.3: Entladen über die LED

Zwischen Aufladen und Entladen darf einige Zeit liegen, denn der Kondensator entlädt sich kaum selbst. Das sollte einmal genauer untersucht werden. Wie lange darf man warten, um noch einen deutlichen Lichtblitz zu bekommen?

Messung

Mit dem Digitalmultimeter kann man die Spannung des gerade aufgeladenen Kondensators messen. Sie beträgt am Anfang 9 V und sinkt dann ganz langsam ab. Wie schnell sich der Kondensator entlädt, hängt vom Innenwiderstand des verwendeten Messgeräts ab. Die meisten Digitalmultimeter haben in den Spannungs-Messbereichen einen Innenwiderstand von 10 MΩ [10 Megaohm, also 10.000 Kiloohm]. Mit einem solchen Gerät findet man die folgenden Messwerte. Der Spannungsverlauf kann übersichtlich in einem Diagramm aufgetragen werden.

Messzeit in min	Kondensatorspannung in V
0	9
1	4,9
2	2,7
3	1,5
4	0,82
5	0,45
6	0,25
7	0,13
8	0,07
9	0,04
10	0,02

Die Spannung kann auch etwas langsamer oder etwas schneller sinken, weil die Kondensatoren eine gewisse Fertigungstoleranz aufweisen. Mit genau $10\ \mu\text{F}$ und $10\ \text{M}\Omega$ erhält man eine Zeitkonstante von $T = R * C = 10\ \mu\text{F} * 10\ \text{M}\Omega = 100\ \text{s}$. In dieser Zeit hat sich der Kondensator auf $1/e = 36,8\ \%$ der Anfangsspannung aufgeladen. In diesem Fall sollte also die Anfangsspannung von $9\ \text{V}$ nach $100\ \text{s}$ auf $3,31\ \text{V}$ gesunken sein.

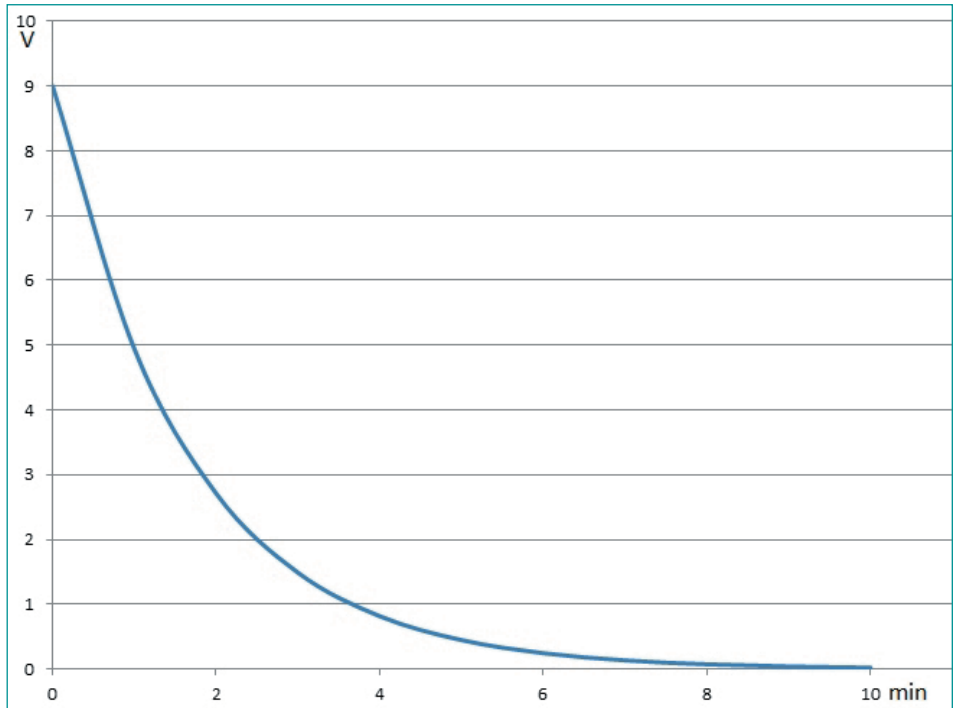


Abb. 4.4: Verlauf der Kondensatorspannung in 10 Minuten

4.2 | Energie sammeln

Auch mit einem sehr geringen Ladestrom erreicht der Kondensator irgendwann die volle Ladespannung. Statt einer Steckbrücke kann man deshalb einfach seinen Finger verwenden. Seitlich gegen die Kontaktstifte gehalten, hat der Finger einen Widerstand von etwa $100\text{ k}\Omega$ bis $1\text{ M}\Omega$. Mit $1\text{ M}\Omega$ und $10\text{ }\mu\text{F}$ ergibt sich eine Zeitkonstante von 10 s . Wenn man also zehn Sekunden lang die Kontakte berührt, sollte der Kondensator genügend geladen sein. Nun kann der Entladungs-Jumper aufgesteckt werden. Dabei sieht man, ob der Kondensator schon voll genug war.

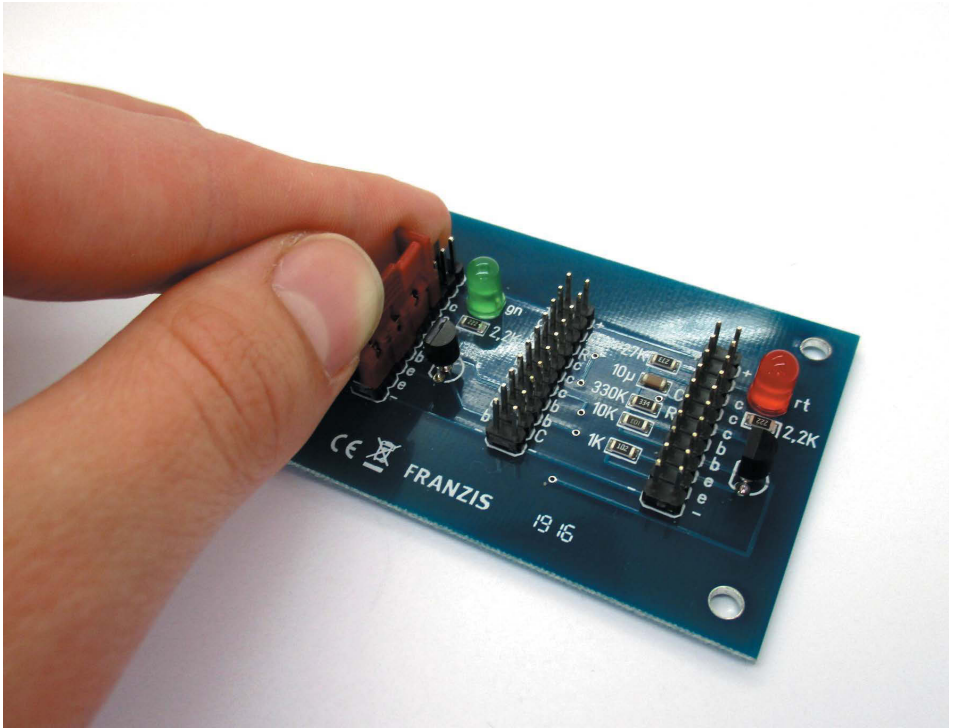


Abb. 4.5: Ein Finger als Ladewiderstand

Der Hautwiderstand hängt hauptsächlich von der Hautfeuchtigkeit ab. Wenn man schwitzt, kommt zur Feuchtigkeit eine gewisse Salzkonzentration hinzu. Dann ist der Widerstand besonders gering. Wenn man sich aber mit warmem Wasser und Seife gründlich die Hände gewaschen hat und sie dann trocknet, ist der Widerstand sehr hoch. Unter diesen Bedingungen dauert die Aufladung sehr lange.

Der erfahrende Elektroniker benutzt den Fingertest häufig zur Überprüfung von Schaltungen. Mal eben einen Widerstand einfügen und schauen, was sich ändert, das geht einfach mit Anfassen. Manchmal beobachtet man auch zufällige Änderungen beim Berühren von Kontakten oder Bauteilen in einer Schaltung. Dann weiß man, dass es am Hautwiderstand lag. Und oft kann man der Sache auf den Grund gehen und entdeckt dabei interessante Schaltungsvarianten.

4

Messung

Kann die gesammelte Energie beliebig lange gespeichert bleiben? Wenn man nach dem Aufladen längere Zeit wartet, kann die Spannung schon etwas gesunken sein. Eine interessante Frage ist: Welche Spannung findet man noch nach einer Stunde? Sogar nach einem ganzen Tag kann der Kondensator noch die halbe Ladespannung haben.

Macht es eigentlich einen Unterschied, ob der Kondensator lange oder nur ganz kurz aufgeladen wurde? Bei einem idealen Kondensator sollte man keinen Unterschied messen. Aber ein keramischer Kondensator verhält sich etwas anders. Wenn er nur kurz geladen wird, kann sich nach wenigen Minuten eine Spannung einstellen, die bis zu 10 % geringer ist als die Ladespannung. Danach bleibt die Spannung lange Zeit konstant.

Umgekehrt funktioniert es auch. Man lädt den Kondensator auf und entlädt ihn dann für kurze Zeit. Eine Spannungsmessung zeigt 0 V. Aber nach ein paar Minuten hat sich der Kondensator ganz von allein wieder etwas aufgeladen. Dann misst man bis zu 0,2 V oder mehr. Dieser Effekt ist durch elektrische Dipole im Isolationsmaterial erklärbar, die sich nur langsam nach dem elektrischen Feld des Kondensators ausrichten können.

4.3 | Verstärkter Blitz

Bisher wurde der Entladungsstrom des Kondensators direkt über eine LED geleitet. Aber man kann die Wirkung noch verstärken, wenn man einen Transistor einsetzt. Der Ladestrom soll nun über die Basis des Transistors fließen. Dieser verstärkt den Strom und lässt eine LED im Kollektor-Stromkreis heller aufleuchten.

Bei dieser Schaltung sind einige weitere Widerstände beteiligt. Sie dienen dazu, den Kondensator im Ruhezustand wieder zu entladen. Nur dann ist es nämlich möglich, einen neuen Lichtblitz zu erzeugen. Immer wenn man den Jumper der grünen LED aufsteckt, sieht man einen deutlichen Lichtblitz an beiden LEDs. Wenn er aufgesteckt bleibt, geht die rote LED ganz aus, weil der Kondensator nach kurzer Zeit schon voll aufgeladen ist. Aber die grüne LED leuchtet schwach weiter, weil etwas Strom über den 330-k Ω -Widerstand fließt.

Der Widerstand mit 330 k Ω ist für die Entladung des Kondensators zuständig. Mit dem Kondensator von 10 μ F ergibt sich eine Zeitkonstante

von 3,3 s. Wenn man sehr viel kürzer wartet und den Kontakt nach einer halben Sekunde wieder schließt, gibt es keinen roten Lichtblitz, denn dann war der Kondensator noch fast vollständig geladen.

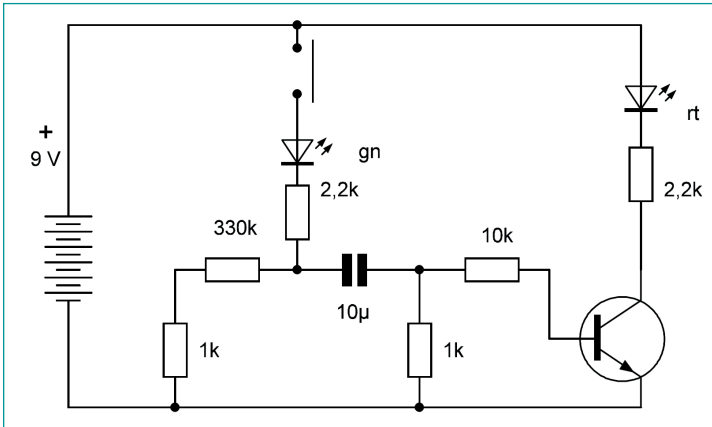


Abb. 4.6:
Verstärkter
Ladestrom

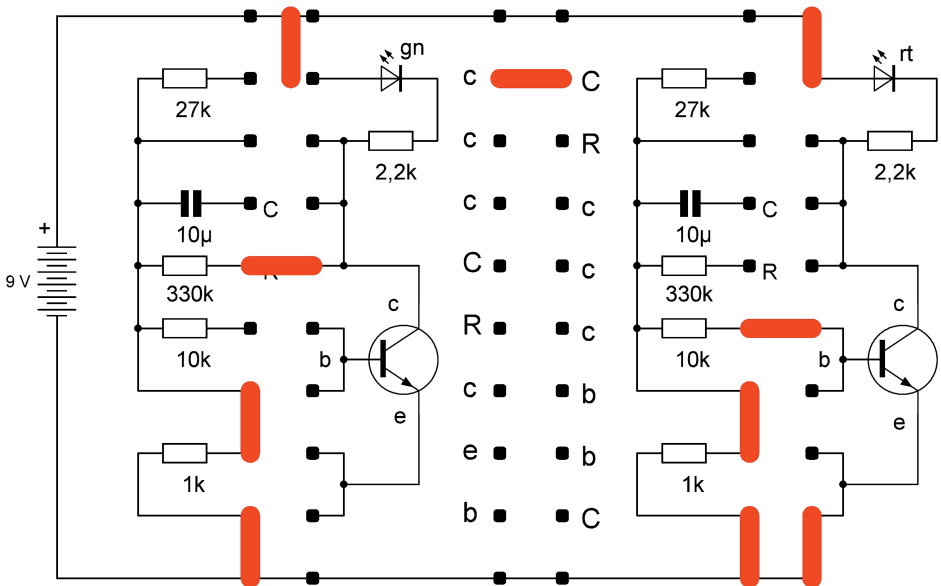


Abb. 4.7:
Das Blitzlicht

4

4.4 | Der Blitz-Merker

Diese Schaltung hat zwei Schalter, einen zum Aufladen und einen zum Entladen des Kondensators. Beide Schalter erzeugen Lichtblitze an der roten LED, aber nur abwechselnd. Der Kondensator „merkt“ sich den letzten Zustand – geladen oder entladen. Beim Aufladen gibt es einen Spannungsabfall am $1\text{-k}\Omega$ -Widerstand, sodass über den $10\text{-k}\Omega$ -Widerstand ein Basisstrom fließt. Beim Entladen legt man die positive Seite des Kondensators an die Basis, sodass ebenfalls ein Basisstrom fließt. So wird erreicht, dass beide Vorgänge einen Lichtblitz erzeugen.

Die Schaltung eignet sich als kleines Ratespiel. Der erste Spieler lädt oder entlädt den Kondensator und kennt deshalb den Ladezustand. Der zweite Spieler muss raten und den Jumper möglichst so aufsetzen, dass wieder ein Lichtblitz entsteht. Dann werden die Rollen vertauscht. Nach insgesamt zehn Runden steht fest, wer von beiden Spielern die Aktionen des Gegners besser voraussagen kann. Wer in deutlich mehr als der Hälfte aller Fälle richtig geraten hat, ist ein echter Gedankenleser.

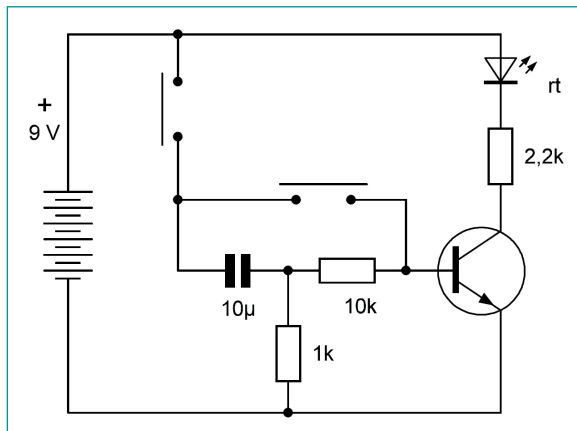


Abb. 4.8: Laden und entladen

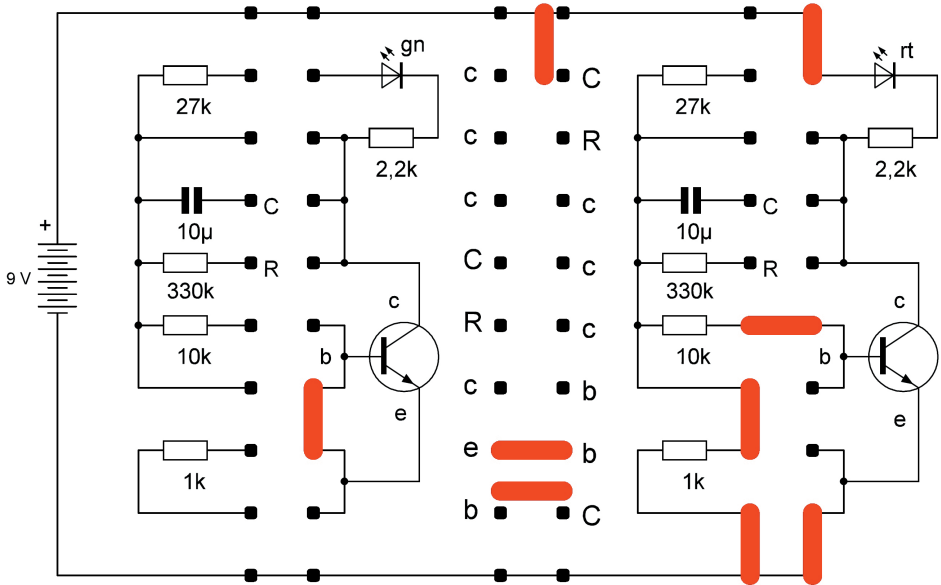


Abb. 4.9: Lichtblitze bei Ladungsänderung

Wenn jeder Spieler ein Messgerät benutzen darf, sollte jeder Versuch ein Treffer werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die Spannung am Kondensator nicht durch eine übermäßig lange Messung stark verändert wird.

Messungen

Ohne Messung kennt man die Ladung des Kondensators nicht. Menschen können keine kleinen Spannungen oder elektrische Felder sehen oder fühlen. Aber manche Tiere können das. Der Hammerhai fühlt kleinste elektrische Spannungen und entdeckt so im Sand versteckte Fische.

Nach neuester Forschung können auch Bienen eine elektrische Ladung erkennen und wissen dann, ob eine Blüte gerade schon von einer anderen Biene besucht wurde. Wir Menschen können übrigens sehr hohe Spannungen erkennen. Wenn man eine Woldecke entfaltet, kann sie sich auf einige tausend Volt aufladen. Wenn man dann mit dem Handrücken in die Nähe kommt, richten sich feinste Härchen auf der Haut auf, und das spüren wir. Genau so funktioniert das auch bei den Bienen, nur sind sie wesentlich empfindlicher.

4

4.5 | Nachlaufsteuerung

Eine Lampe soll sofort angehen, wenn man sie einschaltet, aber noch einige Zeit nachleuchten, wenn man sie ausschaltet. Solche Lampen gibt es im Auto, damit man noch in Ruhe abschließen kann. Aber auch für eine Nachttischlampe kann eine Nachlaufsteuerung nützlich sein.

Die Schaltung verwendet einen Ladekondensator und einen Transistor mit einem hochohmigen Basiswiderstand von $330\text{ k}\Omega$. Dank seiner hohen Verstärkung wird der Transistor bei geschlossenem Schalter noch voll eingeschaltet. Öffnet man den Schalter, fließt weiterhin Basisstrom, weil der Kondensator noch geladen ist. Nach einigen Sekunden sinkt die Kondensatorspannung allerdings merklich, sodass der Steuerstrom geringer wird und die LED schwächer leuchtet. Je kleiner allerdings der Basisstrom wird, desto geringer wird auch die Entladung. Die weitere Entladung wird also noch langsamer. Auch nach sehr langer Zeit ist immer noch ein schwaches Restleuchten der LED zu erkennen.

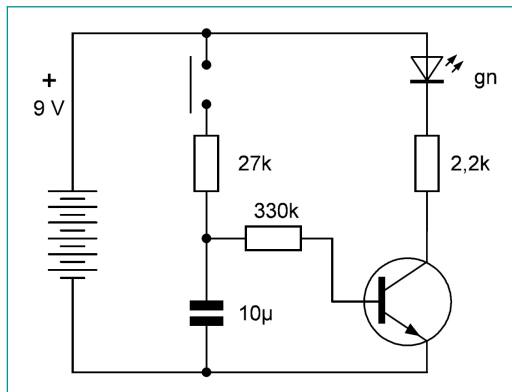


Abb. 4.10: Basisstrom aus dem Kondensator

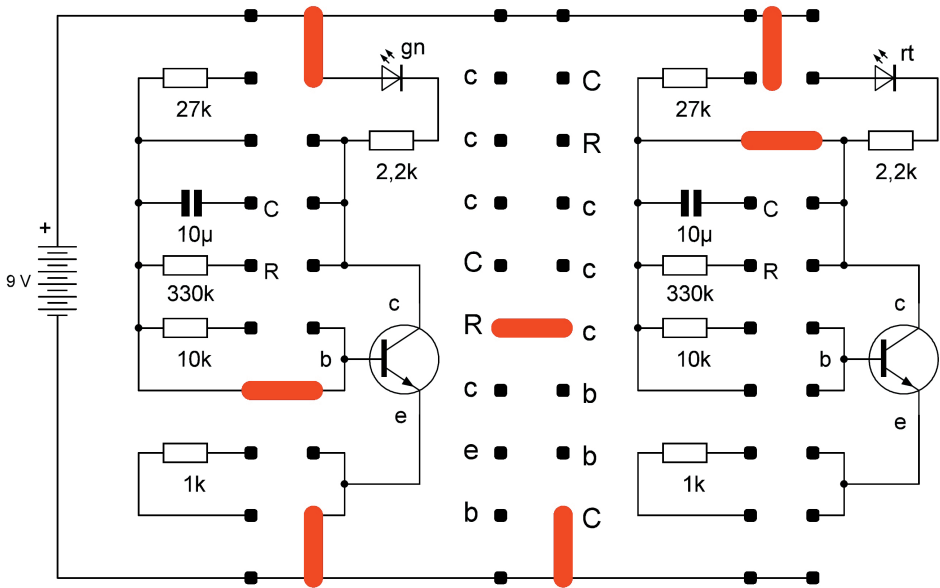


Abb. 4.11: Eine Lampe mit Nachleuten

Wann beginnt die Abnahme des LED-Stroms? Das verrät eine Messung der Kollektorspannung. Sobald sie nach etwa drei Sekunden anzusteigen beginnt, verringert sich der Strom durch die LED. Man kann auch messen, wie groß zu diesem Zeitpunkt die Kondensatorspannung ist. Erst wenn die Spannung am Kondensator unter etwa 2 V sinkt, wird die LED dunkler.

Messung

Eine Spannung wird grundsätzlich zwischen zwei Punkten einer Schaltung gemessen. Wenn von der „Spannung am Kollektor“ die Rede ist, ist das eigentlich nicht korrekt. Gemeint ist dann „die Spannung zwischen Kollektor und Masse“, wobei mit Masse der gemeinsame Bezugspunkt der Schaltung gemeint ist. In diesem Fall ist es der Minuspol der Betriebsspannung, den man an allen sechs Stiftkontakten in der unteren Reihe findet. Oft ist es sinnvoll, das Minuskabel eines Spannungsmessgeräts dauerhaft mit dem Minuspol der Schaltung zu verbinden. Für eine Messung muss dann nur noch der Pluspol an einen Messpunkt gehalten werden.

4

4.6 | Langsame Entladung

Die vorige Schaltung hatte eine Anfangsphase, bei der sich die LED-Helligkeit nicht änderte. Aber in dieser Zeit hat der Kondensator besonders viel Ladung verloren. Wenn die Leuchtzeit insgesamt länger sein soll, muss man den Entladestrom am Anfang verringern. Das geschieht hier durch einen Emittterwiderstand. Bei eingeschalteter LED hebt der Spannungsabfall die Emitterspannung an und damit auch die Basisspannung. Am Basiswiderstand liegt eine kleinere Spannung, und damit verringert sich auch der Entladestrom. Die Zeit mit relativ hoher Helligkeit verdoppelt sich ungefähr auf etwa 6 Sekunden.

Durch diese Form der Emitter-Gegenkopplung bekommt die Schaltung einen höheren Eingangswiderstand. Man kann den Eingangswiderstand an der Basis als Produkt aus Emittterwiderstand * Stromverstärkungsfaktor berechnen und kommt dann auf rund $500\text{ k}\Omega$. Dazu muss man den Basiswiderstand von $330\text{ k}\Omega$ addieren. Der Entladewiderstand ist also wesentlich größer geworden, und deshalb wird die Entladung langsamer.

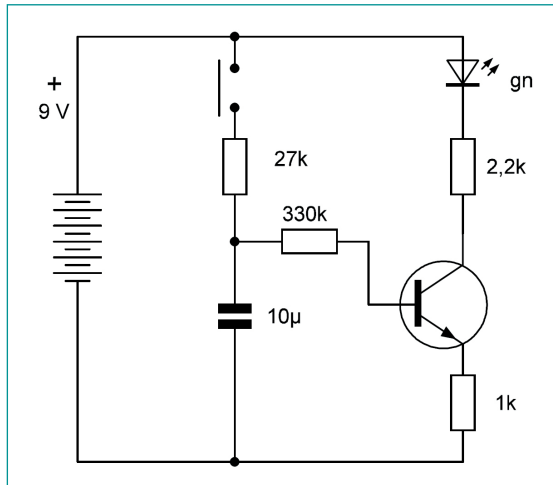


Abb. 4.12: Verwendung eines Emittterwiderstands

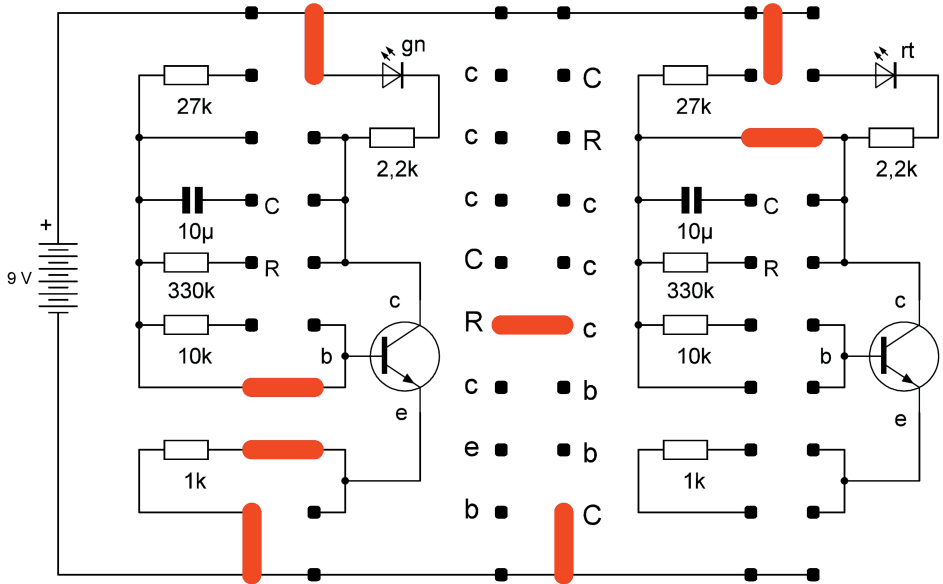


Abb. 4.13: Verlangsamte Entladung

Eine Messung der Emitterspannung zeigt, dass auch diese Schaltung einen Sättigungsstrom hat. In den ersten Sekunden beträgt die Emitterspannung etwa 2 V, es fließt also ein Strom von 2 mA. In dieser Zeit ist der Transistor voll durchgesteuert, und die Batteriespannung teilt sich auf die LED (ca. 2,6 V), den Vorwiderstand von 2,2 k Ω und den Emitterwiderstand von 1 k Ω auf. Dann beginnt der Strom zu sinken.

