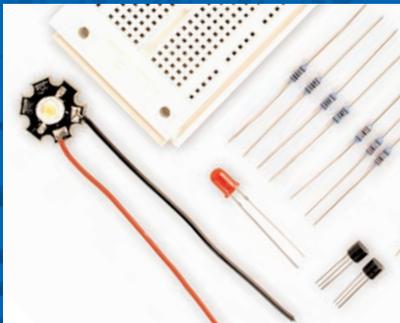


Burkhard Kainka

# Experimente mit Hochleistungs-LEDs



Power-LEDs in der Praxis!

- ▶ Experimente und Schaltungstechnik
- ▶ Messtechnik und Halbleiter-Grundlagen
- ▶ Praktisch einsetzbare Halbleiterschaltungen
- ▶ Stromversorgung und Spannungswandler

Kainka

# **Experimente mit Hochleistungs-LEDs**

**FRANZIS**  
*DO IT YOURSELF*

Burkhard Kainka

# Experimente mit Hochleistungs-LEDs

Power-LEDs in der Praxis!

## **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.

### Hinweis

Alle Angaben in diesem Buch wurden vom Autor mit größter Sorgfalt erarbeitet bzw. zusammengestellt und unter Einschaltung wirksamer Kontrollmaßnahmen reproduziert. Trotzdem sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Der Verlag und der Autor sehen sich deshalb gezwungen, darauf hinzuweisen, dass sie weder eine Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für Folgen, die auf fehlerhafte Angaben zurückgehen, übernehmen können. Für die Mitteilung etwaiger Fehler sind Verlag und Autor jederzeit dankbar.

Internetadressen oder Versionsnummern stellen den bei Redaktionsschluss verfügbaren Informationsstand dar. Verlag und Autor übernehmen keinerlei Verantwortung oder Haftung für Veränderungen, die sich aus nicht von ihnen zu vertretenden Umständen ergeben. Evtl. beigefügte oder zum Download angebotene Dateien und Informationen dienen ausschließlich der nicht gewerblichen Nutzung. Eine gewerbliche Nutzung ist nur mit Zustimmung des Lizenzinhabers möglich.

© 2007 Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing

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.

**Satz:** Fotosatz Pfeifer, 82166 Gräfelfing  
**art & design:** [www.ideehoch2.de](http://www.ideehoch2.de)

**ISBN 978-3-7723-5998-9**

# Inhalt

<b>1 Vorbereitungen</b> .....	9
<b>2 LED-Grundversuche</b> .....	16
2.1 Betriebsanzeige .....	16
2.2 Weiße LED-Lampe .....	19
2.3 Maximale Helligkeit .....	21
2.4 Strom sparen .....	21
2.5 Nur drei Volt .....	23
2.6 Umschaltbare Helligkeit .....	24
2.7 Helligkeitsvergleich .....	26
2.8 Blitzlicht .....	27
<b>3 Technische Daten</b> .....	30
3.1 Luxeon LUMILEDs .....	30
3.2 Osram Golden Dragon .....	33
3.3 Die 1-W-LED aus dem Lernpaket .....	35
3.4 Lumen und Candela .....	38
3.5 Farben und Wellenlängen .....	40
<b>4 Halbleiter und Sperrschichten</b> .....	42
4.1 Diodensperrschichten .....	42
4.2 Diodenkennlinien .....	43
4.3 Kennlinie der Power-LED .....	46
4.4 Messung der Kristalltemperatur .....	50
<b>5 Transistorschaltungen</b> .....	53
5.1 Aufbau und Grundfunktion .....	53
5.2 Transistorschalter .....	55
5.3 Transistorverluste .....	57
5.4 Emitterfolger .....	58
5.5 Softstart .....	59
5.6 Konstantstromquelle .....	60
<b>6 Die Darlington-Schaltung</b> .....	63
6.1 Berührungssensor .....	63
6.2 LED als Fotodiode .....	64