Messungen

Die Schaltung eignet sich gut, um die Eigenschaften eines Transistors in einem weiten Bereich unterschiedlicher Kollektorströme zu untersuchen. Wie ändert sich der Kollektorstrom in Abhängigkeit von der Basis-Emitter-Spannung? Am besten geht das, wenn man zwei Messgeräte gleichzeitig verwendet. Eines misst die Spannung am Emitterwiderstand mit $1\text{ k}\Omega$. Eine Spannung von 1 V bedeutet dann einen Emitterstrom von 1 mA . Ein zweites Messgerät misst direkt die Basis-Emitter-Spannung. Die folgende Messung zeigt typische Ergebnisse, die aber von Fall zu Fall etwas abweichen können.



Basisspannung U_{be} in mV	Kollektorstrom I_c in μA
0	0
380	0,1
400	0,2
432	0,5
449	1
466	2
486	4
502	8
522	16
536	32
555	64
575	125
595	250
615	500
635	1000
655	2000

Wer die Messwerte genau betrachtet, erkennt vielleicht eine Gesetzmäßigkeit. Jede Erhöhung der Basisspannung um etwa 20 mV führt zu einer Verdoppelung des Kollektorstroms. Das bedeutet, dass der Strom exponentiell mit der Basisspannung ansteigt. Wenn man die Messwerte in einem Diagramm aufträgt, erkennt man den steilen Anstieg. Während die Basisspannung sich relativ wenig ändert, sieht man beim Kollektorstrom sehr große Unterschiede. Aus der Kurve wird auch deutlich, dass man in vielen Fällen mit der Näherung arbeiten kann, dass die Basis-Emitter-Spannung etwa 0,6 V beträgt.

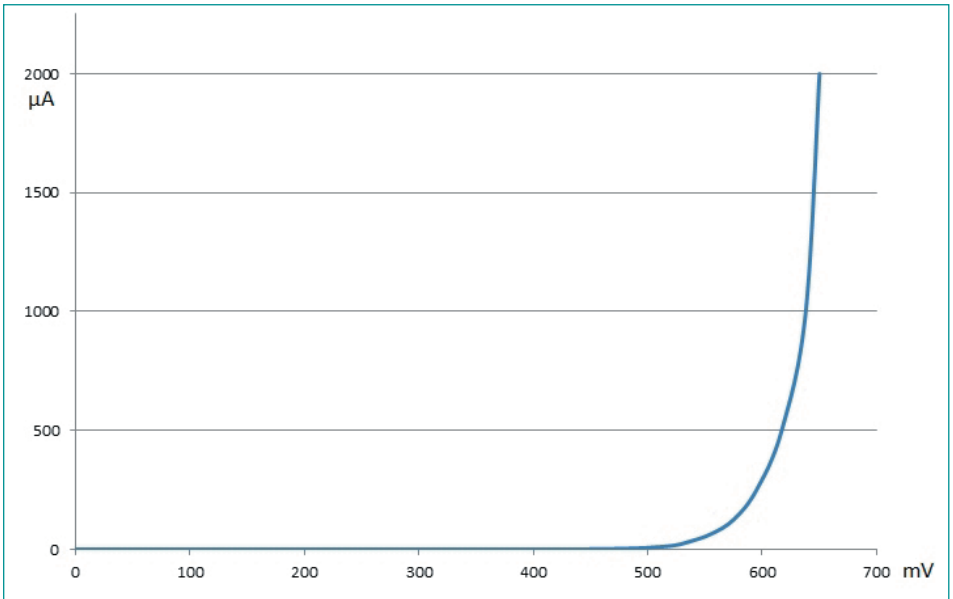


Abb. 4.14: Der Kollektorstrom aufgetragen gegen die Basisspannung

Das Verhältnis der Kollektorstromänderung zur Basisspannungsänderung eines Transistors bezeichnet man auch als seine Steilheit. Die gemessene Kennlinie zeigt die Steilheit anschaulich als Steigung der Kurve. Man sieht deutlich, dass die Steilheit mit dem Kollektorstrom größer wird.

Die Messungen zeigen, dass man für einen Anstieg von 1 mA auf 2 mA die Basisspannung um 20 mV erhöhen muss. Daraus ergibt sich eine mittlere Steilheit von $S = 1 \text{ mA} / 0,02 \text{ V} = 50 \text{ mA/V}$. Tatsächlich ist die Steilheit aber bei 2 mA schon höher als bei 1 mA. Für sehr kleine Spannungsänderungen findet man bei einem Kollektorstrom von 1 mA eine Steilheit von 40 mA/V.

Eine Spannungsänderung von nur 1 mV würde den Kollektorstrom von 1 mA also um 40 μA verändern. Der Spannungsabfall an einem Widerstand von 2,2 V ändert sich dabei um 88 mV. Die Spannungsänderung am Kollektor wäre also 88 Mal größer als die an der Basis. Man sagt, dass die Schaltung eine 88-fache Spannungsverstärkung hat. Je nach Arbeitspunkt kann die Spannungsverstärkung auch noch größer sein, sodass ein Transistor etwa eine 100-fache Spannungsverstärkung erreichen kann.

4

Bei einem ungünstigen Arbeitspunkt kann die Verstärkung allerdings wesentlich kleiner ausfallen und sogar kleiner als 1 werden. Ein solcher Fall tritt ein, wenn der Transistor bereits voll angesteuert ist und sich der Kollektorstrom in der Sättigung befindet. Dann führt nämlich eine Änderung der Basisspannung kaum noch zu einer Änderung der Kollektorspannung.

5 VERSTÄRKER UND SENSOREN

Zwei Transistoren verstärken mehr als einer. Das gilt besonders für die Darlington-Schaltung, bei der ein schon verstärkter Strom von einem zweiten Transistor noch einmal verstärkt wird. Der Name stammt von ihrem Erfinder Sidney Darlington, der schon 1952 auf diese Idee kam. Beide Kollektoren sind verbunden, und der Emitter des ersten Transistors führt zur Basis des zweiten. Die Darlington-Schaltung verhält sich wie ein einzelner Transistor mit riesiger Verstärkung.

5.1 | Der Berührungssensor

Nun reicht schon der aller kleinste Basisstrom, um eine LED einzuschalten. Die offenen Kontakte können mit dem Finger berührt werden wie in Abbildung 4.5. Es genügt schon eine ganz leichte Berührung für die volle Helligkeit. Der Hautwiderstand ist stark von der Hautfeuchtigkeit abhängig. Aber diesmal funktioniert es sogar mit einer gerade gründlich gewaschenen und sorgfältig abgetrockneten Hand.

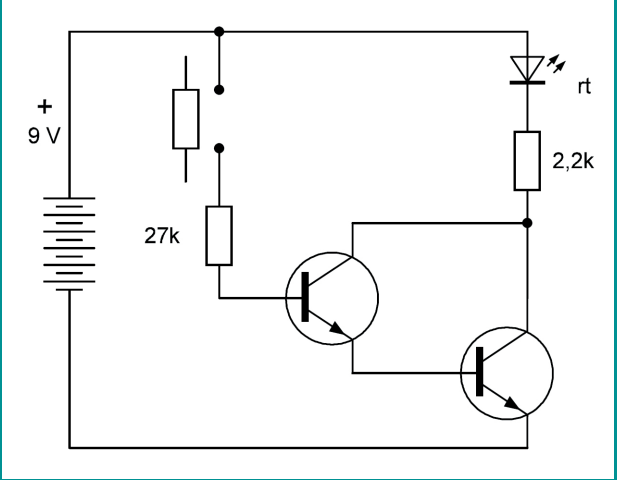


Abb. 5.1: Die Darlington-Schaltung

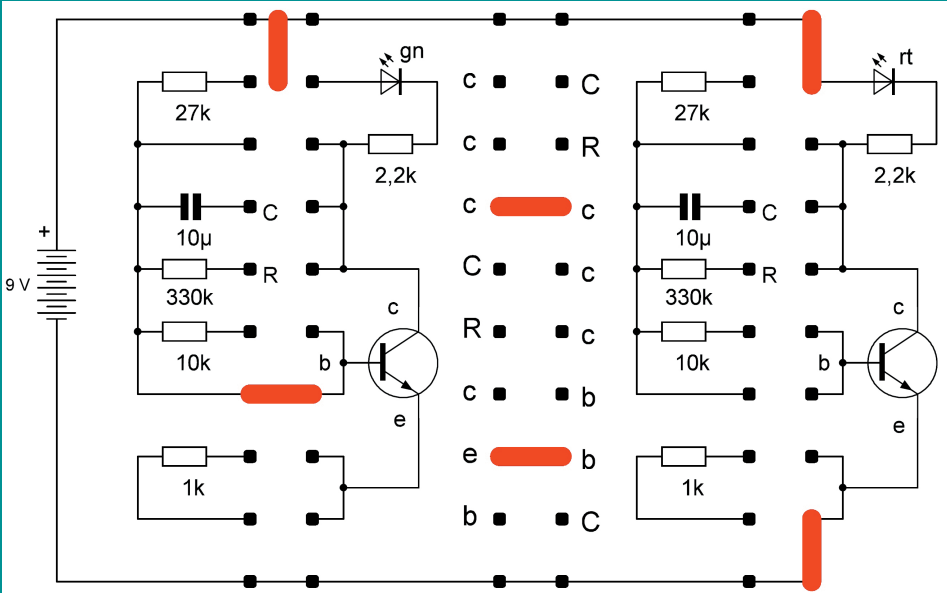


Abb. 5.2: Einschalten durch Berührung

5

Messung

Wie groß ist eigentlich die Basis-Emitter-Spannung eines Darlington-Transistors? Man kann vermuten, dass es ungefähr 1,2 V bis 1,4 V sind, weil zwei Basis-Emitter-Strecken in Reihe geschaltet sind. Für die Messung kann man den Basiswiderstand mit einem Jumper nach Plus verbinden. Das Voltmeter zeigt es dann: tatsächlich ungefähr 1,3 V.

5.2 | Der Elektrofeldsensor

Wenn man mit Schuhen auf einem Teppich oder auf einem Kunststoffboden herumschlurft, kann man sich leicht so weit elektrisch aufladen, dass die Entladung an einer Türklinke richtig weh tut. Der Körper erreicht dabei Spannungen von einigen tausend Volt. Jeder kennt auch Versuche, bei denen ein Kamm oder ein Lineal an einem Tuch gerieben wird und sich dabei elektrisch auflädt. Dabei entstehen elektrische Kräfte, mit denen man Papierschnipsel bewegen kann. Elektrische Aufladungen gibt es immer und überall, aber meist bemerkt man sie nicht, weil sie zu klein sind. Mit zwei Transistoren kann man sie aber leicht nachweisen.

Der Versuch verwendet wieder eine Darlington-Schaltung, mit der sich kleinste Ströme verstärken lassen. Der Eingang ist aber nirgendwo angeschlossen. Wenn nun eine elektrische Kraft auf einen Draht oder die Kupferbahn der Platine wirkt, werden Elektronen angezogen oder abgestoßen. Elektrische Kräfte verschieben also elektrische Ladungen. Dadurch entsteht ein winziger Strom, der durch die Darlington-Schaltung verstärkt und mit der LED angezeigt wird.

Zum Test kann man einfach eine Hand annähern und wieder zurückziehen. Wenn die LED beim Annähern aufleuchtet, war der eigene Körper positiv aufgeladen. Wenn sie beim Zurückziehen der Hand aufleuchtet, war man negativ geladen. Man kann aber auch die ganze Platine in die Hand nehmen und umhergehen. Oft wird dann die LED bei jedem Schritt einmal aufleuchten.

Auch elektrische Wechselfelder in der Nähe von Netzkabeln können nachgewiesen werden. Bei einem starken Wechselfeld leuchtet die LED scheinbar dauerhaft. Aber wenn man genauer hinsieht, erkennt man ein schnelles Flackern. Die LED geht 50 Mal in der Sekunde an und aus. Die Empfindlichkeit der Schaltung kann sehr einfach erhöht werden, indem man den Minuspol berührt.

Die Ähnlichkeit mit dem Berührungssensor aus dem vorigen Versuch fällt jedem gleich auf. Und tatsächlich kann man die LED auch durch Berühren von zwei Kontakten einschalten. Man muss auch gar nicht so genau treffen. Es reicht, wenn man von oben auf die Kontakte auf der Plus-Seite fasst.

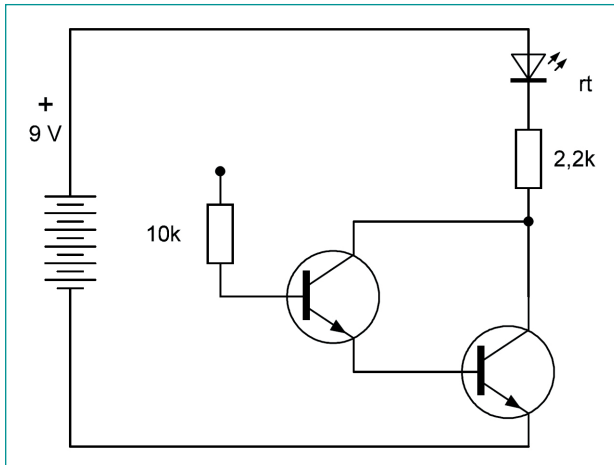


Abb. 5.3:
Ein offener Eingang

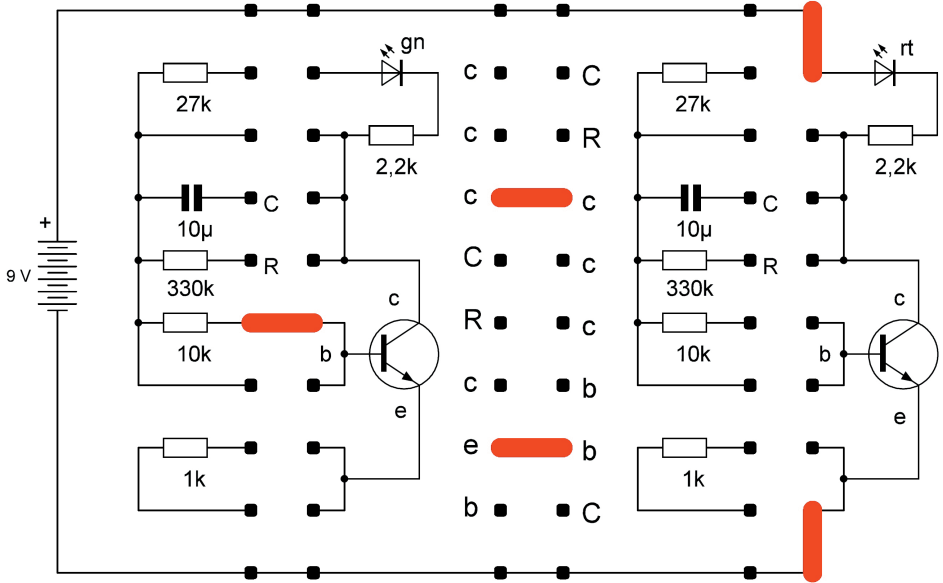


Abb. 5.4: Anzeige elektrischer Felder

5.3 | Der Lichtsensor

Eine LED leitet den Strom in Durchlassrichtung und sperrt ihn in Gegenrichtung. Aber wenn Licht von außen auf den LED-Kristall fällt, fließt auch in Sperrrichtung ein kleiner Strom. Er ist allerdings sehr viel kleiner als ein Mikroampere und wird meist überhaupt nicht bemerkt. Mit einer Darlington-Schaltung hat man jedoch so viel Verstärkung, dass der verstärkte Strom eine LED deutlich zum Leuchten bringt. Je heller es ist, desto heller leuchtet auch die rote LED.

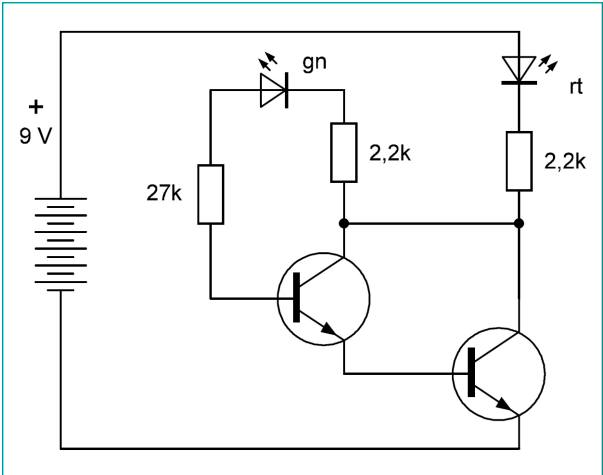


Abb. 5.5: Der Sensorverstärker

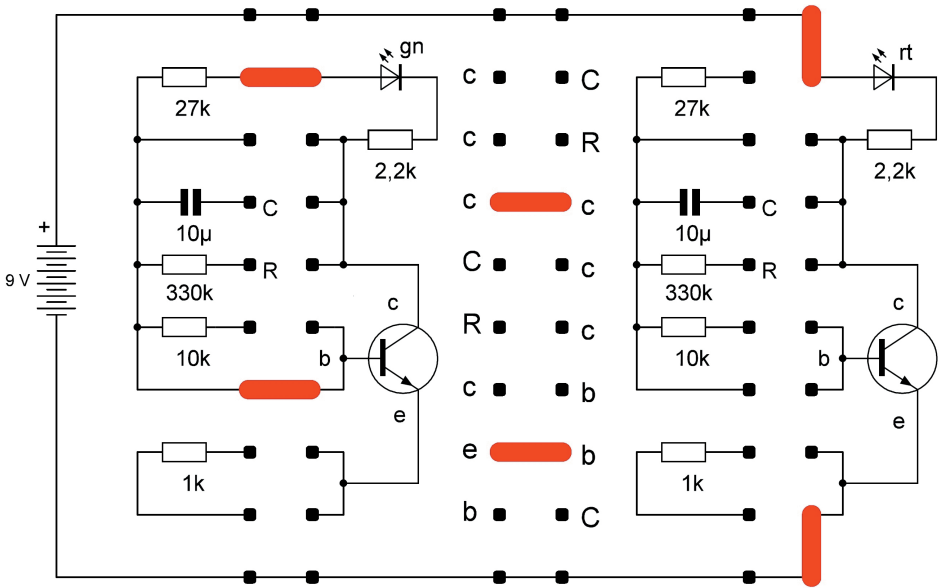


Abb. 5.6: Sensor-LED in Sperrrichtung

5

5.4 | Ausschalten bei Berührung

Mit einer Berührung konnte bisher schon eine LED eingeschaltet werden. Aber es geht auch umgekehrt: Nun soll die LED im Ruhezustand an sein, aber ausgehen, wenn man die Kontakte berührt. Die Aufgabe erinnert etwas an die Alarmanlage. Dort war die Lösung, die Basisspannung kurzzuschließen. Und diesmal ist es genauso, mit einem kleinen Unterschied. Der Kurzschluss wird nicht durch einen Draht oder eine Steckbrücke erreicht, sondern durch den linken Transistor. Wenn er leitet, schaltet er den rechten Transistor ab.

Im Ruhezustand leuchtet die rote LED. Und bei einer Berührung wird sie abgeschaltet. Aber nicht vollständig, denn eine sehr kleine Resthelligkeit bleibt erhalten. Das liegt an dem $330\text{-k}\Omega$ -Basiswiderstand, der zum Kollektor führt. Durch ihn fließt weiterhin ein kleiner Strom, auch wenn kein Basisstrom mehr vorhanden ist.

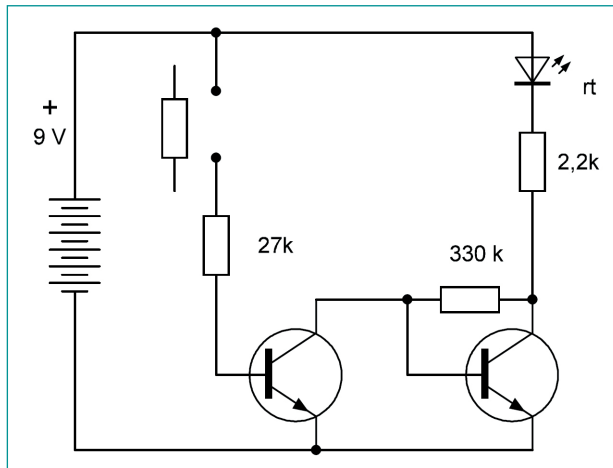


Abb. 5.7: Kollektor-Basis-Kopplung

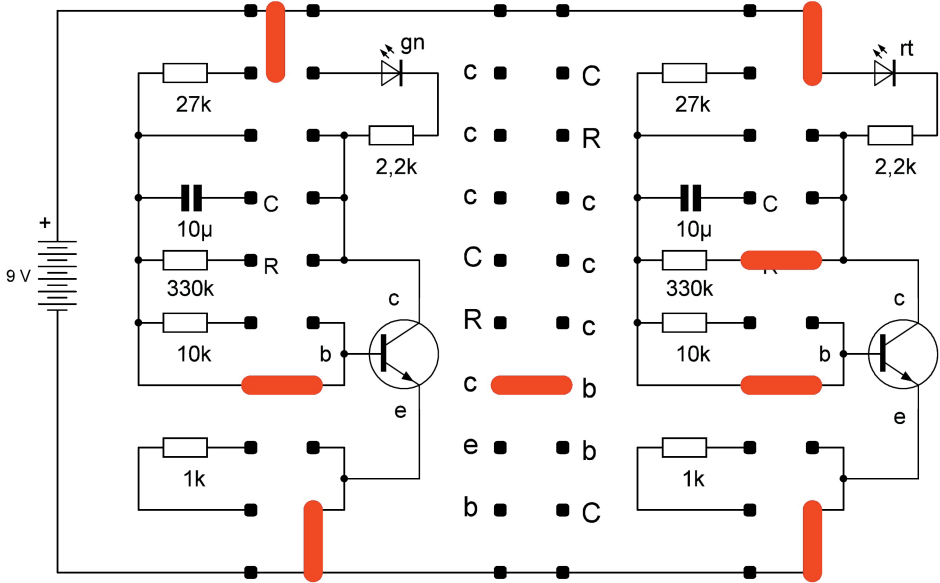


Abb. 5.8: Der Berührungsschalter

Eine andere Version dieser Schaltung legt den Basiswiderstand nicht an den Kollektor sondern an Plus. Diesmal wird der 27-k Ω -Widerstand verwendet. Auch durch ihn fließt im Aus-Zustand ein Strom, aber er fließt eben nicht durch die LED. Deshalb geht die LED diesmal vollständig aus. Aber weil der Strom durch den neuen Basiswiderstand wesentlich größer ist, braucht man auch einen größeren Sensorstrom am Eingang des ersten Transistors. Die Berührung muss also etwas niederohmiger ausfallen. Es kann sogar nötig sein, den Finger für den Versuch leicht anzufeuchten, damit die rote LED wirklich ausgeht.

5

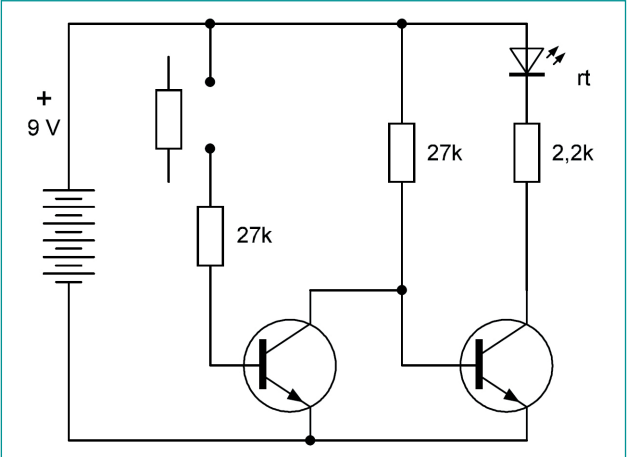


Abb. 5.9: Die abgewandelte Schaltung

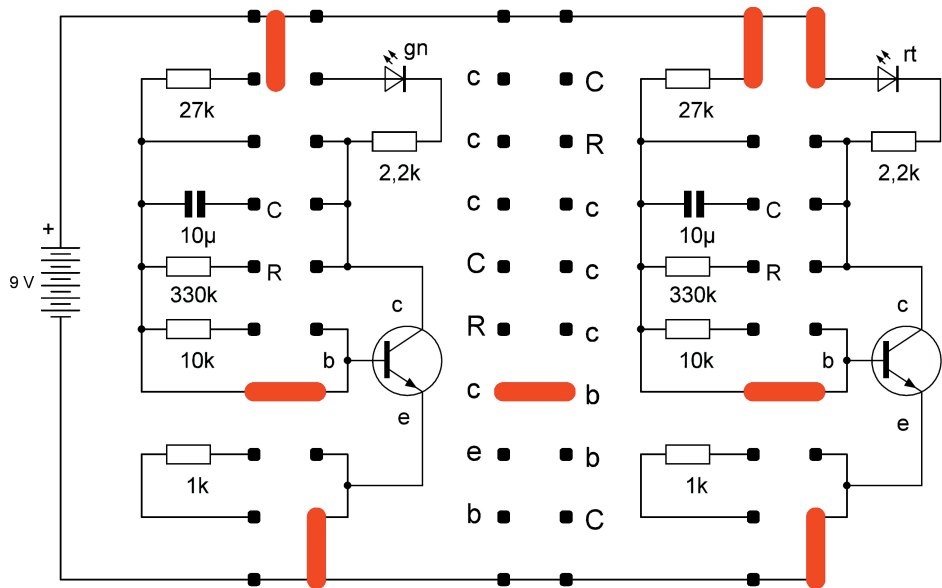


Abb. 5.10: Abschaltung ohne Reststrom

6 ARBEITSPUNKT UND STABILISIERUNG

Ein Transistor kann als Verstärker oder Steuerelement für die unterschiedlichsten Aufgaben eingesetzt werden. Je nach Anwendung soll ein größerer oder kleinerer Kollektorstrom fließen. Die genaue Stromstärke bezeichnet man auch als den Arbeitspunkt einer Schaltung. Es gibt viele Einflüsse auf den Arbeitspunkt. Und es gibt unterschiedliche Methoden, einen stabilen Strom einzustellen.

6.1 | Gegenkopplung

Während Widerstände mit Toleranzen von nicht mehr als 5 % gefertigt werden, muss man beim Stromverstärkungsfaktor eines Transistors mit wesentlich größeren Abweichungen rechnen. Ein BC547C kann einen Verstärkungsfaktor im Bereich von 420 bis 800 haben. Da ist es eine Herausforderung, Schaltungen zu entwickeln, die trotzdem in jedem Fall gleich gut funktionieren. Eine der einfachsten und oft schon ausreichenden Maßnahmen ist die Gegenkopplung vom Kollektor auf die Basis.

Wenn man den Basiswiderstand nicht nach Plus verbindet, sondern zum Kollektor, stellt sich ein mittlerer Kollektorstrom ein. Wäre nämlich der Transistor immer noch voll durchgesteuert, würde er sich selbst den Basisstrom abschalten. Ein größerer Kollektorstrom bewirkt einen größeren Spannungsabfall am Arbeitswiderstand und damit eine kleinere Spannung am Basiswiderstand. Dieses Prinzip nennt man Gegenkopplung. Es führt automatisch zu einem mittleren Kollektorstrom. Das kann man daran erkennen, dass die LED bei einer externen Verbindung zwischen Kollektor und Emitter deutlich heller wird.

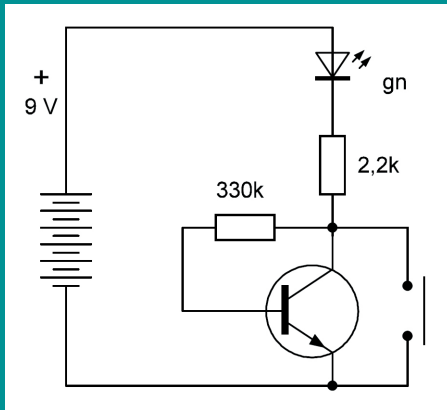


Abb. 6.1: Basis-
widerstand am
Kollektor

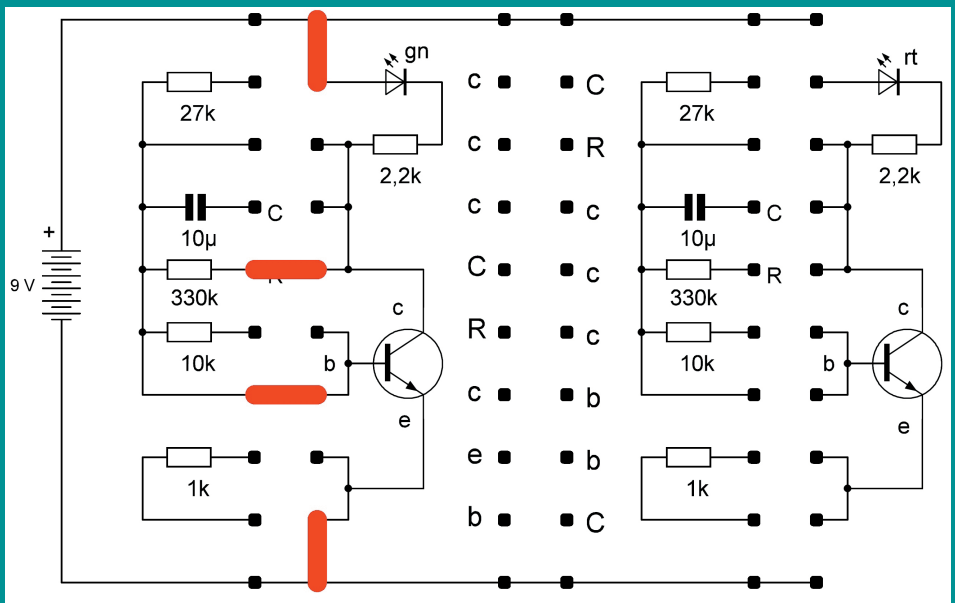


Abb. 6.2: Mittlere
Helligkeit

6

Messungen

Der Transistor ist in dieser Schaltung weder ganz ausgesteuert noch ganz gesperrt. Deshalb ist es nun möglich, die Stromverstärkung zu bestimmen.

$$U_{be} = 0,64 \text{ V}$$

$$U_{ce} = 2,07 \text{ V}$$

$$U_{rc} = 4,63 \text{ V}$$

$$I_c = U_{rc} / R_c = 4,63 \text{ V} / 2,2 \text{ k}\Omega = 2,10 \text{ mA}$$

$$U_{rb} = U_{ce} - U_{be} = 2,07 \text{ V} - 0,64 \text{ V} = 1,43 \text{ V}$$

$$I_b = U_{rb} / R_b = 1,43 \text{ V} / 330 \text{ k}\Omega = 4,33 \text{ }\mu\text{A}$$

$$\beta = I_c / I_b = 2100 \text{ }\mu\text{A} / 4,33 \text{ }\mu\text{A} = 485$$

Der Transistor hatte also eine 485-fache Stromverstärkung. Laut Datenblatt beträgt der Stromverstärkungsfaktor des BC547C bei einem Kollektorstrom von 2 mA zwischen 420 und 800. Das Messergebnis liegt mit 485 im erwarteten Bereich. Eine eigene Messung könnte etwas andere Ergebnisse bringen. Wer es ganz genau wissen will, wiederholt den Versuch mit dem anderen Transistor auf der Platine. Beide Transistoren sind zwar von der gleichen Bauart, müssen aber nicht die gleiche Verstärkung haben. Größere Abweichungen sind durchaus üblich.

6.2 | Arbeitspunkt-Stabilisierung

Die vorige Schaltung hatte bereits einen mittleren Arbeitspunkt, der aber immer noch von der Stromverstärkung des Transistors abhängig war. Bei einer solchen Schaltung muss man immer mit Abweichungen rechnen und beachten, inwieweit das für die Aufgabe relevant ist.

Diese Schaltung ist fast völlig unabhängig von den Daten des Transistors und wird im Bereich der Stromverstärkung von 100 bis 800 gleich gut arbeiten. Dafür sorgt eine Gegenkopplung, die auf dem Spannungsabfall am Emitterwiderstand beruht. Die Spannung an der Basis wird durch einen Spannungsteiler festgelegt. Die Emitterspannung stellt sich dann von selbst so ein, dass eine Basis-Emitter-Spannung von etwa 0,6 V herrscht. In diesem Fall kann man eine Basis-Spannung von 2,6 V berechnen. Daraus ergeben sich eine Emitterspannung von 2 V und ein Kollektorstrom von 2 mA.

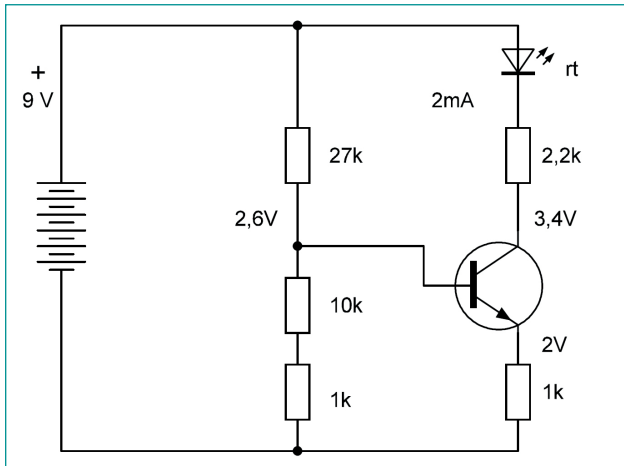


Abb. 6.3:
Emitter-
Gegenkopplung

Die Spannungen sind im Schaltbild an einzelnen Messpunkten eingetragen. Gemeint ist jeweils die Spannung gegen Masse, also gegen den gemeinsamen Minuspol.

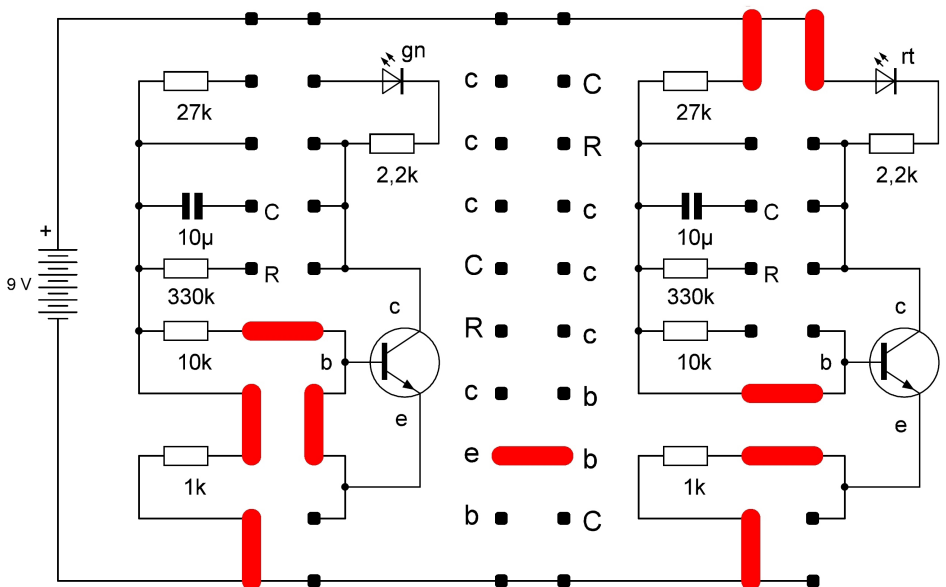


Abb. 6.4: Konstanter
Kollektorstrom 2 mA

6

6.3 | Arbeitspunkt-Anpassung

Für viele Aufgaben ist ein mittlerer Arbeitspunkt wichtig, sodass man den Strom in beide Richtungen gleich weit aussteuern kann. Dafür ist es erforderlich, den Strom gegenüber der letzten Schaltung noch etwas zu reduzieren. In diesem Fall ist das möglich, indem ein weiterer Widerstand in den Spannungsteiler eingesetzt wird. Die Basisspannung beträgt nun nur noch 2 V, und der Arbeitspunkt wird auf 1,4 mA stabilisiert. Dabei findet man eine Kollektorspannung im Bereich von 4,5 V, also gerade bei der halben Betriebsspannung.

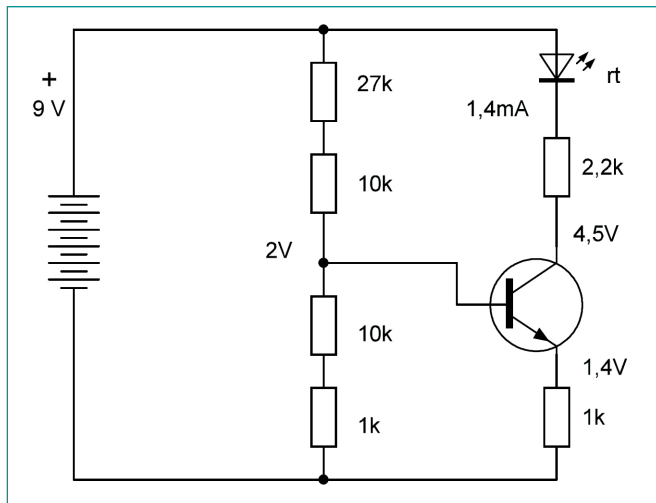


Abb. 6.5: Verringerte Basisspannung

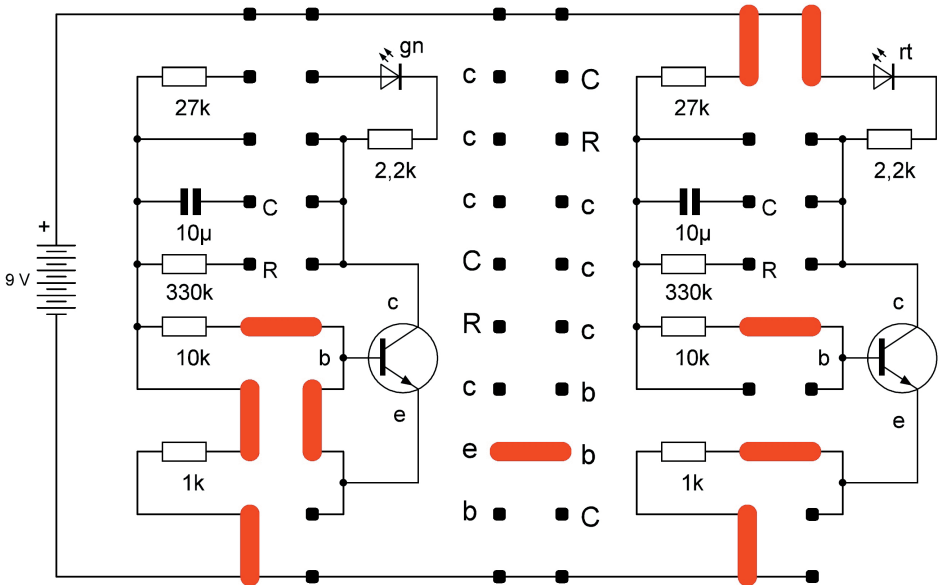


Abb. 6.6: Ein Kollektorstrom von 1,4 mA

Alle im Schaltbild angegebenen Spannungen lassen sich leicht überprüfen. Dabei wird man immer gewisse Abweichungen finden. Hier wirken sich die genaue Batteriespannung und sogar die Temperatur aus, wobei sich die Basis-Emitter-Spannung bei gleichem Strom um etwa -2 mV pro Grad ändert.

Messungen

Möglichst viele Messungen sind nützlich, um ein Gefühl für die Schaltungen zu bekommen. Oft muss man entscheiden, welche Abweichungen vom erwarteten Ergebnis noch im normalen Bereich liegen. Mit genügend Übung erkennt man schnell, ob eine Schaltung wie gewünscht funktioniert oder ob ein Fehler vorliegt.

6.4 | Temperaturkompensation

Ein weiterer Transistor im Spannungsteiler kompensiert den Temperatureinfluss. Unter der Voraussetzung, dass beide Transistoren die gleiche Temperatur haben, hebt sich der Einfluss weitgehend auf. Bei höheren Temperaturen würde die Basisspannung sinken, die Emitterspannung aber fast unverändert bleiben.

6

Während der Temperatureinfluss ohnehin recht gering ist, hat sich der Arbeitspunkt jetzt insgesamt auf 0,3 mA verschoben. Und er ist weiterhin stark von der Batteriespannung abhängig.

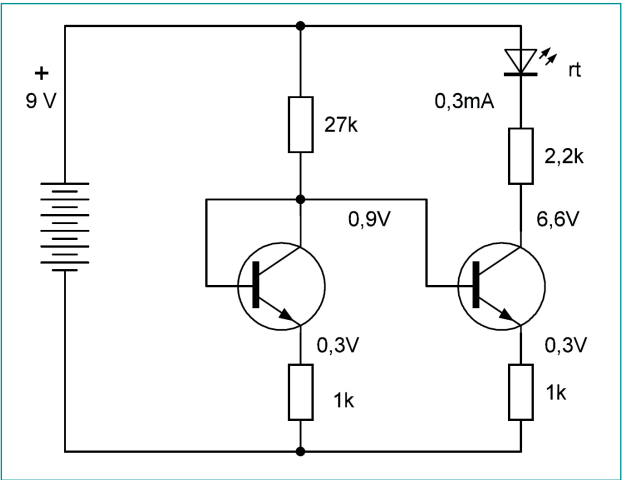


Abb. 6.7:
Temperaturstabiler
Arbeitspunkt

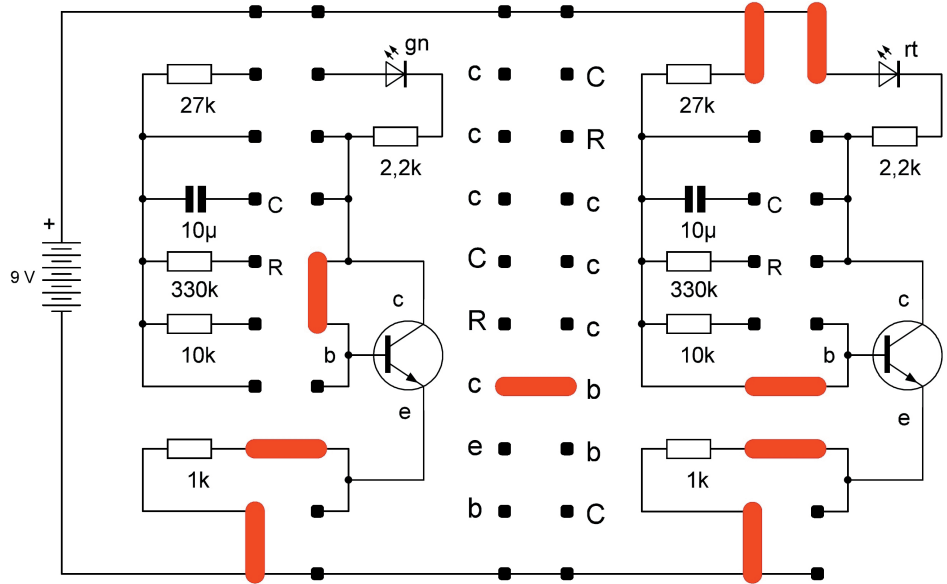


Abb. 6.8:
LED-Strom 0,3 mA

6.5 | Konstantstromquelle

Normalerweise hängt der Strom in einer Schaltung auch vom momentanen Zustand der Batterie ab. Wenn die Spannung sinkt, wird auch der Strom kleiner. Bei der folgenden Schaltung ist das anders. Der Strom wird automatisch nachgeregelt, sodass er in weiten Bereichen der Batteriespannung konstant bleibt. Ein zu großer Strom erhöht den Spannungsabfall am Emitterwiderstand, sodass der rechte Transistor stärker leitet. Dadurch steigt auch der Spannungsabfall an seinem Kollektorwiderstand, sodass die Kollektorspannung sinkt. Und deshalb bekommt der linke Transistor weniger Basisstrom und verringert auch den Kollektor- und Emitterstrom.

Im Endeffekt stellt sich ein Strom ein, bei dem der Spannungsabfall am Emitterwiderstand gerade etwa 0,6 V beträgt. Weil die Basisströme sehr viel kleiner sind als die Kollektorströme, kann man sie in der Überlegung vernachlässigen. Der Kollektorstrom (und damit der LED-Strom) beträgt also 0,6 mA. Wie man leicht erkennt, bestimmt der Emitterwiderstand den eingestellten Strom, denn bei 0,6 V zwischen Basis und Emitter beginnt der rechte Transistor gerade zu leiten.

Die Schaltung ist wieder in gewissem Maße von der Temperatur abhängig. Konkret würde eine Temperaturerhöhung des rechten Transistors um 50 Grad den Strom von 0,6 mA auf 0,5 mA verringern. Eine genaue Messung könnte das zeigen. Die Helligkeit der LED würde sich allerdings nicht merklich ändern.

6

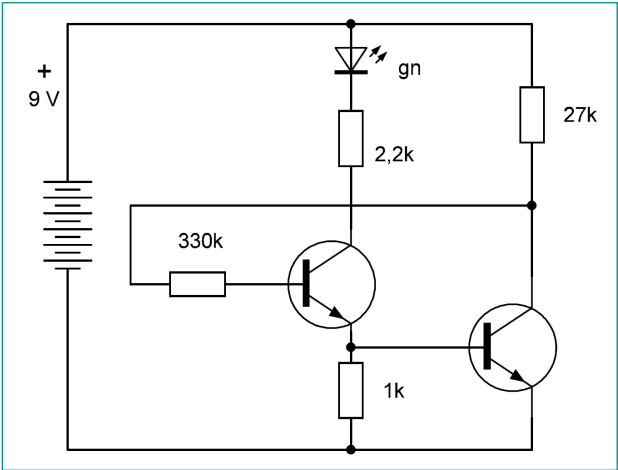


Abb. 6.9: Stabilisierung des Kollektorstroms

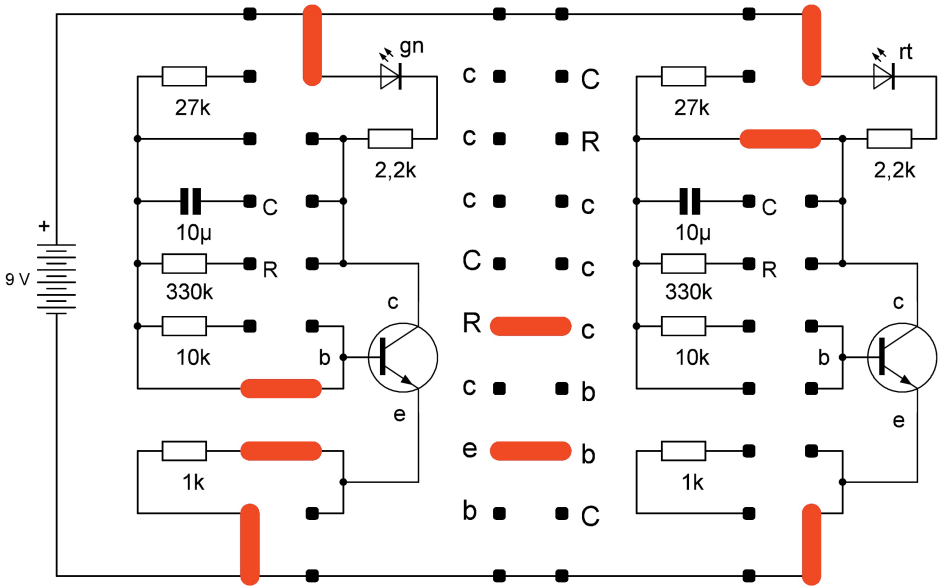


Abb. 6.10: Stromquelle mit 0,6 mA

7 DIMMER UND ZEITSTEUERUNG

Ein Transistor schaltet den Strom in weniger als einer Mikrosekunde ein oder aus. Wenn es langsamer gehen soll, braucht man einen Kondensator, denn seine Spannung ändert sich bei kleinem Ladestrom nur allmählich. Besonders lange Zeiten erreicht man mit Kondensatoren und Transistoren.

7.1 | Gutenacht-Licht

Die Lampe soll nach dem Ausschalten noch lange nachleuchten und dann ganz allmählich schwächer werden. Lange Zeiten erreicht man, wenn der Kondensator zwischen Basis und Kollektor eingebaut wird. Eine solche Schaltung nennt man einen Integrator, weil die Ausgangsspannung sich mit dem Eingangsstrom und der Zeit ändert. Ein größerer Strom oder eine längere Zeit ergeben also eine größere Änderung der Ausgangsspannung. Beim Einschalten des Basisstroms ändert sich die LED-Helligkeit langsam und erreicht erst nach einigen Sekunden ihr Maximum.

Öffnet man den Schalter, sorgt nur noch der geringe Basisstrom für eine Änderung der Kondensatorspannung. Und die Änderung der Kollektorspannung wirkt der schnellen Entladung entgegen. Während nämlich die Basisspannung geringfügig sinkt, steigt die Kollektorspannung stark an. Die Änderung wird dadurch verlangsamt. Die Schaltung arbeitet so wie ein wesentlich größerer Kondensator zwischen Basis und Emitter.

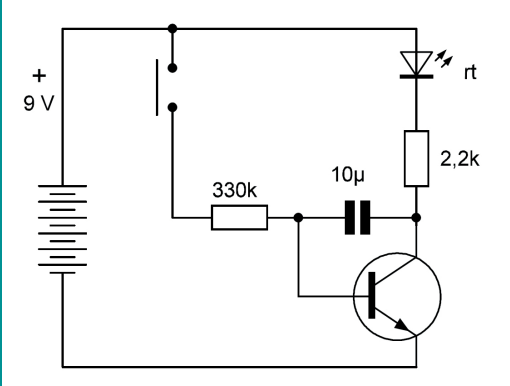


Abb. 7.1:
Der Integrator

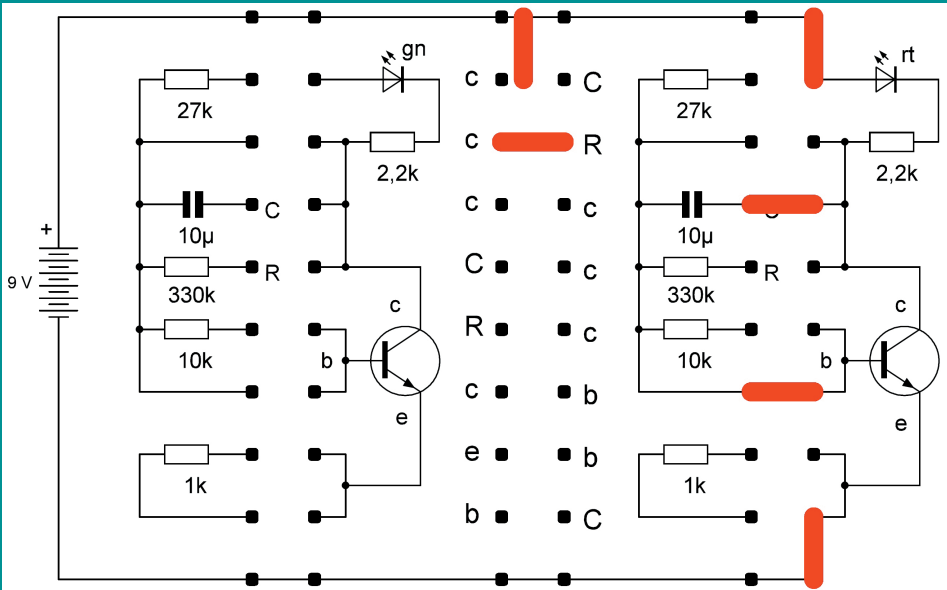


Abb. 7.2: Verlang-
samte Lichtsteu-
erung

7

Messung

Zeitlicher Verlauf des Kollektorstroms nach geöffnetem Kontakt:

Zeit in s	LED-Strom in μA
0	3000
5	1800
10	300
15	45
20	13
25	7
30	5

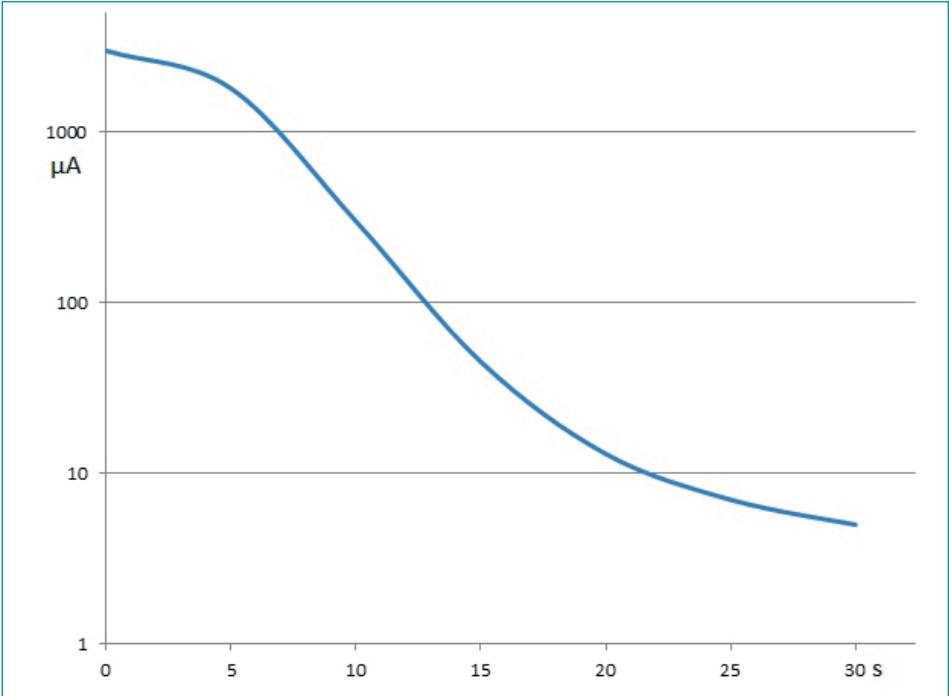


Abb. 7.3: Der Stromverlauf nach dem Anschalten

Zur Beurteilung der Messergebnisse eignet sich ein Diagramm. Die Stromstärke wurde im logarithmischen Maßstab aufgetragen, weil das besser dem Sinneseindruck des menschlichen Auges entspricht. Das Diagramm bestätigt den subjektiven Eindruck von der LED-Helligkeit. Sie ändert sich einige Sekunden lang kaum merklich, wird dann deutlich schwächer und geht am Ende sehr langsam gegen null.

7.2 | Ende-Abschaltung

Bei den bisher gebauten Nachlaufsteuerungen war auch nach sehr langer Zeit immer noch eine Resthelligkeit vorhanden. Wenn man möchte, dass die Lampe irgendwann ganz ausgeht, muss ein zusätzlicher Entladewiderstand eingebaut werden. Er sorgt dafür, dass die Basisspannung schließlich deutlich unter 0,6 V sinkt, sodass der Transistor völlig sperrt. Zusammen mit dem Entladewiderstand von $330\text{ k}\Omega$ erreicht man eine Nachleuchtdauer von etwa 5 s. Am Ende dauert es nur eine Sekunde, bis das Licht völlig ausgeht.

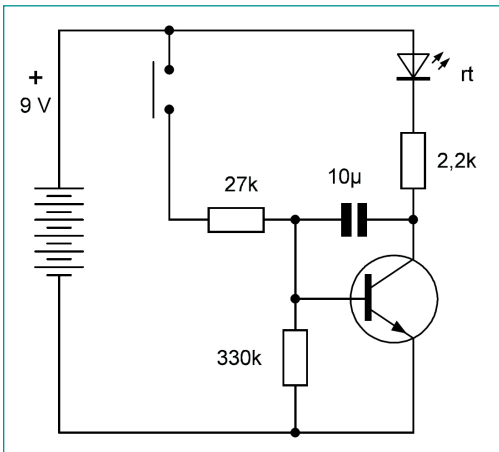


Abb. 7.4: Zusätzliche Entladung über $330\text{ k}\Omega$

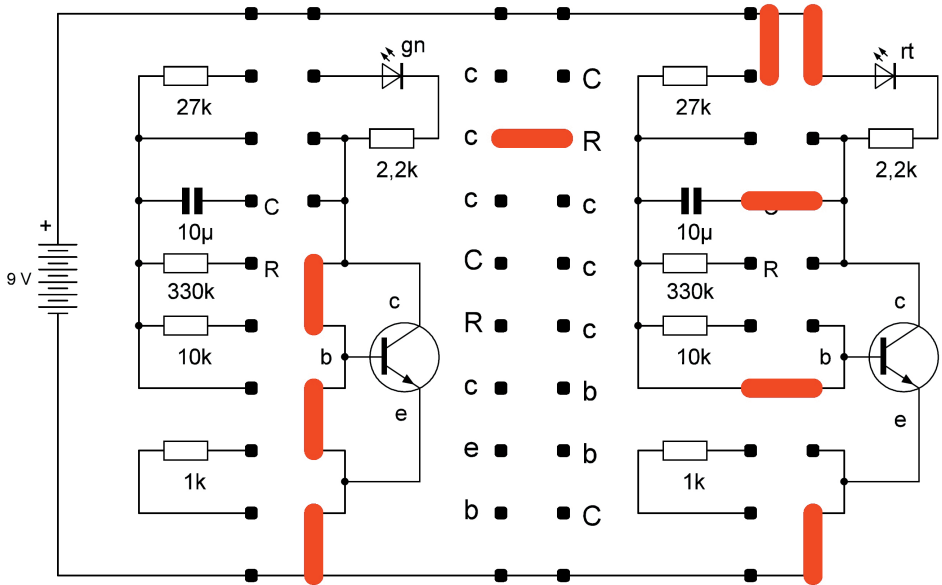


Abb. 7.5: Abschaltung nach fünf Sekunden

7.3 | Kino-Lichtsteuerung

Die Beleuchtung in einem Kinosaal wird nicht abrupt eingeschaltet oder ausgeschaltet, sondern ganz langsam, damit die Augen der Besucher sich gut an die veränderten Lichtverhältnisse gewöhnen können. Damit es wirklich langsam geht, wird diesmal ein Integrator mit einem besonders großen Eingangswiderstand von $660\text{ k}\Omega$ verwendet. Mit der oberen Brücke wird das Licht langsam aufgeblendet. Vor dem Beginn des Films bleibt der Jumper gesteckt, und damit hat man eine gleichbleibende Helligkeit, bei der jeder seinen Platz finden kann.

Kurz bevor der Film beginnt, wird der Kontakt geöffnet. Nun wird es bereits ganz langsam dunkler, so langsam, dass man es kaum bemerkt und die Augen sich an die Dunkelheit gewöhnen können. Kurz bevor es dann richtig losgeht, steckt man den unteren Jumper auf. Dann beschleunigt sich die Verdunkelung, bis das Licht völlig ausgeht. Und wenn der Film zu Ende ist, wird das Licht langsam wieder aufgeblendet.

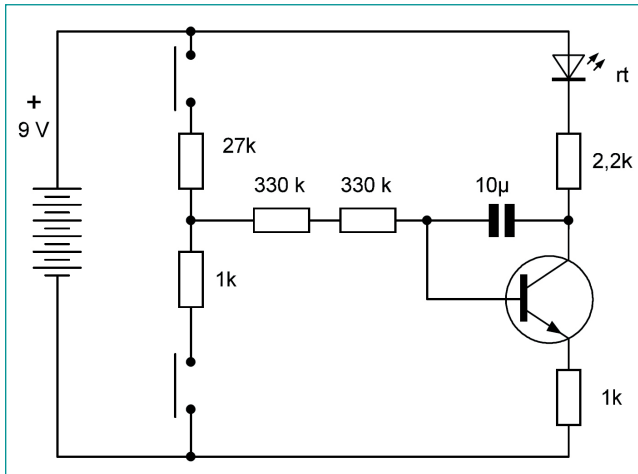


Abb. 7.6: Verlangsamte Steuerung

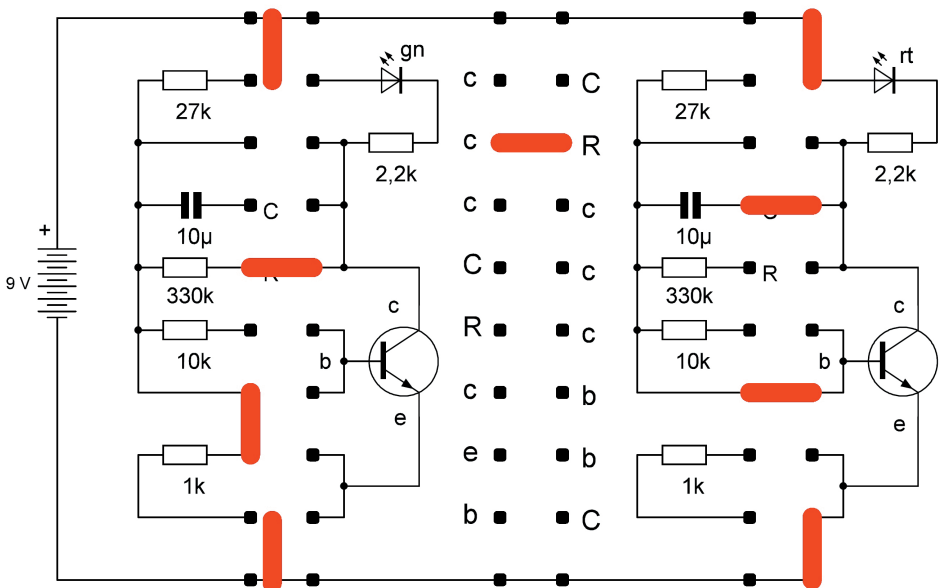


Abb. 7.7: Auf- und Ablenden

7

7.4 | Touch-Dimmer

Wenn man den Integrator mit einer Darlington-Schaltung aufbaut, ändert sich die Helligkeit nur noch so langsam, dass sie als konstant empfunden wird. Durch Berühren der Kontakte kann man nun jede beliebige Helligkeit einstellen. Alternativ kann man auch Jumper verwenden, um die Lampe schnell an- oder auszuschalten. Und wenn man mal das Ausschalten vergisst, ist das auch nicht schlimm. Es dauert dann etwa eine Stunde, bis das Licht von allein ausgeht oder nur noch so schwach leuchtet, dass der Stromverbrauch keine Rolle mehr spielt.

Die Darlington-Schaltung bekommt einen zusätzlichen Emitterwiderstand, um die Änderungsgeschwindigkeit beim Abdunkeln zu erhöhen. Weil die Basis-Emitter-Spannung der Darlington-Schaltung nur etwa 1,2 V beträgt, fließt beim Berühren des unteren Kontakts nur ein sehr kleiner Strom, während beim Aufdimmen mit dem oberen Kontakt mehr Strom fließt. Mit dem Emitterwiderstand wird die Eingangsspannung etwas angehoben. So gleichen sich die Geschwindigkeiten etwas an.

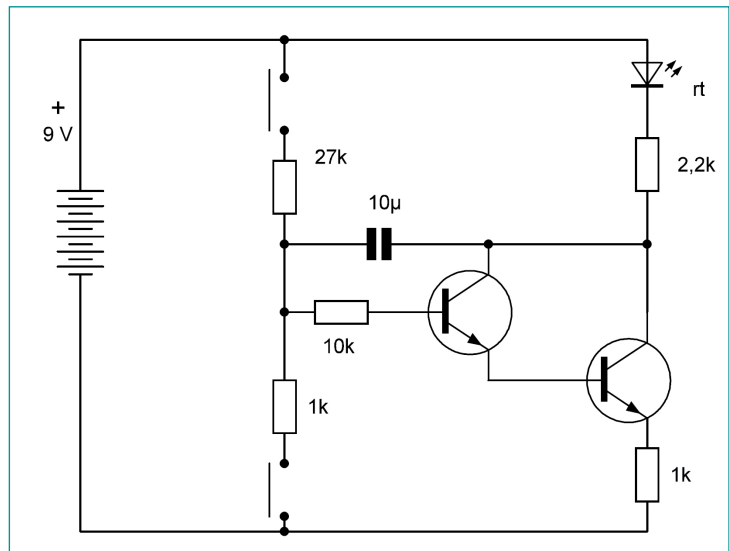


Abb. 7.8: Integrator
in Darlington-Schal-
tung

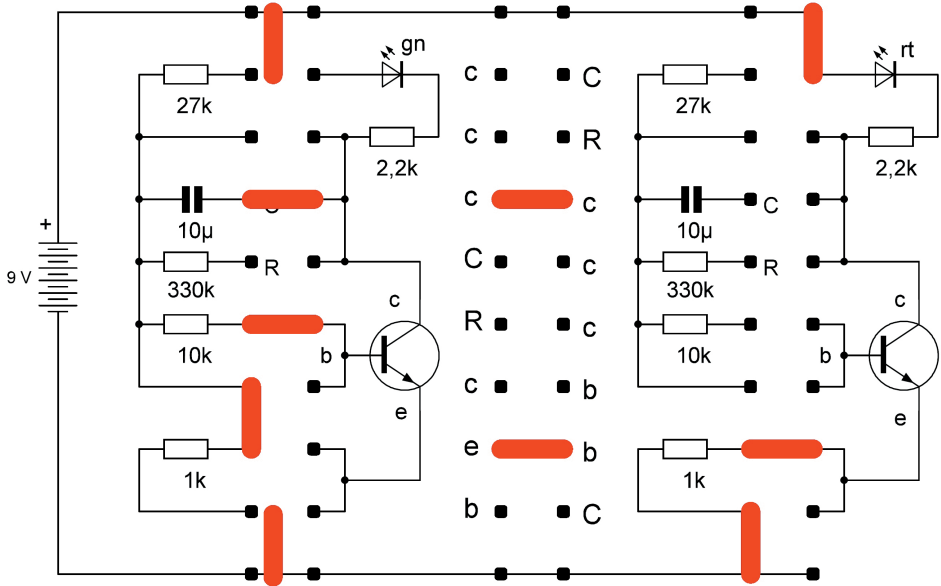


Abb. 7.9: Auf- und Abdimmen

Der Dimmer kann sehr einfach als einstellbare Stromquelle zur Messung von LED-Kennlinien verwendet werden. Die eingestellte Stromstärke lässt sich indirekt über den Spannungsabfall am Emittorwiderstand messen. Die LED-Spannung muss direkt gemessen werden, wobei statt der roten LED auch die grüne LED eingeschaltet werden kann. Dies ist in diesem Fall besonders einfach, weil beide Kollektoren zusammengeschaltet sind. Für die Messung werden Messwertepaare der Stromstärke und der LED-Spannung notiert, und zwar erst für eine LED und dann für die andere.

Messung

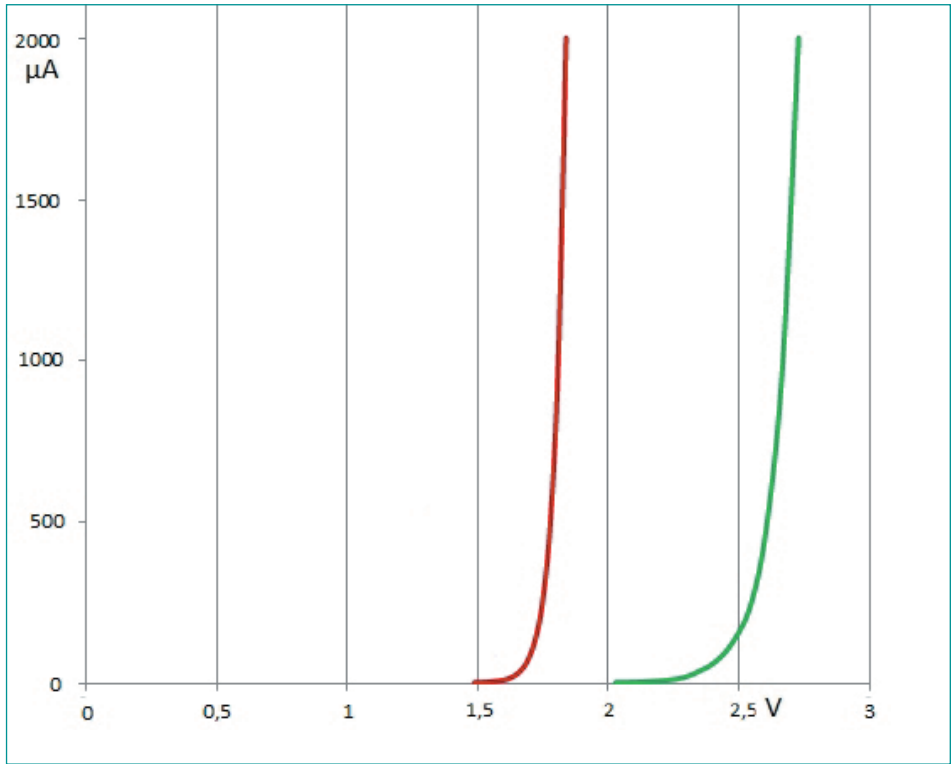


Abb. 7.10: Kennlinien der roten und der grünen LED

Das Diagramm in Abbildung 7.10 zeigt die gemessenen Kennlinien für die rote und für die grüne LED. Man erkennt den exponentiellen Verlauf der Kennlinien und die wesentlich höhere Spannung der grünen LED. Das erklärt die Funktion des Farbumschalters in Abschnitt 2.4 und wird auch im folgenden Abschnitt angewandt.

7.5 | Abend-Licht

Diese Lampe erleichtert den Übergang vom Tag zur Nacht, weil sie nicht nur sehr langsam dunkler wird, sondern am Ende auch noch die Farbe verändert. Nach dem Start mit der oberen Steckbrücke leuchten beide LEDs mit voller Helligkeit. Nach dem Öffnen des Kontakts wird das Licht ganz langsam dunkler. Nach etwa einer Stunde geht zuerst die grüne LED ganz aus. Die rote LED leuchtet dann noch lange nach und wird dabei

immer schwächer. Das rote Restlicht reicht aus, um die Lampe auch bei völliger Dunkelheit leicht zu finden. Dann reicht eine leichte Berührung mit dem Finger, um das Licht wieder etwas heller zu stellen. Umgekehrt kann man mit dem unteren Jumper das Licht ohne Verzögerung abschalten.

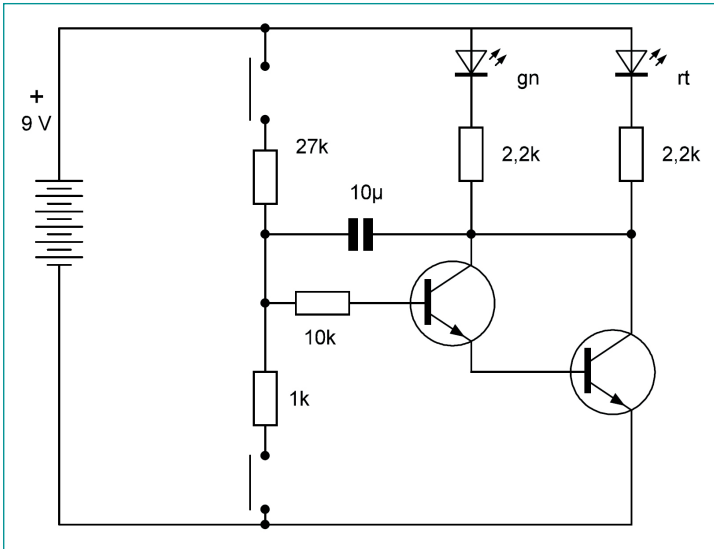


Abb. 7.11: Integrator mit zwei parallelen LEDs

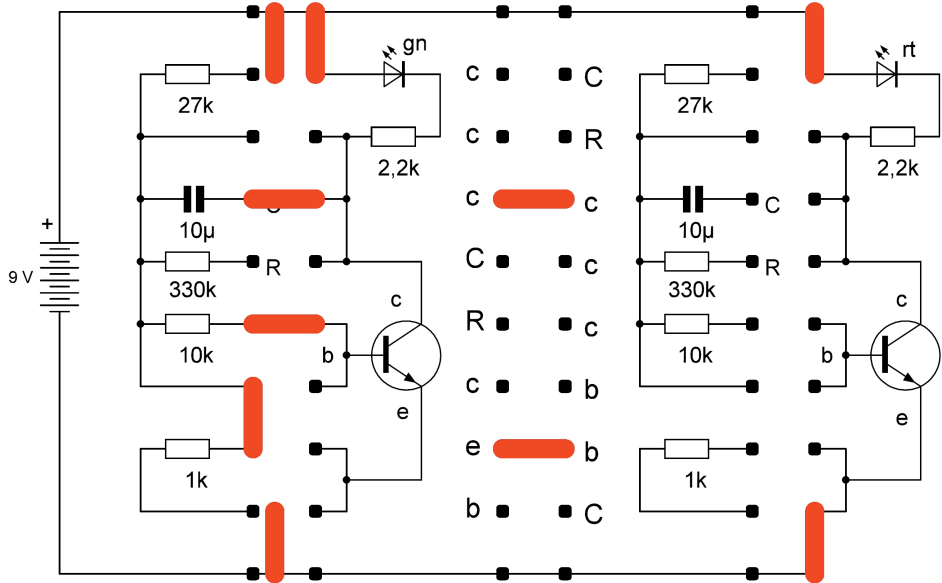


Abb. 7.12: Zweifarbi-
ge Nachtlampe

7.6 | Verzögerter Berührungsschalter

Alte Truhen hatten oft kunstvoll ausgeführte Geheimschlösser, die man kaum entdecken konnte. Aber so etwas geht auch elektronisch. Ein Berührungsschalter soll eine Aktion ausführen, die aber nur der Eingeweihte kennt, und die möglichst nicht zufällig entdeckt werden kann. Eine Möglichkeit dazu ist eine Zeitverzögerung. Wer die Funktion nicht kennt, probiert in schneller Folge alles aus und kommt zu keinem Ergebnis. Nur der Besitzer weiß genau, wo er wie lange anfassen muss, damit etwas passiert.

Die meisten der bisherigen Verzögerungsschalter konnten bei einer Berührung mit dem Finger eingeschaltet werden und gingen von allein wieder aus. Aber es geht auch andersherum. Die folgende LED-Schaltung ist im Ruhezustand an und geht bei Berührung aus. Sie entspricht damit dem Berührungsschalter in Abschnitt 5.4. Aber diesmal wurde noch ein Kondensator eingefügt, der zu einer starken Verlangsamung führt. Erst wenn man einige Sekunden lang den Kontakt berührt, geht die LED aus. Die Verzögerungszeit hängt stark von der Hautfeuchtigkeit ab. Man könnte die Aufgabe daher für andere erschweren, indem man fordert, dass die Platine nur mit frisch gewaschenen und sorgfältig getrockneten Händen

berührt werden darf. Die Verzögerung funktioniert auch umgekehrt. Man steckt zunächst den Jumper und schaltet damit die rote LED aus. Wenn man ihn dann abzieht, geht die LED erst nach etwa fünf Sekunden an.

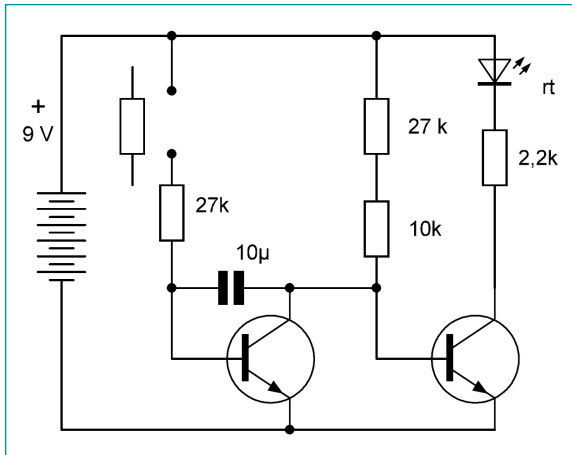


Abb. 7.13: Verzögerte Abschaltung

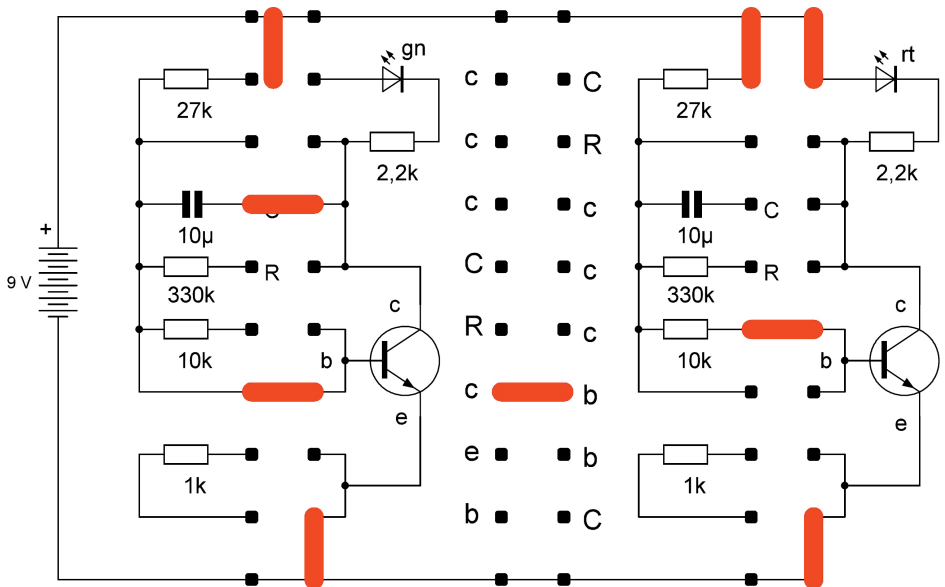


Abb. 7.14: Verzögertes Aus- und Einschalten

7

Die Schaltung hat noch den Nachteil, dass sie erst funktioniert, wenn der Finger des Benutzers eine ausreichende Leitfähigkeit hat. Da hilft ein noch größerer Widerstand, der aber zwischen Basis und Kollektor des zweiten Transistors angeschlossen wird. Nun braucht der linke Transistor weniger Basisstrom für die Abschaltung. Und noch eine Änderung ergibt sich aus dieser Variante: Auch im ausgeschalteten Zustand zeigt die LED nun eine geringe Resthelligkeit.

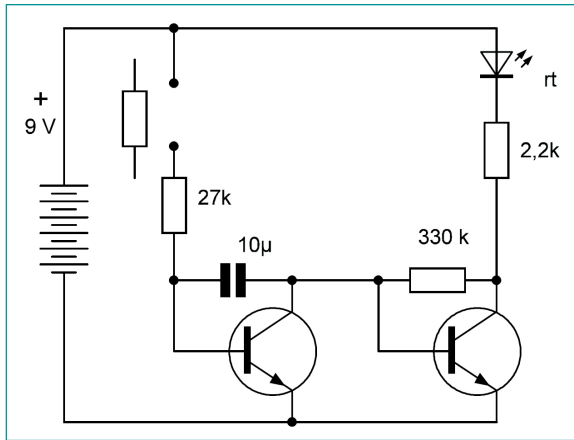


Abb. 7.15: Hochohmige Ansteuerung

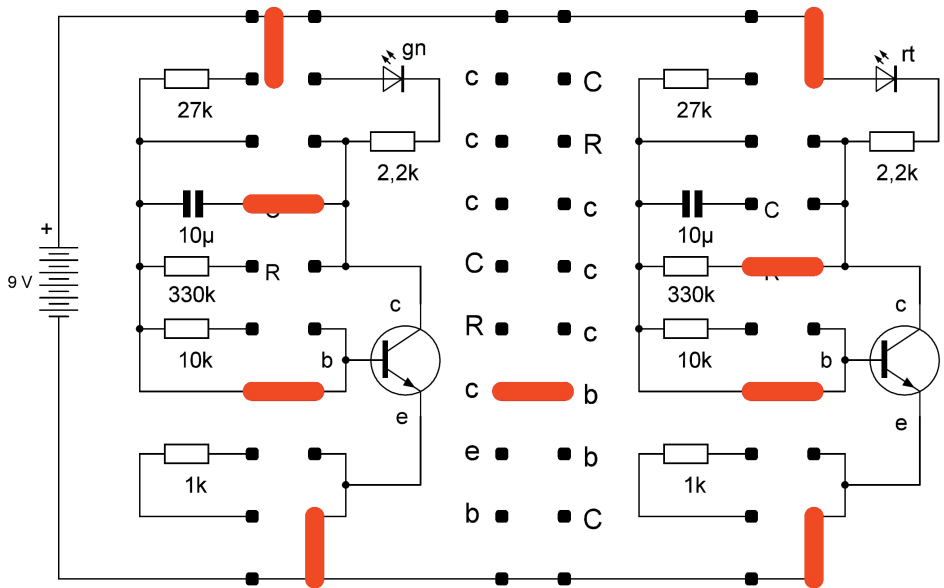


Abb. 7.16: Der empfindliche Sensor-schalter

8 STROMSPIEGEL UND TEMPERATUR- SENSOREN

Ein Stromspiegel ist eine Schaltung aus zwei Transistoren, die so verbunden sind, dass sie gleiche Basisspannungen und daher auch gleiche Kollektorströme haben. Wenn man den Kollektorstrom des ersten Transistors durch einen Widerstand einstellt, fließt ein gleich großer Strom durch den zweiten Transistor. Bildlich gesprochen wird der eingestellte Strom gespiegelt.

8.1 | Einstellung der LED-Helligkeit

Bei der Stromspiegelschaltung verwendet man eine direkte Verbindung zwischen Basis und Kollektor am linken Transistor. Das funktioniert wie eine starke Gegenkopplung. Die Basisspannung stellt sich von selbst so ein, dass sie zu dem vorgegebenen Kollektorstrom führt. In diesem Fall sorgt der Widerstand von $27\text{ k}\Omega$ dafür, dass ein Strom von etwa $0,3\text{ mA}$ fließt.

Der rechte Transistor bekommt die gleiche Basisspannung. Unter der Voraussetzung, dass er genau gleiche Daten hat, fließt durch ihn ein gleich großer Strom. Die LED wird also mit dem Strom von $0,3\text{ mA}$ betrieben. Man sieht eine geringe Helligkeit. Wenn man den zweiten $27\text{-k}\Omega$ -Widerstand dazuschaltet, verdoppelt sich der LED-Strom auf $0,6\text{ mA}$.

8

Messung

Wie genau ist die Übereinstimmung der Ströme tatsächlich? Das kann von Fall zu Fall etwas unterschiedlich ausfallen. Zur Messung der Ströme kann man an zwei Widerständen die Spannungsabfälle messen und daraus die Ströme berechnen.

Linker Transistor: 8,64 V an 27 k Ω , $I_1 = 0,33$ mA

Rechter Transistor: 0,79 V an 2,2 k Ω , $I_2 = 0,36$ mA

8.2 | Temperaturabhängigkeiten

Der ideale Stromspiegel setzt zwei absolut gleiche Transistoren und gleiche Temperaturen voraus. Die Abweichungen zwischen den beiden Transistoren vom gleichen Typ BC547C sind üblicherweise gering. Aber Temperaturunterschiede können sich bemerkbar machen. Wenn man einen der Transistoren mit dem Finger berührt und damit leicht erwärmt, ändert sich der LED-Strom. Sehr deutlich wird der Effekt, wenn man einen der Transistoren mit einem heißen Lötkolben berührt. Eine Erwärmung des rechten Transistors erhöht die LED-Helligkeit, eine Erwärmung des linken Transistors verringert die Helligkeit. Die umgekehrte Wirkung erzielt man durch eine Abkühlung. Dazu kann man einen Transistor mit einem Löffel berühren, auf dem ein Eiswürfel liegt.

Bei konstantem Strom und steigender Temperatur verschiebt sich die Basis-Emitter-Spannung eines Transistors pro Grad um 2 mV nach unten. Wenn man also den linken Transistor um 10 Grad erwärmt, sinkt die Kollektorspannung um 20 mV. Der rechte Transistor bekommt dann eine kleinere Basissspannung und hat einen kleineren Kollektorstrom. Andere Messungen haben bereits gezeigt, dass der Kollektorstrom sich verdoppelt, wenn die Basissspannung sich um 20 mV erhöht. Man kann also davon ausgehen, dass eine Änderung um 10 Grad den Strom verdoppelt oder halbiert.

Messung

Ein Transistor eignet sich als linearer Temperatursensor, wenn man seine Basis-Emitter-Spannung misst. Bei einer Umgebungstemperatur von 20 Grad wurde in der Schaltung eine Basis-Emitter-Spannung von 600 mV gemessen. Bei einer Berührung mit dem Finger sank die Spannung auf 584 mV. Die Änderung von -16 mV bedeutet eine Temperaturerhöhung um 8 Grad. Der Transistor wurde also bis auf 28 Grad erwärmt.

8.3 | Mehr Strom

Mit einem Basiswiderstand kann das Gleichgewicht des Stromspiegels leicht verändert werden. Etwas mehr Strom erreicht man mit einem Widerstand von $10\text{ k}\Omega$ zwischen Basis und Kollektor des linken Transistors. Der geringe Basisstrom verursacht einen kleinen Spannungsabfall, der die Kollektorspannung erhöht. Damit ist die Basisspannung des rechten Transistors geringfügig höher, und der Kollektorstrom steigt an. Dieses Verfahren der Arbeitspunkt-Einstellung wird weiter unten in Abschnitt 10.3 beim Aufbau einer Blinkschaltung angewandt.

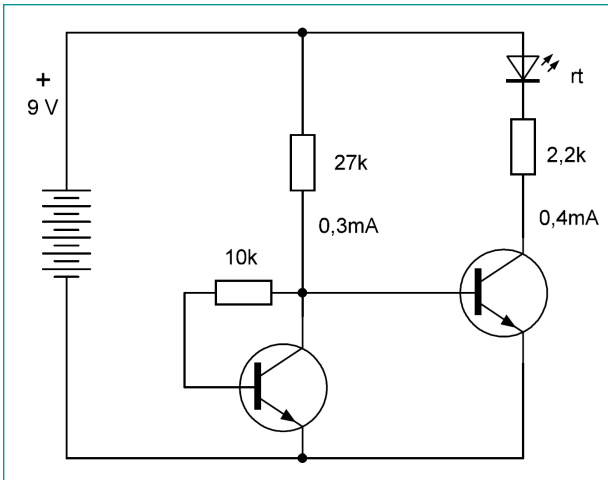


Abb. 8.3: Ein zusätzlicher Basiswiderstand

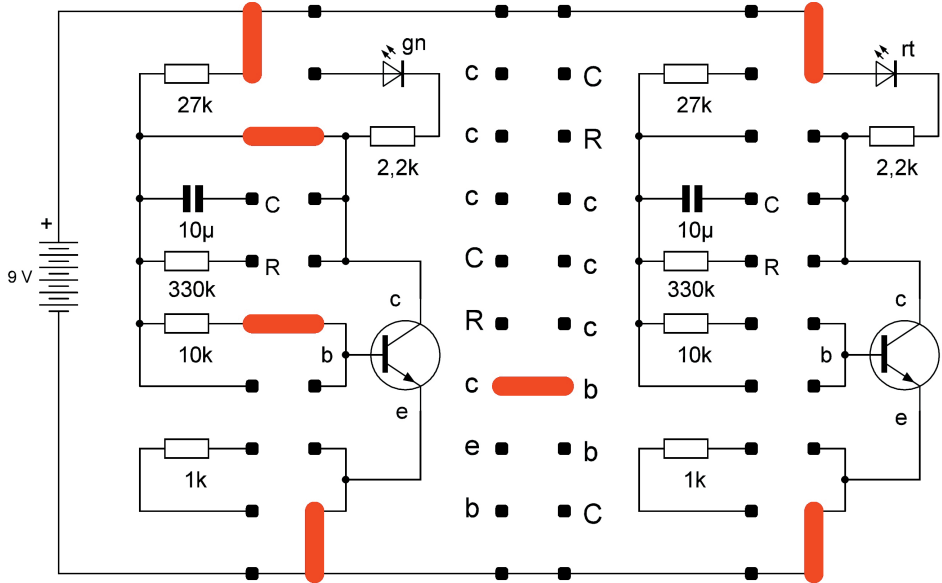
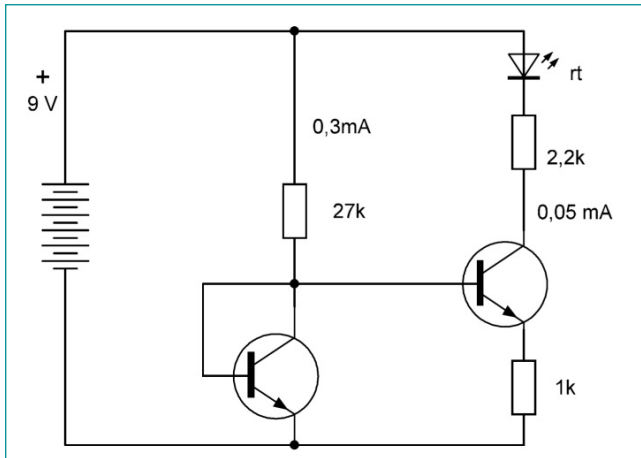
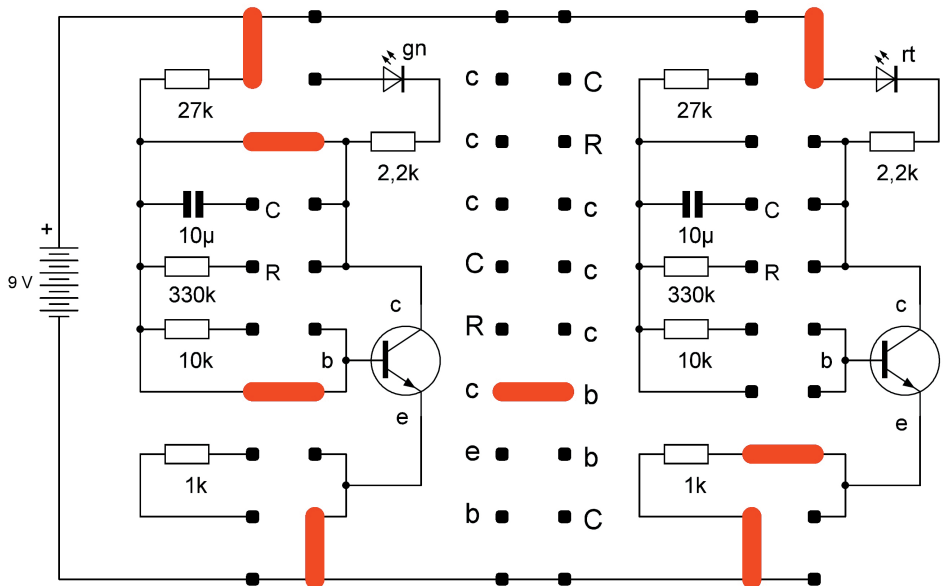


Abb. 8.4: LED-Strom 0,4 mA

8.4 | Weniger Strom

Wenn der Stromspiegel einen geringeren Strom liefern soll, kann man eine Emitter-Gegenkopplung des rechten Transistors einsetzen. Der Spannungsabfall am Emitterwiderstand hebt die Emitterspannung an und verringert damit die Spannung zwischen Basis und Emitter. Damit verringert sich der Kollektorstrom des rechten Transistors. Bei einem Emitterwiderstand von $1\text{ k}\Omega$ wird ein LED-Strom von nur noch $50\text{ }\mu\text{A}$ gemessen.

Abb. 8.5: Emit-
ter-GegenkopplungAbb. 8.6: LED-Strom
50 μ A

8.5 | Temperatur und Verlustleistung

Ein Transistor kann sich im Betrieb selbst erwärmen. Im Normalfall sind allerdings die Verlustleistungen so gering, dass man kaum etwas davon merkt. Ein Kurzschluss des Kollektorwiderstands führt jedoch zu

8

einem großen Kollektorstrom und zu einer erheblichen Leistungsaufnahme. Dass der Transistor dennoch nicht in Gefahr gerät, liegt an den beiden $47\text{-}\Omega$ -Schutzwiderständen, die den maximalen Kollektorstrom auf 100 mA begrenzen. Die maximale Verlustleistung des Transistors wird erreicht, wenn er gerade halb angesteuert wird und noch eine Kollektorspannung von $4,5\text{ V}$ hat. Dann fließt ein Kollektorstrom von 50 mA , und die Verlustleistung beträgt 225 mW . Erlaubt sind ein Strom von 200 mA und eine Verlustleistung von 500 mW .

Die tatsächliche Verlustleistung hängt auch vom Stromverstärkungsfaktor ab. Gemessen wurde eine Kollektor-Emitter-Spannung von nur noch 2 V . Damit sinkt die Betriebsspannung auf 2 V , sodass die LED nicht mehr arbeitet. Mit der gesetzten Kurzschlussbrücke geht die LED also aus. Der Transistor erwärmt sich, was man mit dem Finger spüren kann. Noch wärmer werden allerdings die beiden Schutzwiderstände von $47\text{ }\Omega$ in den Batterieleitungen.

Nach etwa drei Sekunden soll der Kurzschluss wieder entfernt werden. Die LED geht zwar unverzüglich wieder an, leuchtet aber am Anfang etwas schwächer. Erst nach einer oder zwei Sekunden wird wieder die alte Helligkeit erreicht. Der Grund dafür ist die durch den Kurzschluss verursachte Erwärmung des linken Transistors. Dadurch sinkt seine Kollektorspannung, und der rechte Transistor wird weniger angesteuert. Die Wärme wird aber schnell abgeführt, sodass der Stromspiegel nach kurzer Zeit wieder im Gleichgewicht ist.

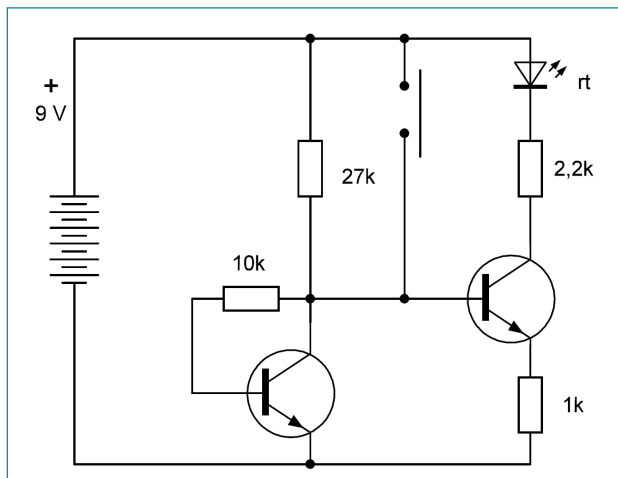


Abb. 8.7: Erwärmung durch Kurzschluss

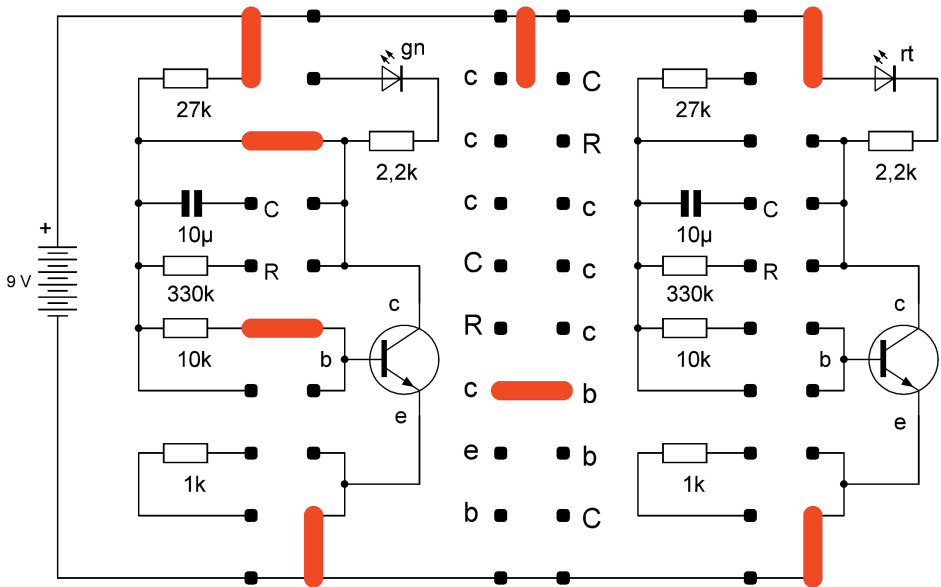


Abb. 8.8: Stromänderung bei Abkühlung

8.6 | Lampenstrom-Überwachung

Mit einem abgewandelten Stromspiegel kann man einen Lampenstrom überwachen. In einem Motorrad soll das Rücklicht überwacht werden. Ein Kontrolllämpchen zeigt die Funktion. Wenn die Lampe im Rücklicht durchbrennt, geht die Kontrollleuchte aus.

In diesem Fall wird der Strom durch die grüne LED überwacht und mit der roten LED angezeigt. Weil die Kontroll-LED weniger hell sein soll als die überwachte LED, wird die Emitter-Gegenkopplung eingesetzt. Sobald man den Strom durch die grüne LED unterbricht, geht auch die rote LED aus.

8

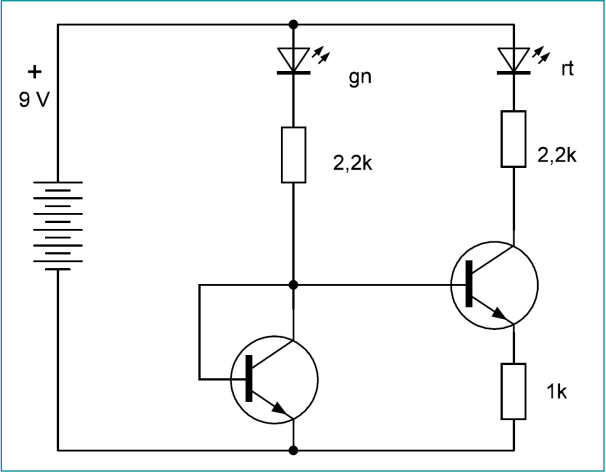


Abb. 8.9: Reduzierter Strom durch die rote LED

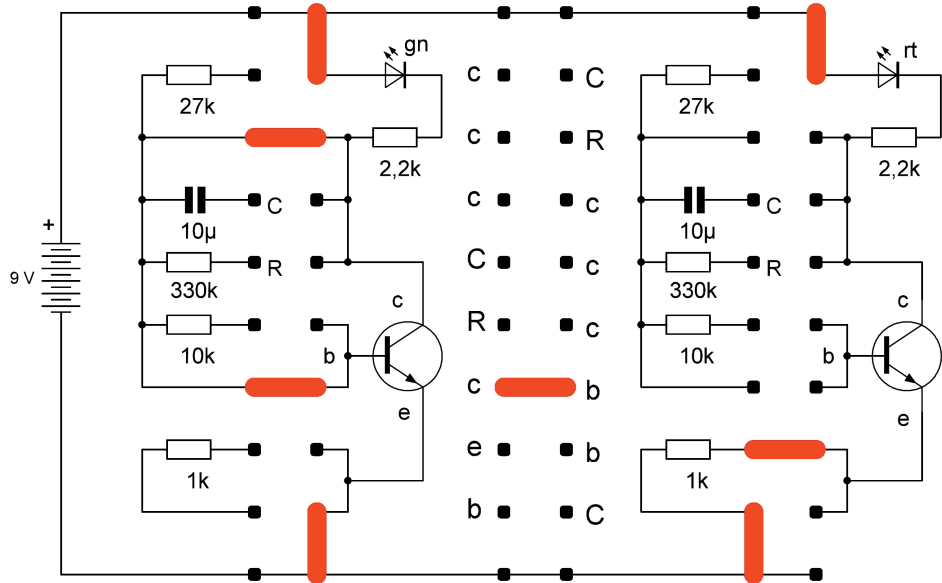


Abb. 8.10: Überwachung der grünen LED

9 DIODEN UND SPERRSCHICHTEN

Dioden sind Halbleiter-Bauelemente, die den Strom nur in einer Richtung leiten. Das gilt für LEDs genauso wie für Silizium-Dioden und Transistoren. Die Untersuchung der internen Dioden in einem Transistor dient zur einfachen Funktionskontrolle und zeigt besondere Einsatzmöglichkeiten des Transistors.

9.1 | Die BE-Diode in Durchlassrichtung

Eine Diode besteht aus zwei Halbleiter-Schichten mit N-leitendem bzw. P-leitendem Material. Im N-Leiter bewegen sich freie Elektronen, im P-Leiter dagegen Defektelektronen [Elektronen-Löcher]. An der Berührungsfläche zwischen beiden Schichten bildet sich eine nichtleitende Sperrschicht geringer Dicke. Freie Elektronen füllen in diesem Bereich Löcher, sodass keine freien Ladungsträger mehr vorhanden sind. Die Diode ist damit zunächst ein Nichtleiter.

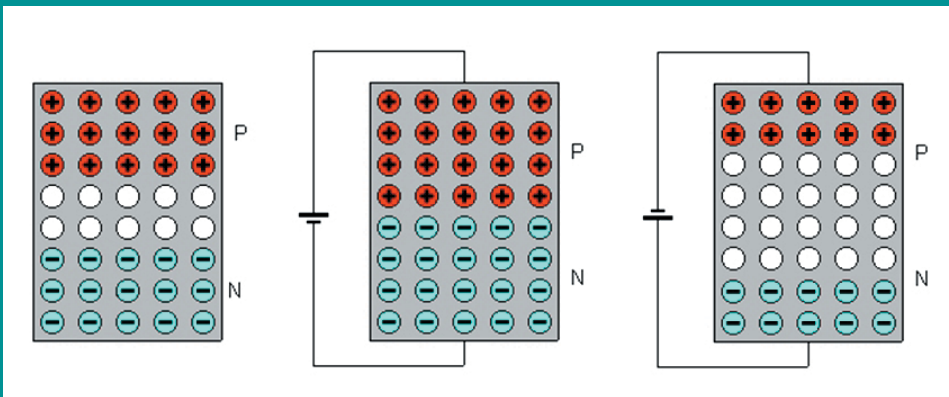


Abb. 9.1: Aufbau und Funktion einer Diode

Legt man an die äußeren Kontakte der Si-Diode eine kleine Spannung, dann vergrößert oder verkleinert sich die Sperrschicht. Zunächst sollen den N-Anschluss mit dem Minuspol und der P-Anschluss mit dem Plus-

pol verbunden werden. Die Ladungen an den Anschlüssen stoßen dann ihre jeweiligen Ladungsträger im Kristall ab, sodass sie in Richtung der Sperrschicht gedrückt werden. Ab einer Spannung von ca. 0,5 V beginnen sich in einer Siliziumdiode die N- und die P-Schicht zu berühren, die Sperrschicht hebt sich auf. Damit fließt auch ein Strom. Bei ca. 0,7 V ist eine gute Leitfähigkeit erreicht. Die Diode wird nun in Durchlassrichtung betrieben.

Polzt man die Spannung um, tritt der gegenteilige Effekt auf: Ladungsträger werden zu den äußeren Anschlüssen hingezogen, sodass sich die Sperrschicht vergrößert. Die isolierende Wirkung der Sperrschicht wird also stärker. Man kann die Diode als ein elektrisches Ventil auffassen, da sie den Strom nur in einer Richtung passieren lässt. Das gilt in gleicher Weise für eine Leuchtdiode. Das andere Halbleitermaterial in der LED führt zu einer höheren Durchlassspannung als bei einer Si-Diode. Beim Rekombinieren von Elektronen und Löchern wird Licht abgegeben.

Der innere Aufbau eines Si-Transistors ist durch drei Schichten aus N- und P-Silizium gekennzeichnet. An den Grenzflächen bilden sich Sperrschichten wie in einer Diode. In einem Transistor befinden sich praktisch zwei Dioden, die man auch als solche verwenden kann. Das ermöglicht besondere Schaltungsvarianten und auch einen einfachen Transistortest.

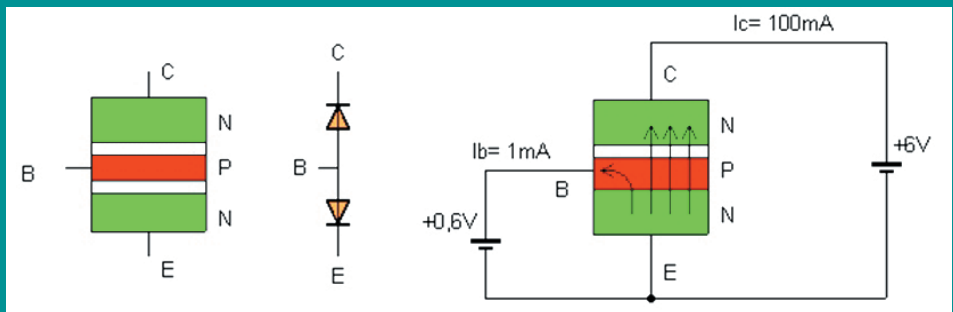


Abb. 9.2:
Sperrschichten und
Grundfunktion des
Transistors

Die Verstärkung eines Transistors tritt auf, wenn eine genügend große Basisspannung angelegt wird. Die untere Sperrschicht wird dann leitend, sodass N-Ladungsträger (Elektronen) in die Basiszone gelangen. Sie werden aber von der positiv geladenen Kollektorschicht angezogen, sodass die meisten Elektronen zum Kollektor abfließen und nur ein kleiner Teil zur Basis wandert.

9

Die internen Dioden eines Transistors lassen sich mit einfachen Prüfschaltungen mit LED und Vorwiderstand ausmessen. Die LED zeigt an, wann Strom fließt. Im ersten Versuch wird die BE-Diode des rechten Transistors in Durchlassrichtung betrieben. Der Kollektor bleibt frei.

Abb. 9.3: Test der BE-Diode

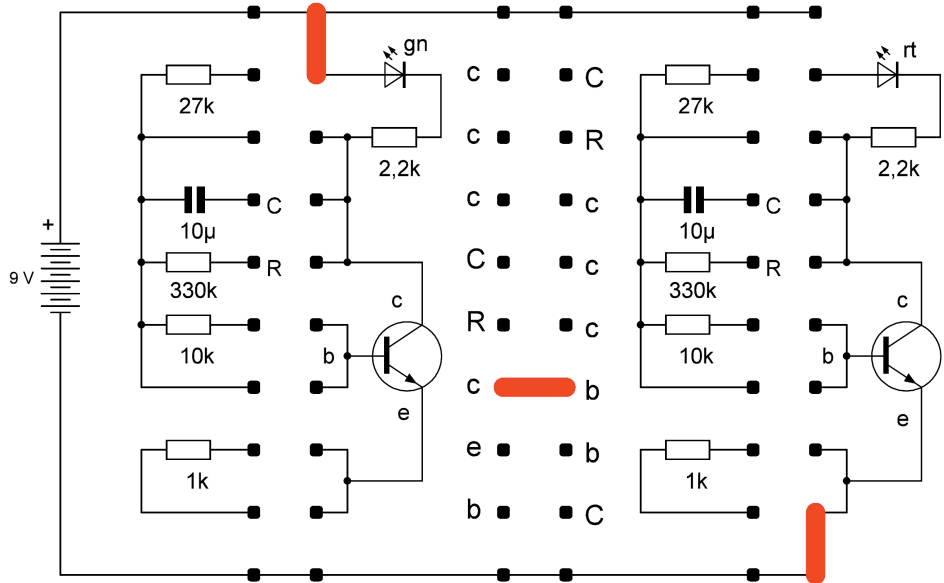
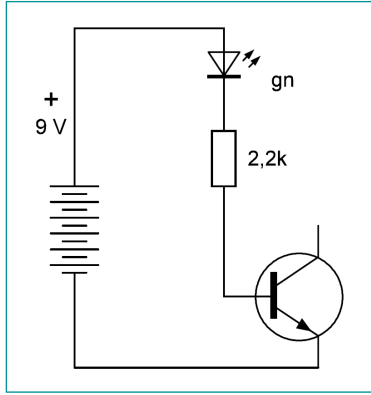


Abb. 9.4: Die BE-Diode des rechten Transistors leitet

Eine Spannungsmessung zwischen den beiden jeweils verwendeten Anschlüssen des Transistors zeigt etwa 0,6 V bis 0,7 V, wenn die entsprechende Diode gerade leitet. Die „Durchlassspannung“ ist also wesentlich kleiner als bei einer LED. Die Spannung hängt vom verwendeten Halbleiter ab. Bei Silizium findet man für kleinere Ströme etwa 0,6 V. In einem großen Bereich unterschiedlicher Ströme ändert sich die Spannung nur zwischen etwa 0,5 V und 0,7 V.

Messung

9.2 | Die BC-Diode leitet

Die interne BC-Diode eines NPN-Transistors leitet, wenn man den Kollektor an Minus legt. Das kommt im normalen Betrieb nicht vor, kann aber in besonderen Situationen in einer Schaltung auftreten. Um die Verbindung nach Minus nur mit Jumpern zu erreichen, muss ein Widerstand von 1 k Ω in Reihe geschaltet werden. Die BC-Diode leitet genauso gut wie die BE-Diode.

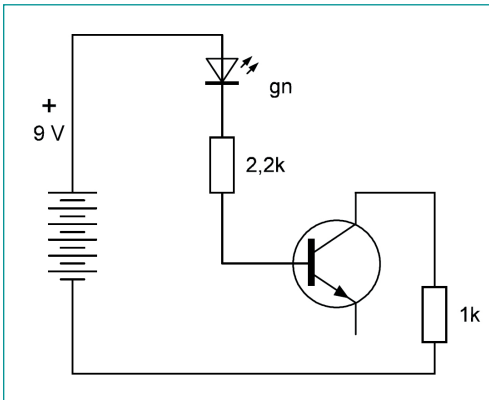


Abb. 9.5: Test der BC-Diode

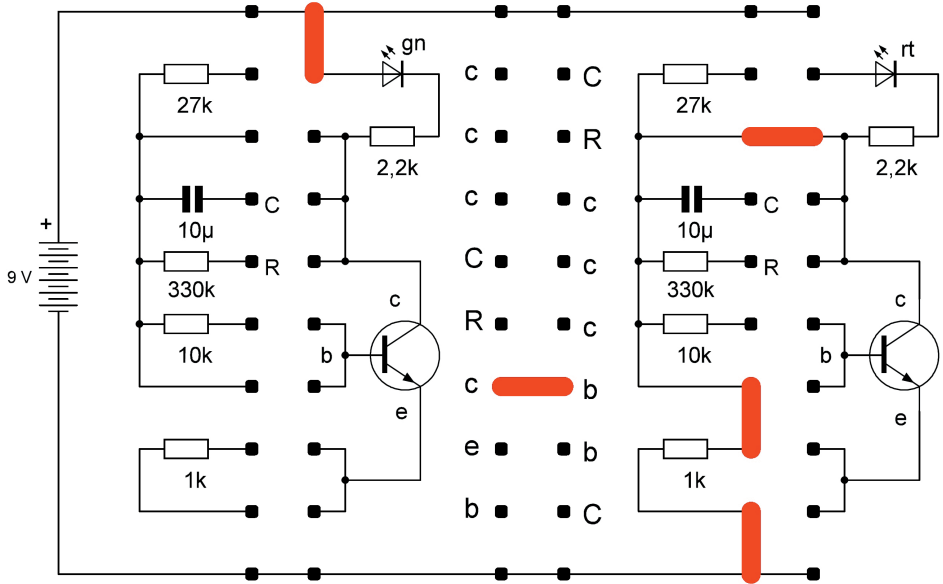


Abb. 9.6:
Die BC-Diode leitet

9.3 | Die BC-Diode in Sperrrichtung

Im normalen Betrieb eines NPN-Transistors liegt eine positive Spannung am Kollektor. Die BC-Diode sperrt. Der Versuch kann mit dem linken Transistor leicht aufgebaut werden, wenn man den Emitter frei lässt. Wie erwartet fließt kein Strom, die LED bleibt aus.

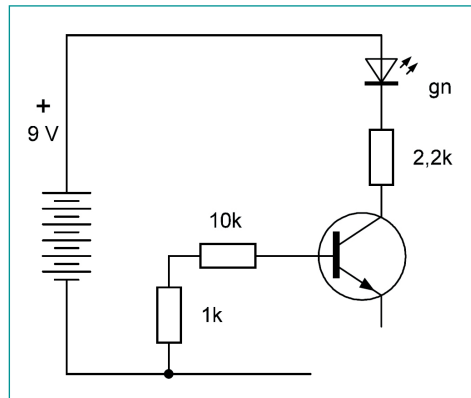


Abb. 9.7: Die BC-Diode in Sperrrichtung

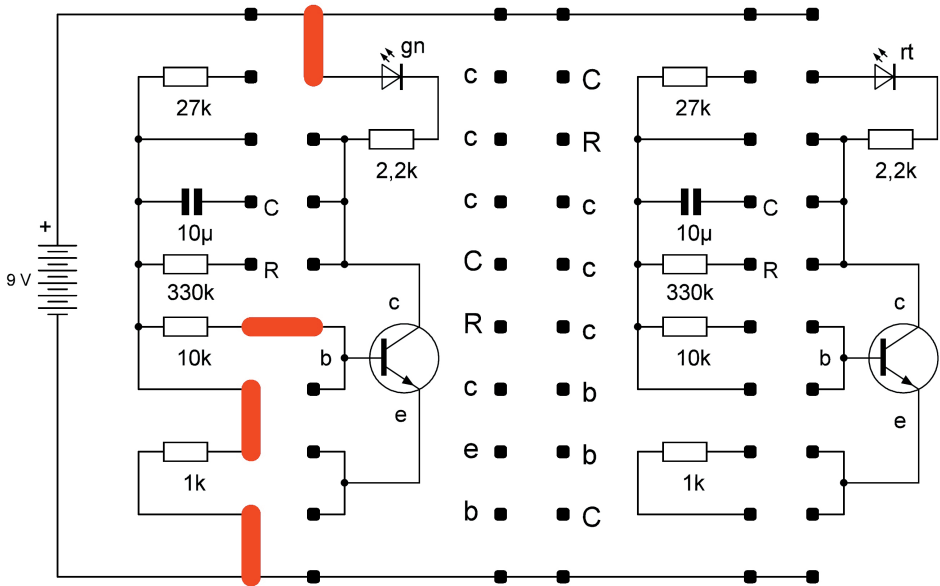


Abb. 9.8: Die LED bleibt aus

Eine Messung des Spannungsabfalls am $10\text{-k}\Omega$ -Widerstand zeigt null. Damit ist klar, dass tatsächlich kein Strom fließt. Eine Messung an der LED zeigt ebenfalls 0 V. Misst man allerdings die Spannung zwischen Basis und Kollektor, wird nur etwa 8 V gemessen, obwohl die Batteriespannung 9 V beträgt. Die Summe aller Spannungen ist scheinbar kleiner als die Batteriespannung, was aber ein Widerspruch zu den Gesetzen eines Stromkreises wäre.

Messungen

Der Widerspruch klärt sich auf, wenn man bedenkt, dass auch das Messgerät einen Innenwiderstand hat. Ein typisches Digitalmultimeter hat in allen Spannungsbereichen einen Innenwiderstand von $10\text{ M}\Omega$. Bei einer Messung der Batteriespannung fließt also ein Strom von $0,9\text{ }\mu\text{A}$. Und wenn man die CB-Spannung misst, fließt ein kleiner Strom über die LED und verursacht einen Spannungsabfall. Obwohl der Messstrom sehr klein ist, beträgt die LED-Spannung bereits 1 V oder mehr. Die Messung selbst verändert also in diesem Fall die Messergebnisse. Das ist fast immer der Fall, in den meisten Fällen ist der Unterschied jedoch vernachlässigbar klein.

9

9.4 | Die BE-Diode in Sperrrichtung

Wenn der Emitter eines NPN-Transistors an eine positivere Spannung als die Basis gelegt wird, sperrt die BE-Diode. Allerdings gilt das nur bis zu einer gewissen Spannung. Im Datenblatt des Transistors wird eine maximale Sperrspannung von 5 V angegeben. Bei einer höheren Spannung im Bereich von 7 V bis 9 V beginnt plötzlich ein Strom zu fließen. Die BE-Diode verhält sich dann wie eine Zenerdiode. Die typische Durchbruchspannung liegt bei 8 V. es gibt jedoch erhebliche Streuungen, sodass man nicht mit Sicherheit vorhersagen kann, ob die LED gerade noch schwach leuchtet oder nicht.

Jede Diode hat eine Durchbruchspannung, bei der sich die Sperrschicht nicht weiter ausdehnen kann und der Sperrstrom stark ansteigt. Der Aufbau des Transistors bildet zwar zwei PN-Übergänge, hat aber eine Unsymmetrie mit einer besonders dünnen Emitterschicht. Die Größe der Sperrzone ist daher begrenzt und damit auch die Sperrspannung.

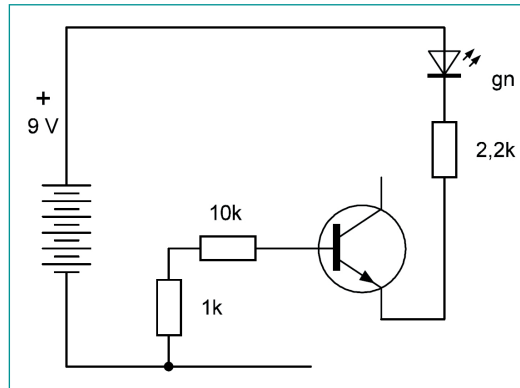


Abb. 9.9: Die BE-Diode in Sperrrichtung

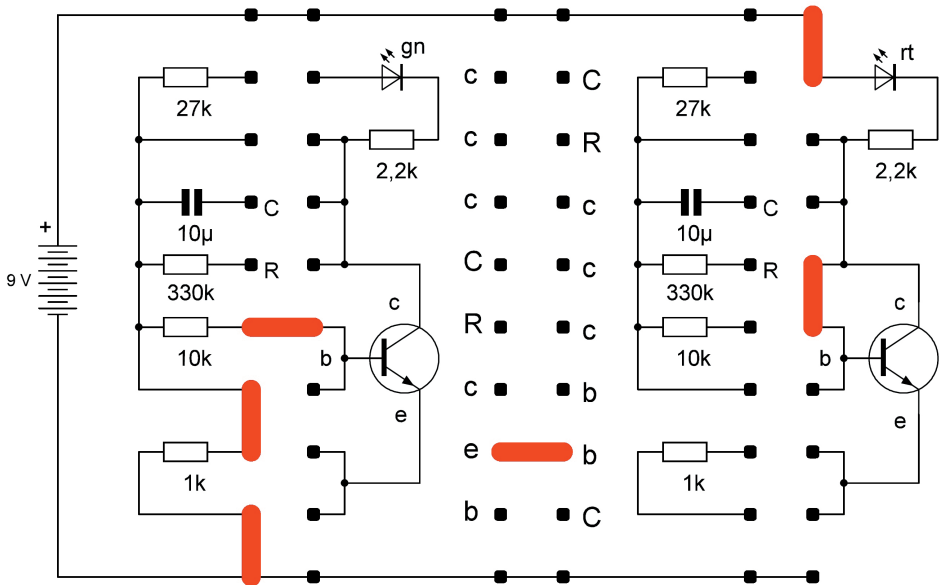


Abb. 9.10: Anzeige eines Sperrstroms

Falls die LED schon deutlich leuchtet, kann man die Zenerspannung mit dem Multimeter direkt zwischen B und E messen. Falls die LED noch aus ist, lässt sich der Spannungsabfall besser an der LED messen. Findet man hier 1 V und misst die Batteriespannung mit 9 V, kann man die Durchbruchspannung mit 8 V berechnen. Die Zenerspannung ist großen Streuungen unterworfen und kann bei einigen Transistoren bis zu 9 V betragen. Das Ergebnis ist daher nicht vorhersagbar.

Messungen

9.5 | Batterieprüfer

Wenn eine 9-V-Batterie nur noch 7 V hat, ist sie bereits fast völlig erschöpft. Aber eine einfache LED-Schaltung zeigt noch keinen großen Unterschied. Bei dieser Schaltung ist das anders. Die rote LED ist bei einer ganz neuen Batterie noch hell, aber bei 7 V schon ganz aus.

Die Schaltung verwendet die gerade gefundene besondere Eigenschaft eines Transistors. Die BE-Diode verhält sich in Durchlassrichtung wie eine normale Si-Diode und wie die BC-Diode des Transistors. Aber in Durchlassrichtung sperrt sie nur bis zu einer Spannung im Bereich von 7 V bis

9

9 V. Dann beginnt sie zu leiten, wobei der Strom mit steigender Spannung steil ansteigt. Das ist das Verhalten einer Zenerdiode. Hier führt es dazu, dass die LED-Helligkeit sich in einem engen Bereich der Batteriespannung von ganz aus bis deutlich an verändert.

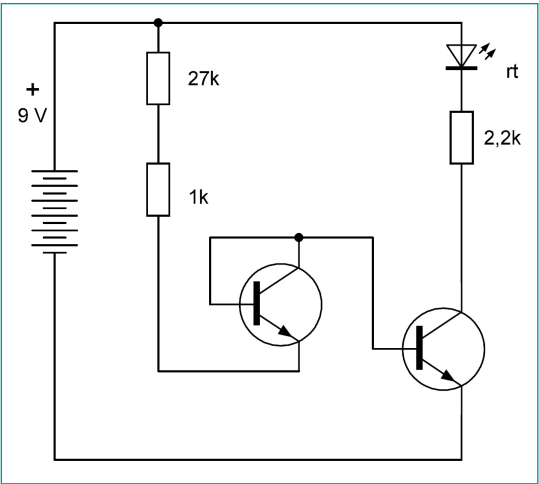


Abb. 9.11:
Eine Spannungs-
überwachung

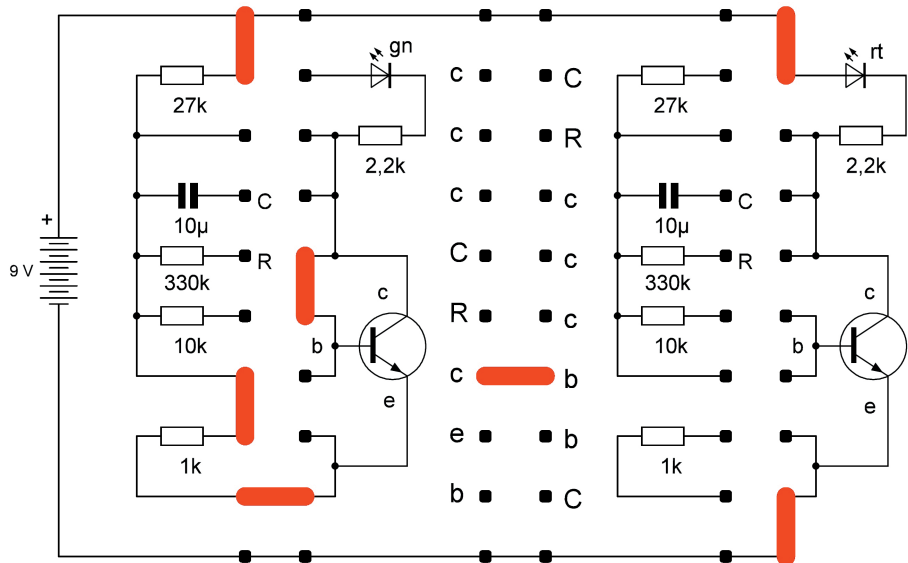


Abb. 9.12: Anzei-
ge des Batteriezu-
stands

Bei dieser Schaltung ist die BC-Strecke des Transistors kurzgeschlossen. Deshalb wirkt im invertierten Betrieb nur noch die BE-Diode in Sperrrichtung.

Mit dem Voltmeter kann man die Z-Spannung direkt zwischen B und E messen. Typische Spannungen liegen bei 7,5 V, aber es kann auch erhebliche Abweichungen geben. Wegen der großen Streuungen kann man nicht vorhersagen, welche Batteriespannung noch als gut angezeigt wird. Man kann versuchsweise eine oder zwei 1,5-V-Zellen in Reihe zur Batterie schalten, um eine höhere Spannung zu testen.

Mit einer kleinen Änderung der Schaltung arbeitet nicht nur die Zenerdiode, sondern auch der Transistor in invertierter Richtung mit dem Minuspol am Kollektor. Der invertierte Transistor hat nur noch eine geringe Stromverstärkung von ungefähr 10-fach. Zur Zenerspannung kommt nun noch eine Diodenspannung in Durchlassrichtung. Gleichzeitig wird allerdings die Durchbruchspannung etwas kleiner, weil weniger Strom fließt. Beide Effekte können sich gerade aufheben. Im Normalfall wird sich jedoch eine geringe Verschiebung der Anzeigeschwelle ergeben.

Messung

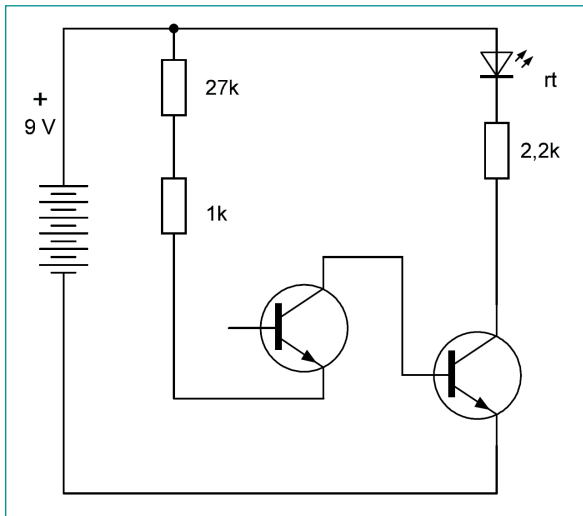


Abb. 9.13: Aufbau mit einem invertierten Transistor

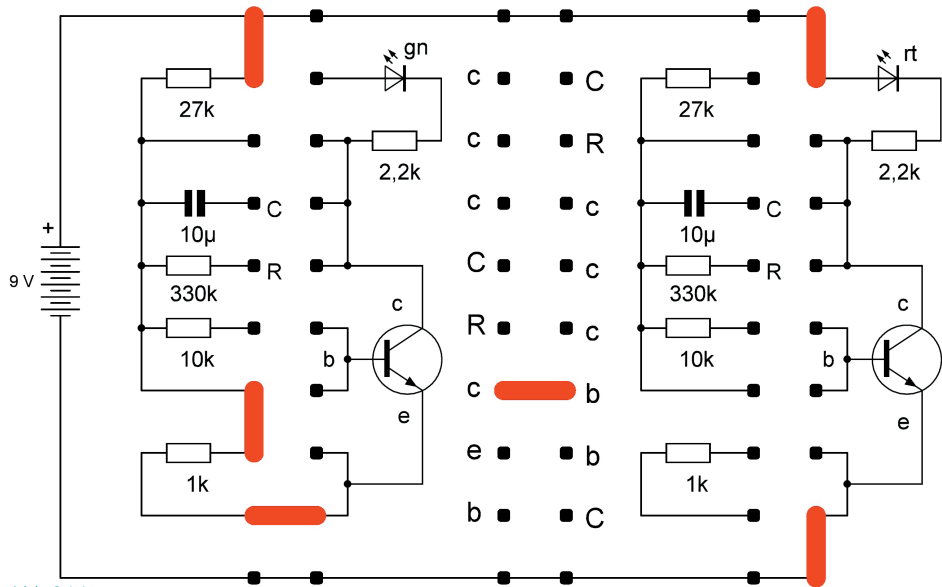


Abb 9.14: Der veränderte Batterietester

9.6 | Transistor invertiert

Der symmetrische Aufbau führt zu der Vermutung, dass der Transistor auch falsch herum, also mit vertauschtem Emitter und Kollektor funktioniert. Aus den bisherigen Versuchen ist schon bekannt, dass das nur bis zu einer gewissen Spannung funktionieren kann.

Der Versuch verwendet den linken Transistor zusammen mit der roten LED. Wenn man den Basisstrom über den 27-k Ω -Widerstand einschaltet, leuchtet die LED. Öffnet man die Verbindung über den rechten Kondensator, nimmt der Strom allmählich ab. Das Verhalten ähnelt also dem eines normal betriebenen Transistors. Allerdings geht die LED schneller aus als in einer vergleichbaren Schaltung mit einem richtig herum betriebenen Transistor. Das ist ein erster Hinweis darauf, dass der invertierte Transistor eine deutlich geringere Stromverstärkung hat.

Normalerweise vermeidet man es, einen Transistor mit falscher Polung zu betreiben. Dass es aber prinzipiell funktioniert, zeigt schon der innere Aufbau eines Transistors. Und die Versuche können bei der Fehlersuche in Schaltungen nützlich werden. Wenn nämlich eine Schaltung schlech-

ter funktioniert als gewünscht, kann ein falsch eingebauter Transistor nicht ausgeschlossen werden.

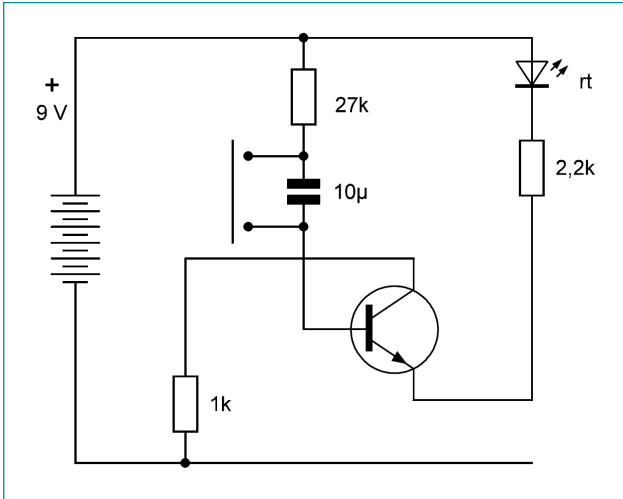


Abb. 9.15: Emitter und Kollektor vertauscht

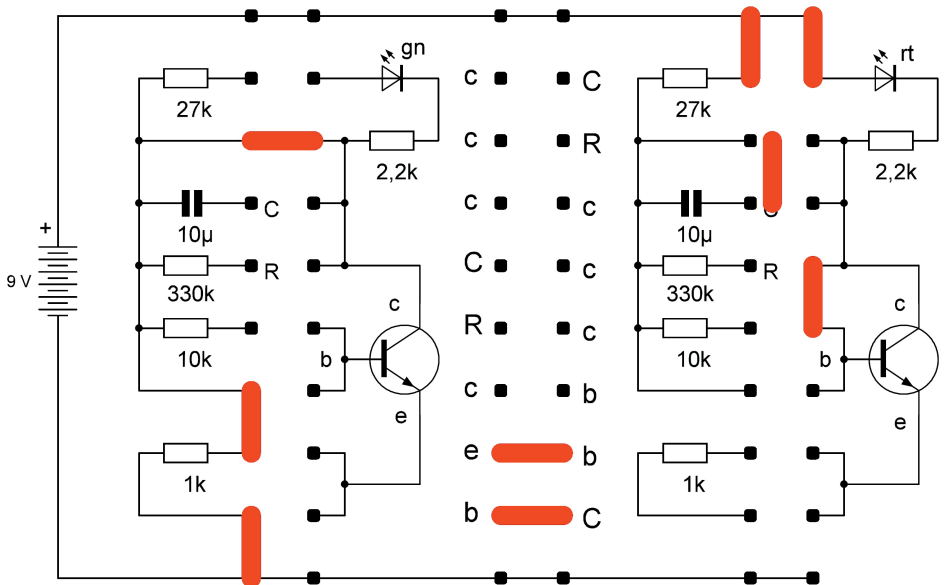


Abb. 9.16: Der linke Transistor bei umgekehrter Polung

9

Messung

CB-Spannung: 0,64 V

CE-Restspannung: 1,1 V

Spannungsabfall am Basiswiderstand 27 k Ω : 6,3 V

Basisstrom: 0,23 mA

Spannungsabfall am Kollektorwiderstand 1 k Ω : 2,0 V

Kollektorstrom: 2 mA

Stromverstärkung: 2 mA / 0,23 mA = 8,7-fach

Noch deutlicher wird die geringere Stromverstärkung, wenn man einen großen Basiswiderstand einsetzt. Die LED leuchtet dann deutlich schwächer als bei einem vergleichbaren Versuch mit korrekter Polung, der Transistor befindet sich noch nicht in der Sättigung.

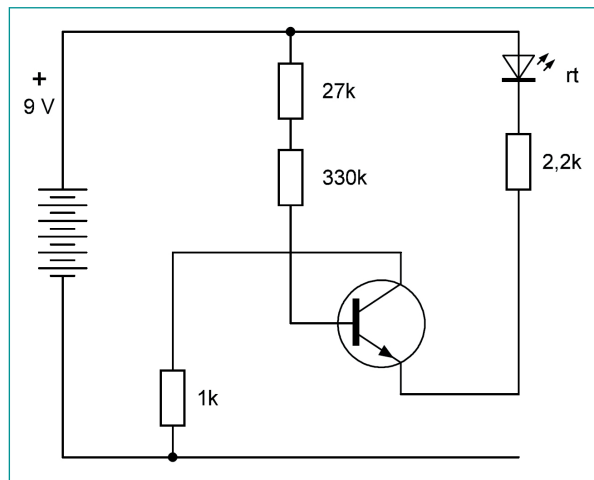


Abb. 9.17: Mehr Basiswiderstand

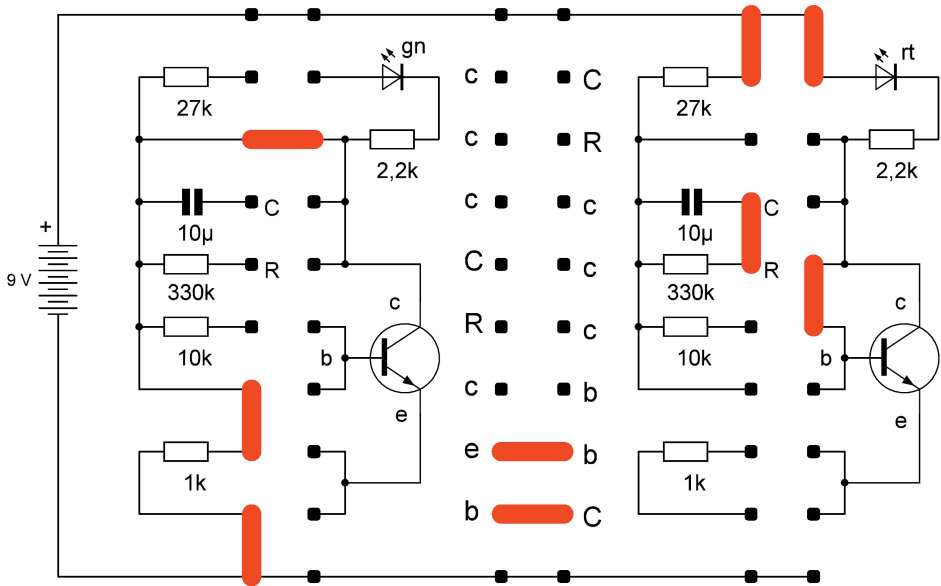


Abb. 9.18: Ein Versuch mit weniger Kollektorstrom

Messung

CB-Spannung: 0,57 V

CE-Restspannung: 6,6 V

Spannungsabfall am Basiswiderstand 330 kΩ: 8,3 V

Basisstrom: 0,025 mA

Spannungsabfall am Kollektorwiderstand 1 kΩ: 0,3 V

Kollektorstrom: 0,3 mA

Stromverstärkung: 0,3 mA / 0,025 mA = 12-fach

10 FLIPFLOPS UND BLINKER

Eine Kippschaltung kennt zwei stabile Zustände, an oder aus, null oder eins, rot oder grün. Zwischen beiden Zuständen kann man hin- und herschalten. Eine solche Schaltung bezeichnet man auch als Flipflop. Es handelt sich dabei um einen Grundbaustein der digitalen Elektronik, denn solch eine Schaltung kann binäre Zustände darstellen oder speichern.

10.1 | RS-Flipflop

Das RS-Flipflop hat zwei Eingänge: Reset (R) und Set (S). Mit Reset schaltet man den Ausgangszustand aus, mit Set schaltet man ihn ein. Solange keines von beiden Signalen kommt, bleibt der letzte Zustand erhalten.

Diese Schaltung hat zwei Eingänge, mit denen man jeweils eine Basis gegen den Emitter kurzschließen und damit den Transistor sperren kann. Der jeweils stabile Zustand wird durch eine Rückkopplung über zwei Stufen erreicht. Dazu gibt es eine direkte Verbindung Kollektor–Emitter und einen Widerstand von $330\text{ k}\Omega$, der den Kollektor des zweiten Transistors mit der Basis des anderen Transistors verbindet. Deshalb leuchtet die rote LED, oder sie bleibt aus. Und der aktuelle Zustand bleibt bestehen, bis er durch eine Kontaktbrücke geändert wird.

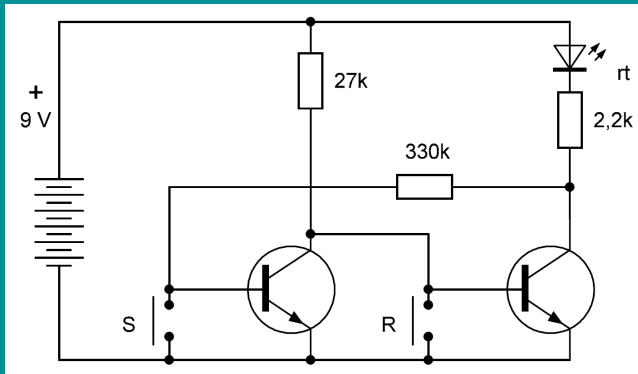


Abb. 10.1: Das RS-Flipflop

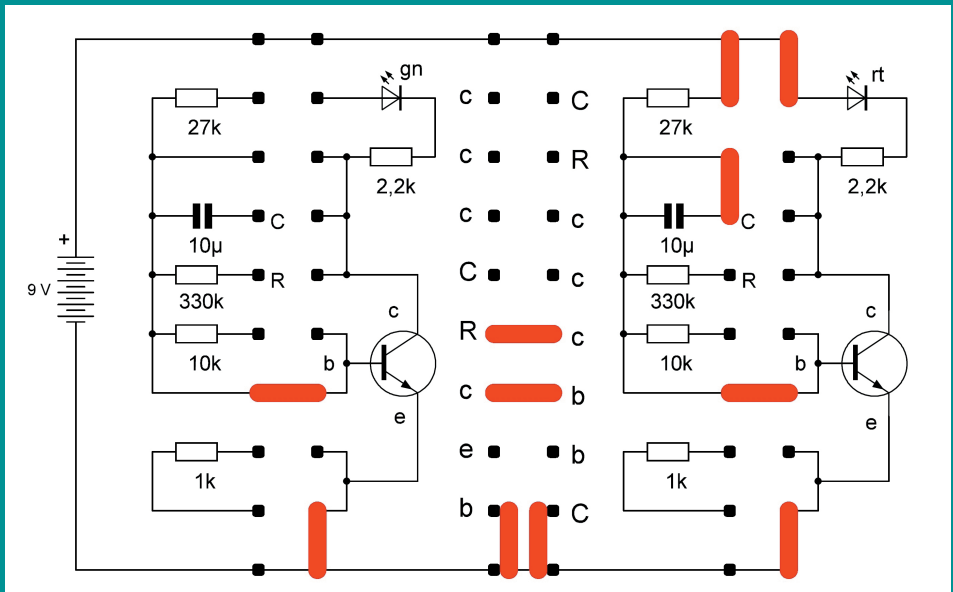


Abb. 10.2: An oder aus

Wenn der linke Transistor leitet, ist seine Kollektorspannung klein, womit der rechte Transistor keine ausreichende Basisspannung erhält und gesperrt bleibt und die LED aus ist. Dadurch ist die Kollektorspannung des rechten Transistors groß, sodass der linke Transistor mit genügend Basisstrom versorgt wird, um den Zustand zu halten.

10

Messung

Erst wenn der linke Transistor durch eine Kontaktbrücke S gesperrt wird, kippt der Zustand. Nun erhält der rechte Transistor genügend Basisstrom, ist voll durchgeschaltet und hat nur noch eine kleine Kollektorspannung, sodass der linke Transistor auch nach dem Entfernen der Brücke gesperrt bleibt. Auch dieser Zustand bleibt stabil, bis er durch eine R-Brücke geändert wird.

Zum Verständnis der Schaltung hilft eine Messung der Basisspannung und der Kollektorspannung an beiden Transistoren in beiden Zuständen:

Rot ist aus: $U_{be1} = 0,6 \text{ V}$, $U_{ce1} = 0,04 \text{ V}$, $U_{be2} = 0,04 \text{ V}$, $U_{ce2} = 7,5 \text{ V}$

Rot ist an: $U_{be1} = 0,05 \text{ V}$, $U_{ce1} = 0,7 \text{ V}$, $U_{be2} = 0,7 \text{ V}$, $U_{ce2} = 0,05 \text{ V}$

10.2 | Rot/Grün-Flipflop

Oft wird bei einem Flipflop auch das invertierte Signal ausgegeben, das nach einem R-Impuls an und nach einem S-Impuls aus ist. So kann man ein Flipflop mit zwei LEDs bauen. Jeweils eine von beiden ist dauerhaft an, bis der Zustand durch den R- oder S-Jumper umgeschaltet wird.

Wenn gerade die grüne LED leuchtet, ist die Kollektorspannung des linken Transistors klein. Der rechte Transistor bekommt daher keinen Basisstrom und bleibt gesperrt. Deshalb liegt seine Kollektorspannung hoch, sodass der linke Transistor weiterhin leitend bleibt. Erst wenn einmal kurz der linke Jumper gesetzt wird, wird der linke Transistor abgeschaltet, sodass seine Kollektorspannung steigt und der rechte Transistor sich einschaltet. Nun leuchtet die rote LED, bis dieser Zustand durch den rechten Jumper geändert wird. Wenn man genau hinsieht, erkennt man, dass die jeweils ausgeschaltete LED noch sehr schwach leuchtet. Durch sie fließt nämlich der Basisstrom des gerade eingeschalteten Transistors.

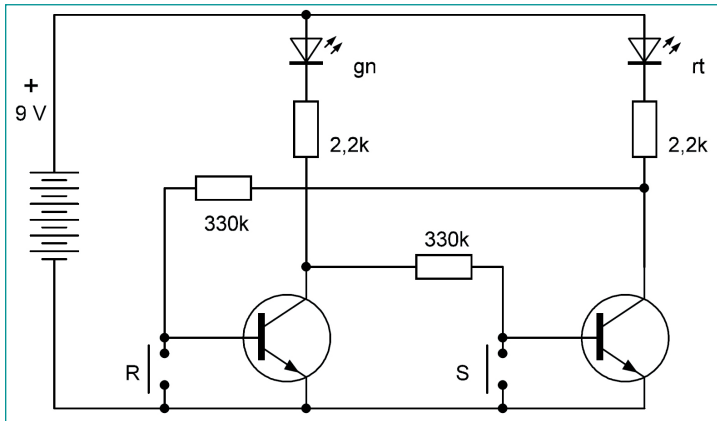


Abb. 10.3: Rot/Grün-Flipflop

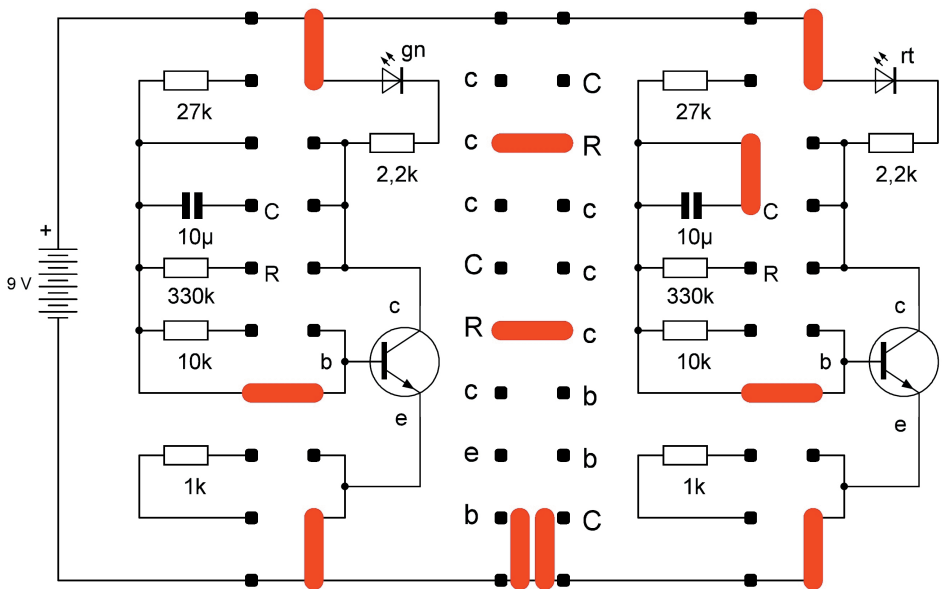


Abb. 10.4: Rot oder grün

Die Messung der Basisspannung und der Kollektorspannung an beiden Transistoren in beiden Zuständen zeigt diesmal vergleichbare Zustände auf beiden Seiten:

Messung

Grün ist an: $U_{be1} = 0,6 \text{ V}$, $U_{ce1} = 0,05 \text{ V}$, $U_{be2} = 0,05 \text{ V}$, $U_{ce2} = 7,5 \text{ V}$

Rot ist an: $U_{be1} = 0,05 \text{ V}$, $U_{ce1} = 7 \text{ V}$, $U_{be2} = 0,6 \text{ V}$, $U_{ce2} = 0,05 \text{ V}$

10

10.3 | Langsamer Blinker

Bisher musste man den Zustand des Flipflops noch per Hand umschalten. Aber das geht auch automatisch. Diese Blinkerschaltung ähnelt dem einfachen RS-Flipflop, mit dem wichtigen Unterschied, dass ein Kondensator in den Rückkopplungsweig eingefügt wurde. Ein stabiler Zustand bleibt immer nur solange erhalten, bis der Kondensator fast vollständig geladen oder entladen ist. Deshalb führt die Rückkopplung hier nicht zu einem stabilen Zustand, sondern zu einem immer wieder wechselnden Zustand, der jeweils für einige Zeit stabil bleibt. So erhält man einen langsamen Blinker. Eine Schaltung, die selbständig Schwingungen erzeugt, bezeichnet man auch als Oszillator.

Die Schaltung enthält zusätzlich eine Gegenkopplung durch einen Basis-Kollektor-Widerstand am linken Transistor. Sie ist nötig, damit der Transistor von einem extremen Zustand immer wieder von selbst auf einen mittleren Arbeitspunkt zustrebt, von dem aus er dann weiter in den anderen stabilen Zustand kippt.

Wenn man den Rückkopplungsweig mit $10\ \mu\text{F}$ und $330\ \text{k}\Omega$ entfernt oder unterbricht, stellt sich wieder der mittlere Arbeitspunkt ein, den man an einer geringen Helligkeit der roten LED erkennt. Die Schaltung entspricht dann genau dem abgewandelten Stromspiegel aus Abschnitt 8.3. Allgemein gilt: Ein Oszillator besteht aus einem Verstärker mit einem mittleren Arbeitspunkt und einer Rückkopplung vom Ausgang auf den Eingang. Wenn der Verstärker bereits ganz gesperrt oder voll eingeschaltet ist, können keine Schwingungen beginnen.

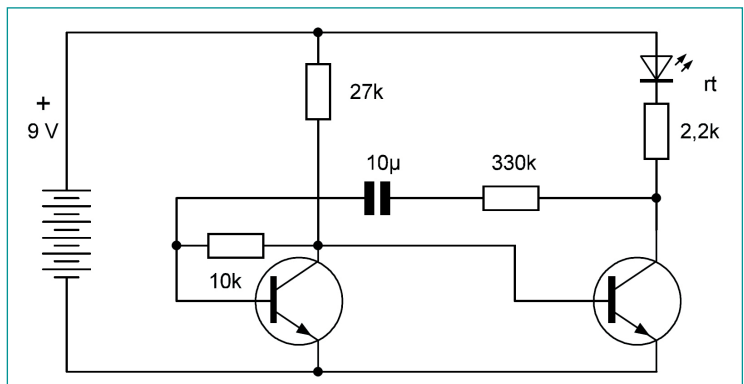


Abb. 10.5: Rückkopplung mit Kondensator

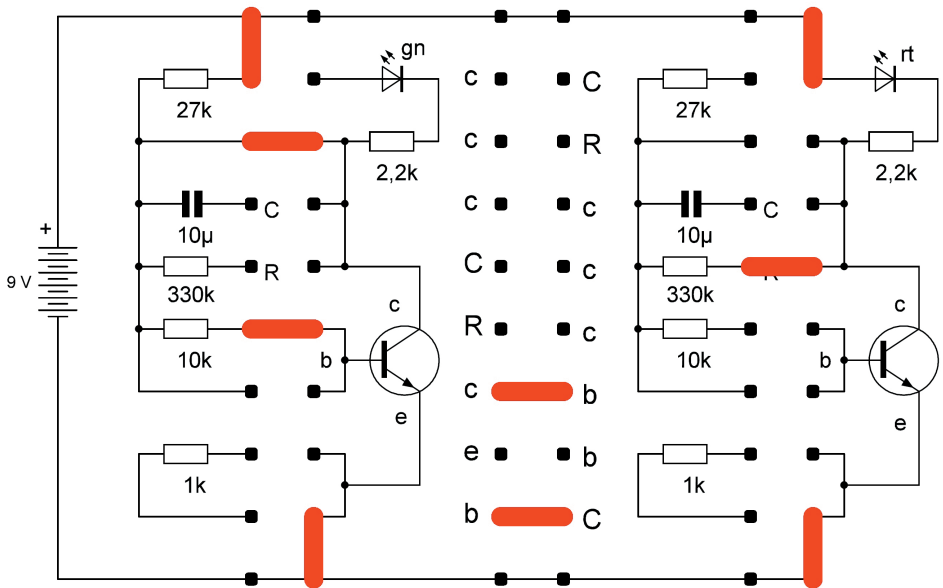


Abb. 10.6: Der LED-Blinker

Eine Messung des Arbeitspunkts ohne die Rückkopplung ist möglich, wenn man die Verbindung b-C öffnet. Es sollten sich dann Verhältnisse einstellen wie bei dem modifizierten Stromspiegel in Abschnitt 8.3. Interessant ist auch eine Messung der Blinkfrequenz mithilfe einer Uhr (etwa 20 Impulse pro Minute oder 0,33 Hz).

Messung

10.4 | Schneller Blinker

Mit einer kleinen Änderung wird die Blinkgeschwindigkeit erhöht. Bisher war der Kondensator in Reihe mit einem hochohmigen Widerstand angeschlossen, sodass sich eine große Zeitkonstante ergab. Jetzt ist er allein im Rückkopplungszweig und lädt und entlädt sich daher wesentlich schneller.

10

Abb. 10.7: Verringer-
te Zeitkonstante

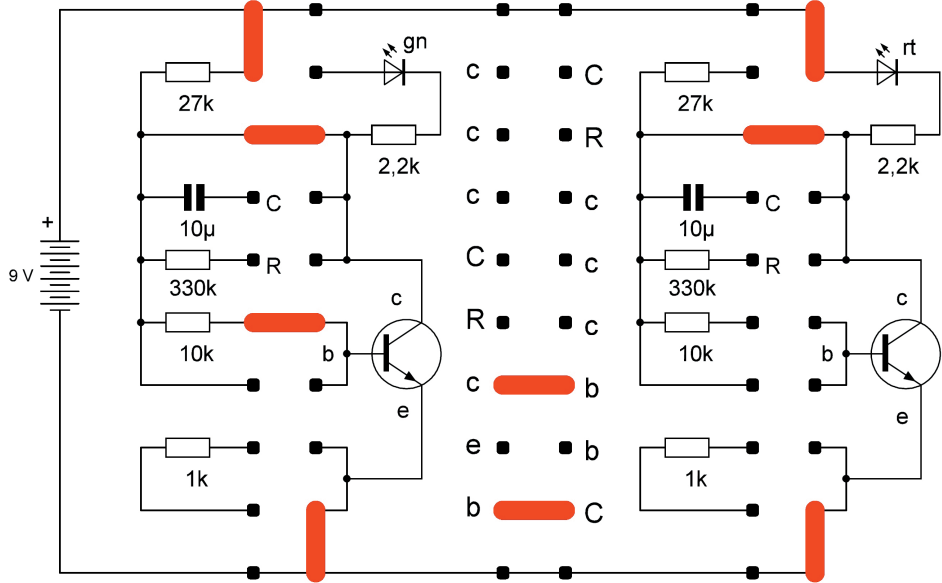
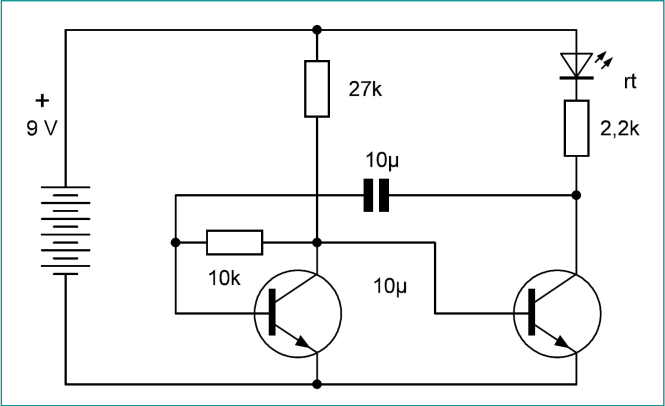


Abb. 10.8: Schneller Blinker

Messung

Die neue Frequenz ist etwa 120 Impulse pro Minute bzw. 2 Hz.

10.5 | Wechselblinker

Nun sollen zwei LEDs abwechselnd blinken. Die Schaltung ist symmetrisch aufgebaut und besteht aus zwei Verstärkerstufen mit gegenseitiger Kondensatorkopplung. Immer wenn gerade die rote LED aus ist, steigt die Kollektorspannung des linken Transistors. Dann lädt sich der angeschlossene Kondensator auf und liefert einen Basisstrom für den rechten Transistor. Wenn er vollständig geladen ist, kippt der Zustand. Dann wird der andere Kondensator geladen, und die grüne LED leuchtet.

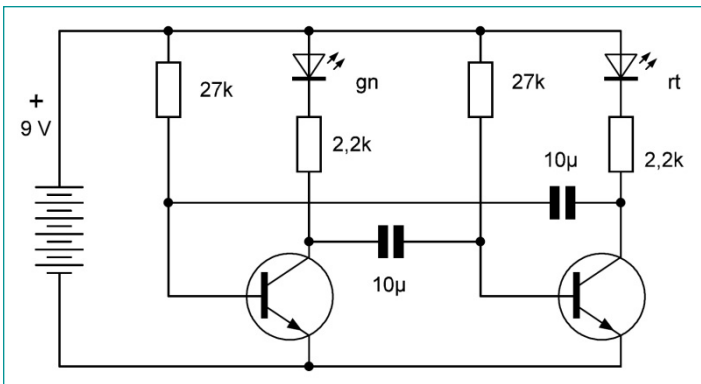


Abb. 10.9: Ein symmetrischer Blinker

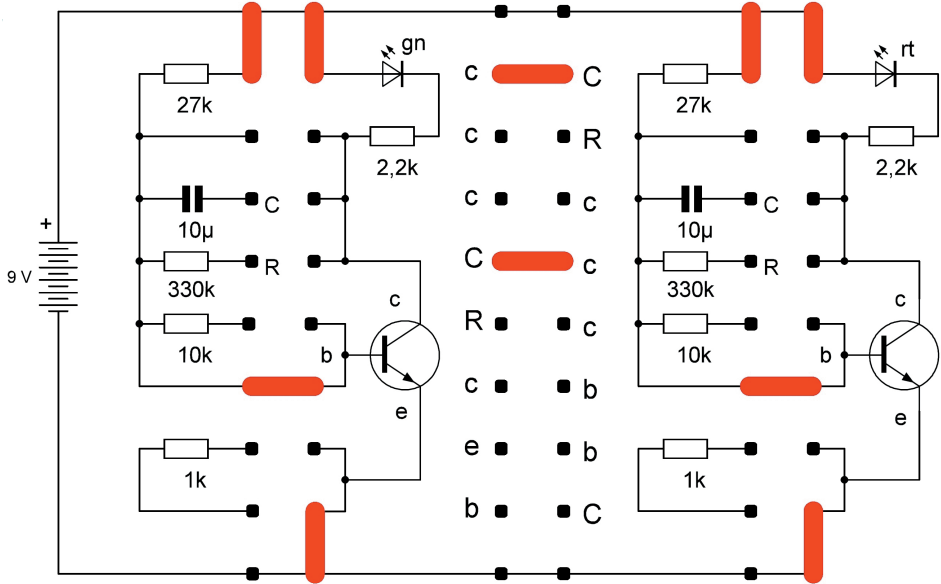


Abb. 10.10: Der Rot/Grün-Wechselblinker

Messung

Die Arbeitspunkte beider Transistoren ohne die Rückkopplung können gemessen werden, wenn man eine der beiden Kondensatorverbindungen C-c öffnet. Es zeigt sich dann, dass beide Transistoren voll durchgesteuert sind und nur noch Kollektor-Emitter-Restspannungen von etwa 30 mV haben. In diesem Zustand gibt es nur noch eine sehr kleine Spannungsverstärkung, sodass es nicht selbstverständlich ist, dass der Blinker von allein anschwingt. Beim Start des Oszillators kann es eine Rolle spielen, dass der Kondensator noch einen anderen Ladezustand hat und damit einen Start-Stromimpuls liefert.

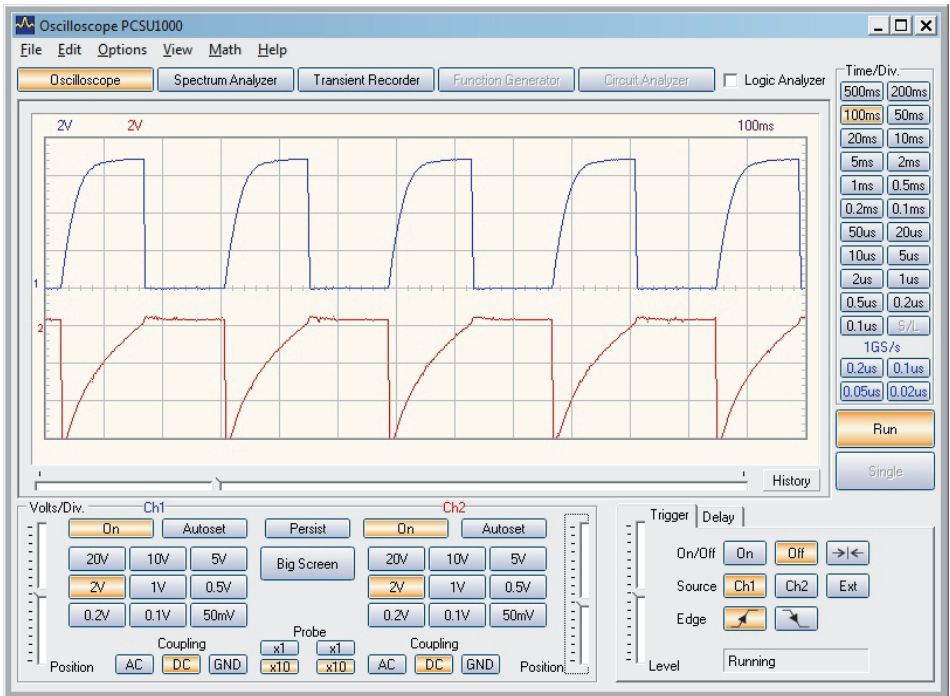


Abb. 10.11: Verlauf der Kollektorspannung und der Basisspannung

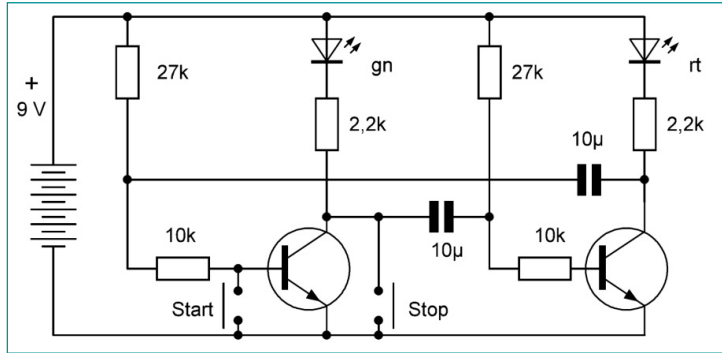
Das Oszillogramm zeigt den Verlauf der Kollektorspannung [Kanal 1, oben] und der Basisspannung [Kanal 2, unten]. Wie erwartet beeinflusst der Ladestrom der Kondensatoren die Kollektorspannung. Die steigenden Flanken sind daher deutlich abgerundet. An der Basis findet man Spitzen bis -7 V .

10.6 | Start/Stop-Blinker

Mit dem direkten Anschluss der Kondensatoren an die Basis entsteht zu Anfang der Ladephase ein großer Ladestrom, der eine LED nur verlangsamt ausschalten lässt. Fügt man zusätzliche Widerstände in die Basisleitung ein, wird dieser Effekt geringer. Die LEDs schalten dann abrupter ab.

10

Abb. 10.12:
Der veränderte
Wechselblinker



Allerdings kann nicht mehr sicher vorhergesagt werden, ob die Schaltung wie gewünscht anschwingt. Der Arbeitspunkt beider Transistoren liegt nahe an der Sättigung, sodass nur noch eine geringe Spannungsverstärkung besteht. Durch die zusätzlichen Widerstände wird die Verstärkung noch weiter reduziert. Im Extremfall kann das dazu führen, dass beide Transistoren eingeschaltet bleiben.

Im Normalfall wird der Blinker beim Einschalten der Betriebsspannung oder beim Aufbau der Schaltung von allein anschwngen, weil zufällige Bauteiltoleranzen für einen ungleichen Anstieg der Kollektorspannungen sorgen. Man kann den Oszillator jedoch stoppen, indem man einen der beiden Kollektoren gegen Minus kurzschließt. Auch wenn man die Kurzschlussbrücke wieder entfernt, bleiben beide Transistoren im eingeschalteten Zustand, sodass beide LEDs an sind. Weil sich beide Transistoren in der Sättigung befinden, reicht die Spannungsverstärkung nicht aus, um neue Schwingungen zu starten. Mit einem Kurschluss an der Basis kann jedoch eine Starthilfe gegeben werden, indem ein Ungleichgewicht in die Schaltung gebracht wird.

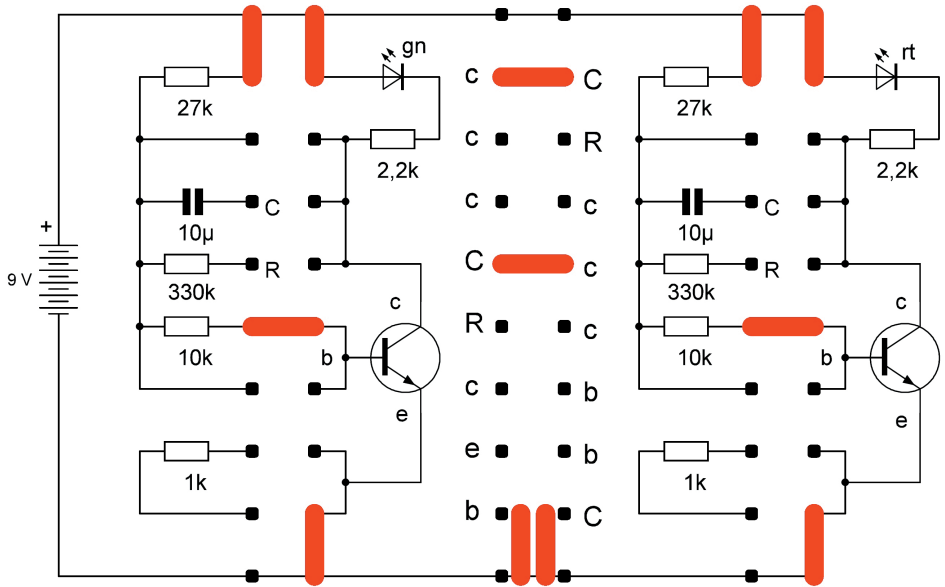


Abb. 10.13:
Start und Stop

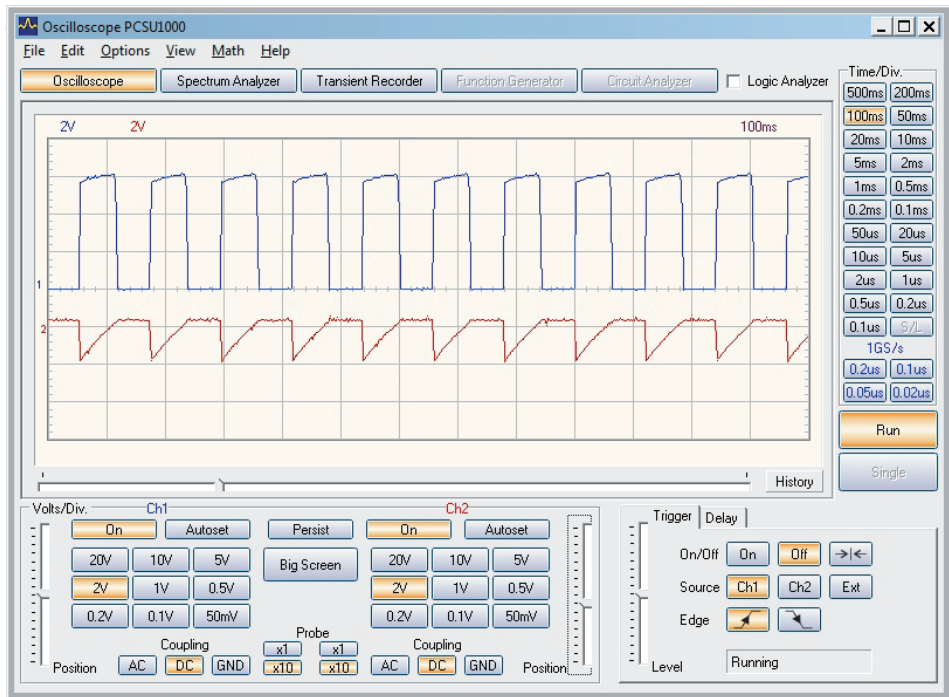


Abb. 10.14: Die veränderten Schwingungen

Das Oszillogramm zeigt einen rechteckförmigen Verlauf der Kollektorspannung und eine höhere Frequenz (8 Hz) als beim vorigen Aufbau (4 Hz). Begründen kann man dies damit, dass die Kondensatoren nicht mehr voll geladen und entladen werden. An der Basis (Kanal 2) findet man nur noch Spannungen bis -2 V .

10.7 | Langsamer Wechselblinker

Mit einer Gegenkopplung in Form eines Widerstands mit $330\text{ k}\Omega$ zwischen Basis und Kollektor erreicht man einen mittleren Arbeitspunkt und damit optimale Bedingungen für ein eigenständiges Anschwingen des Blinkers. Bei einem mittleren Arbeitspunkt würde das unvermeidliche Eigenrauschen der Widerstände und Transistoren so weit verstärkt, dass ein zufälliges Ungleichgewicht zum Start der ersten Schwingung führen würde.

Das Blinken ist nun sehr langsam, weil die Kondensatoren im gesperrten Zustand eines Transistors nur über den Widerstand von $330\text{ k}\Omega$ geladen werden. Der geringe Ladestrom fließt über die gerade abgeschaltete LED, sodass eine geringe Resthelligkeit erhalten bleibt.

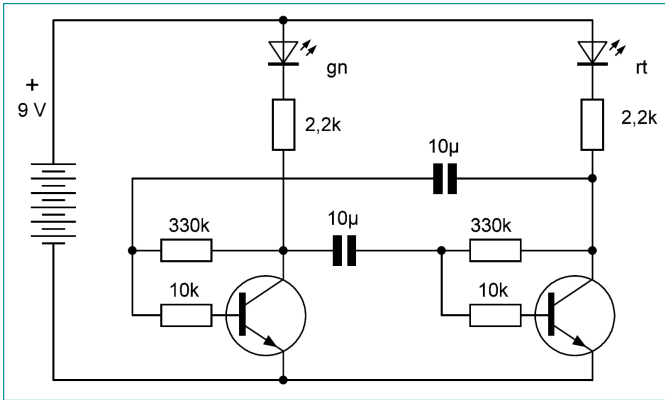


Abb. 10.15:
Gegengekoppelte
Transistoren

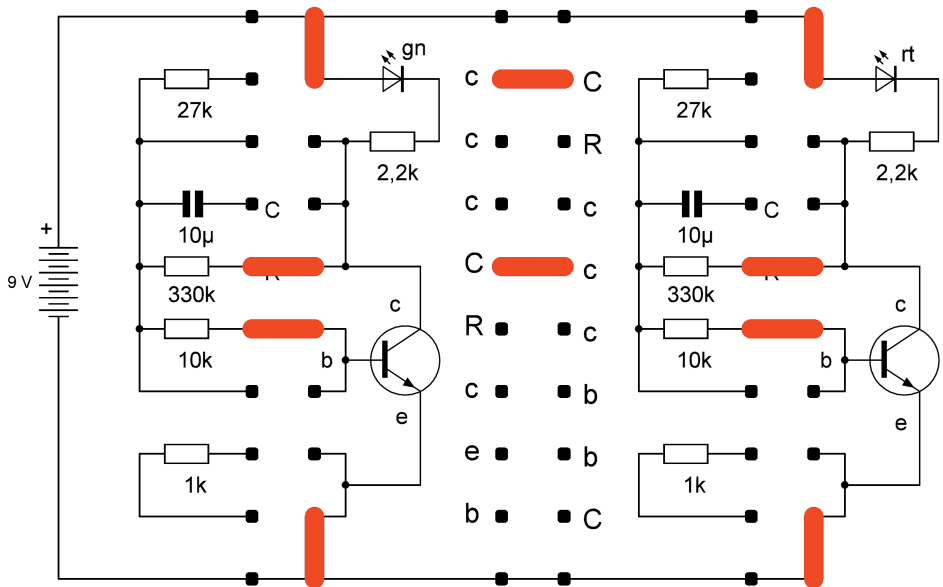


Abb. 10.16: Langsa-
mer Wechselblinker

10

10.8 | Unsymmetrischer Wechselblinker

Wenn man an einem der beiden Transistoren einen zusätzlichen Basiswiderstand von $27\text{ k}\Omega$ einschaltet, wird der Kondensator wesentlich schneller geladen. Die Aus-Phase der zugehörigen LED wird dann sehr kurz, und die andere LED blitzt nur kurz auf. Man kann nun wahlweise die rote oder die grüne LED kurz blitzen lassen.

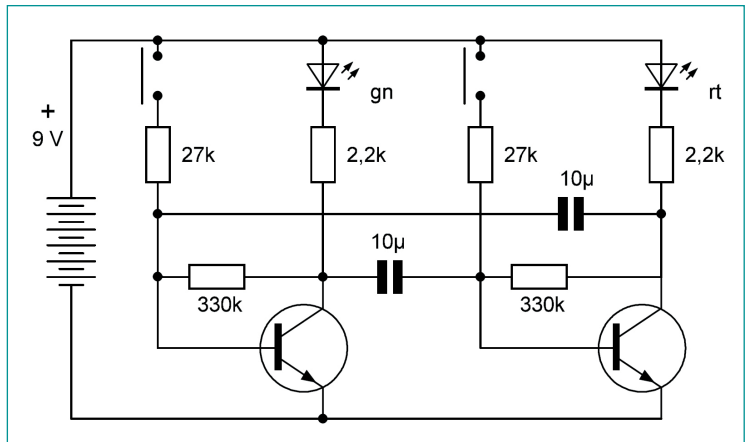


Abb. 10.17: Zusätzliche Basiswiderstände

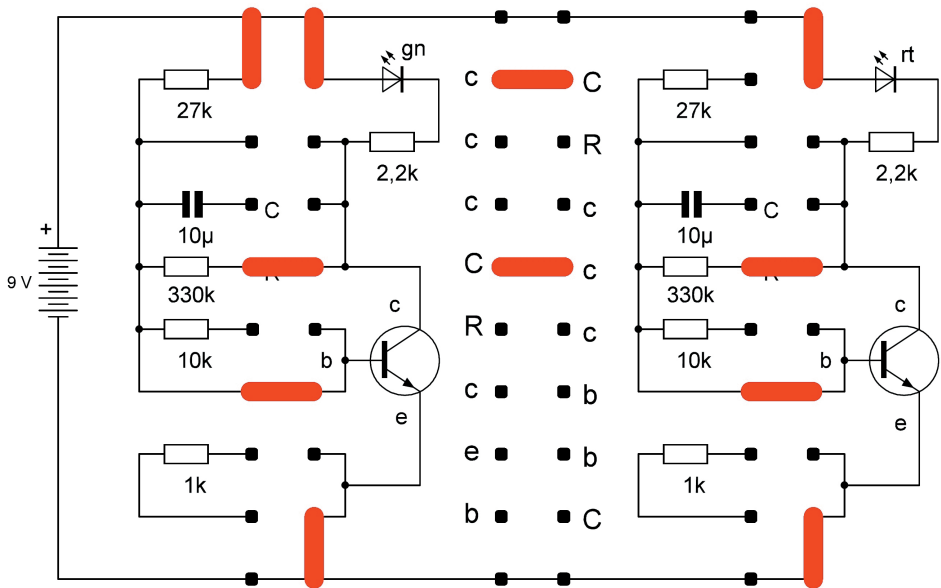


Abb. 10.18: Rote Lichtblitze

10.9 | Der Bye-Bye-Blinker

Die letzte Blinkschaltung arbeitet mit abschaltbaren Basiswiderständen. Um den Blinker zu starten, muss man beide Jumper auf die 27-k Ω -Widerstände stecken. Die Schaltung entspricht dann dem schnellen Wechselblinker aus Abschnitt 10.5. Wenn man beide Jumper entfernt, wird das Blinken immer schwächer und immer langsamer. Man kann sich vorstellen, dass jemand mit einem Zug abreist und aus dem Fenster winkt, bis er langsam in der Ferne verschwindet.

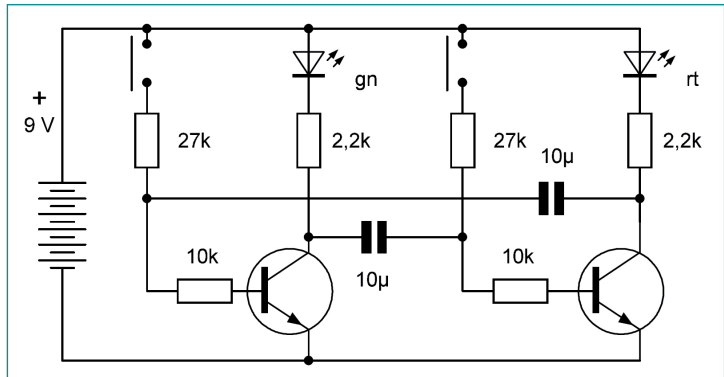
Eigentlich dürfte diese Schaltung gar nicht funktionieren. Denn ohne die Ladewiderstände dürfte die Basisspannung nicht mehr so weit ansteigen, dass der Transistor wieder in den leitenden Zustand kippt. Und mit idealen Kondensatoren würde es auch nicht funktionieren. Aber die verwendeten keramischen Kondensatoren haben den schon beobachteten Nachlade-Effekt. Auch nach längerer Zeit streben sie immer noch etwas in Richtung des vorangegangenen Ladezustands. Das wirkt effektiv wie ein langsam abnehmender Isolations-Fehlerstrom, der den Blinker bis zu eine Minute nach dem Abschalten noch langsam weiterlaufen lässt. Ähn-

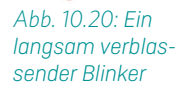
10

liche Eigenschaften haben auch Elektrolytkondensatoren, mit denen die Schaltung auch funktionieren würde.

Statt der beiden Start-Jumper reicht auch eine Berührung der Kontakte, um den Blinker wieder neu zu starten oder wieder etwas heller und schneller zu stellen. Der Hautwiderstand in der Größenordnung von $1\text{ M}\Omega$ bildet dann die Basiswiderstände.

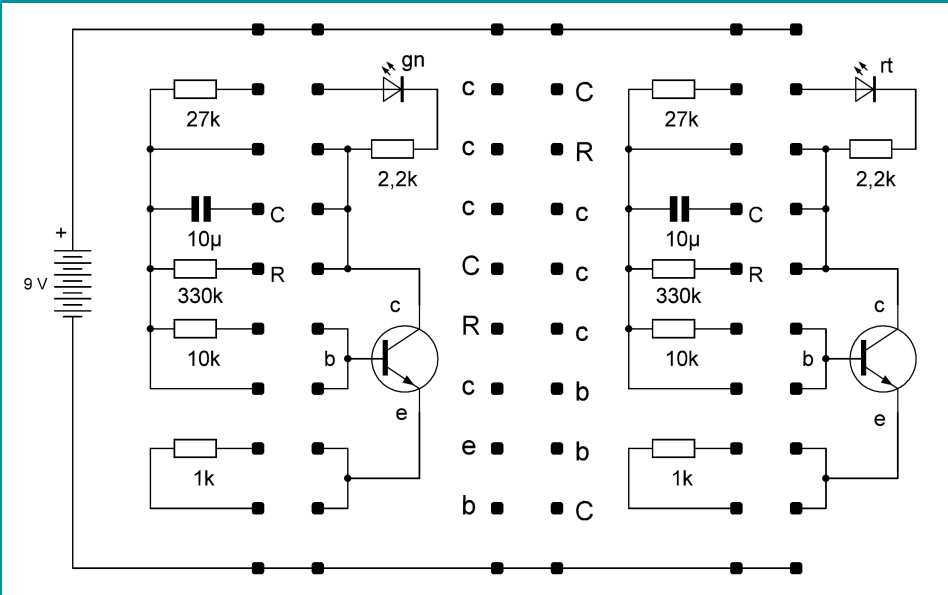
Abb. 10.19: Abschaltung der Basiswiderstände

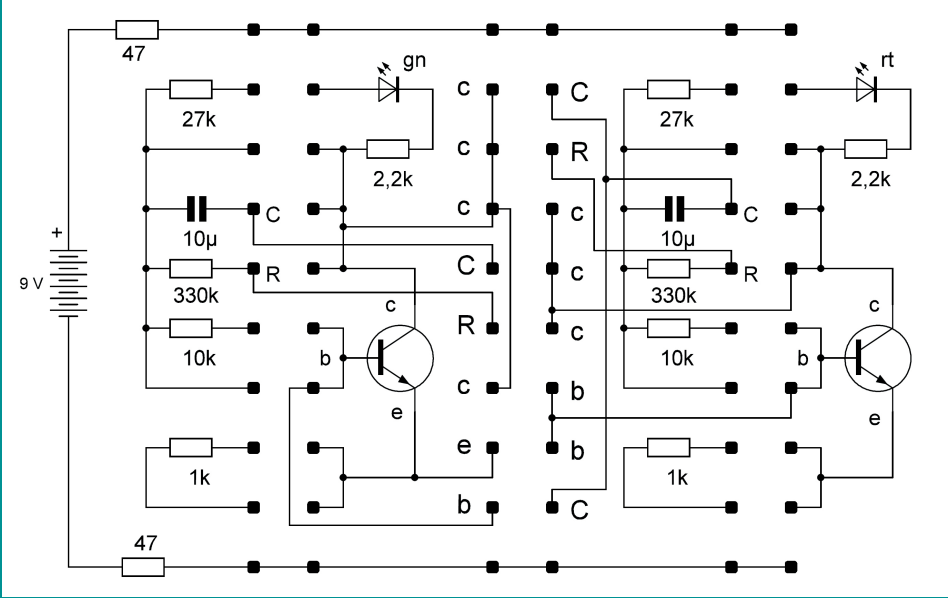




AANHANG

Anschlusspläne zum Ausschneiden:





Das Franzis Lernpaket

Grundsaltungen der Elektronik

Mit diesem Franzis-Lernpaket bauen Sie ein voll ausgestattetes Experimentiersystem, mit dem Sie sich Ihr Wissen in der Halbleiter-Schaltungstechnik aneignen oder vertiefen können. Die Bauteile sind fertig aufgelötet, nur die Verbindungen müssen noch gesteckt werden, und schon hat man eine voll funktionsfähige Schaltung.

Schnelle Experimente

Die Verbindungstechnik mit Jumpers garantiert die schnellste und sicherste Art, eine Schaltung zu bauen. Schaltungsvarianten und neue Ideen sind damit blitzschnell getestet. Nach wenigen Experimenten kennt jeder die Platine so genau, dass er eigene Schaltungen entwickeln kann.

Sichere Versuche

Alle vorgestellten Schaltungen lassen sich blitzschnell und fehlerfrei nachbauen. Auch wenn bei eigenen Versuchen doch einmal ein Fehler passieren sollte, ist dank der eingebauten Strombegrenzung eine Beschädigung von Bauteilen ausgeschlossen.

Ein leicht verständliches Handbuch

Das umfangreiche illustrierte Handbuch bietet Unterstützung für den Einstieg in die Elektronik und erläutert Schritt für Schritt den Aufbau der Schaltungen. So gelingt die praktische Umsetzung, und schon bald können Sie mit dem System auch eigene anspruchsvolle Projekte entwickeln.

Projekte, die wirklich funktionieren!

Dieses Franzis Lernpaket zeichnet sich durch hohe Qualität und leichte Umsetzbarkeit auch für Einsteiger aus. Alle Experimente wurden sorgfältig überprüft und auf ihre Praxistauglichkeit getestet. Sie können also sicher sein, dass auch bei Ihnen zu Hause alles klappt. Franzis-Lernpakete halten, was sie versprechen: Projekte, die wirklich funktionieren!

Zusätzlich erforderlich: LötKolben, Lötzinn, 9-V-Blockbatterie

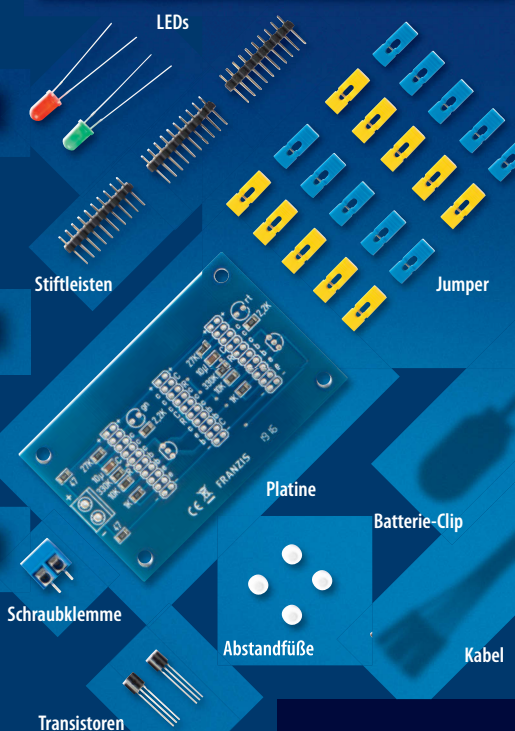
Mehr Bücher, Elektronik und Software unter www.elo-web.de

© 2016 Franzis Verlag GmbH
Richard-Reitzner-Allee 2, D-85540 Haar b. München 2016/01

Das bauen Sie selbst:

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| • Alarmanlage | • Gute-Nacht-Licht |
| • Blitzlicht | • Berührungssensor |
| • Nachlaufsteuerung | • Touch-Dimmer |
| • Elektrofahrsensor | • Abend-Licht |
| • Lichtsensor | • RS-Flipflop |
| • Konstantstromquelle | • Wechselblinker |

Die Bauteile im Überblick



Für Kinder unter
14 Jahren
nicht geeignet!



PDF ISBN 978-3-645-25361-9

FRANZIS