6.3	LED als Fotozelle .....	66
6.4	Minutenlicht .....	66
<b>7</b>	<b>Kippschaltungen .....</b>	<b>69</b>
7.1	RS-Flip-Flop .....	69
7.2	Blinker .....	70
7.3	Automatikblitzer .....	72
7.4	Toggle-Flip-Flop .....	73
<b>8</b>	<b>Stromversorgung und LED-Beleuchtungen .....</b>	<b>75</b>
8.1	LED-Konverter für Netzbetrieb .....	75
8.2	Konstantstromquelle mit LM317 .....	79
8.3	LED-Dimmer .....	81
8.4	Spannungswandler mit NE555 .....	83
8.5	Konstantstrom-Schaltregler mit LM2574 .....	85
8.6	Dimmer-Schaltregler .....	88
8.7	3-A-Schaltregler LM2576 .....	89
8.8	Step-up-Wandler PR4401/02 .....	91
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>95</b>

# 1 Vorbereitungen

Eigentlich braucht man für die Arbeit mit diesem Buch nur eine fertig auf einem Kühlblech montierte Power-LED, ein paar Widerstände, Transistoren und Kondensatoren und eine Batterie. Alle Bauteile sind relativ preiswert im Elektronik-Fachhandel zu bekommen. Wer bereits genügend Erfahrungen mit dem Lötkolben hat, kann jede Schaltung aus dem Buch z. B. auf einer Lochrasterplatine aufbauen. Einfach und zeitsparend sind aber auch Versuchsschaltungen auf einer Labor-Steckplatine. Die Bauteile nutzen kaum ab und können mehrfach für unterschiedliche Versuche verwendet werden.

Damit die Bauteilebeschaffung einfacher wird, hat der Franzis-Verlag ein komplettes „Lernpaket Power-LEDs“ zusammengestellt, dessen Material die wichtigsten Schaltungen in diesem Buch abdeckt. Wenn Sie das Buch zusammen mit dem Lernpaket erworben haben, brauchen Sie nur noch vier Mignonbatterien, um mit den Versuchen zu beginnen. Falls Sie das Buch allein gekauft haben, können Sie eine Power-LED beschaffen und auf vorhandenes Material aus der Bastelkiste zurückgreifen. Im Anhang des Buches finden Sie Bezugsadressen für die benötigten Bauteile.

Das Buch beginnt mit den wichtigsten Grundversuchen, die rezeptartig vorgestellt werden und einfach nur aufgebaut und getestet werden sollen. In den folgenden Kapiteln geht es dann tiefer in die Elektronik und speziell in die Grundlagen der Transistor-Schaltungstechnik. Sie erhalten damit Anregungen für fortgeschrittene Projekte und Entwicklungen. Hier sollen zunächst die Bauteile aus dem Lernpaket vorgestellt werden. Die folgende Übersicht zeigt Ihnen die Bauteile in ihrem realen Aussehen und als Schaltsymbole, wie sie in den Schaltplänen verwendet werden.

## Die Power-LED

Die weiße 1-W-LED befindet sich fertig montiert auf einem sternförmigen Alu-Kühlkörper. Die Kühlung spielt eine besondere Rolle. Deshalb ist der eigentliche Metallblock der LED mit Wärmeleitpaste aufgesetzt. Eine dünne Trägerplatine sorgt für die Isolierung und den Wärmekontakt. Anschlussflächen dienen der Verbindung mit Anschlusskabeln. Speziell für das Lernpaket wurden bereits farblich gekennzeichnete Kabel angelötet.



Abb. 1.1: Die Leuchtdiode

Beachten Sie immer die korrekte Polung, da das Bauteil empfindlich gegen eine Falschpolung der Spannung ist. Auf der Trägerplatine sind der Plus- und der Minuspol markiert. Außerdem sind die Anschlüsse farblich gekennzeichnet. Der Plusanschluss ist rot, der Minusanschluss schwarz.

### Das Steckfeld

Alle Versuche werden auf einer Labor-Experimentierplatine aufgebaut. Das Steckfeld mit insgesamt 270 Kontakten im 2,54-mm-Raster sorgt für sichere Verbindungen der Bauteile.

Das Steckfeld hat im mittleren Bereich 230 Kontakte, die jeweils durch vertikale Streifen mit 5 Kontakten leitend verbunden sind. Zusätzlich gibt es am Rand 40 Kontakte für die Stromversorgung, die aus zwei horizontalen Kontaktfederstreifen mit 20 Kontakten bestehen. Das Steckfeld verfügt damit über zwei unabhängige Versorgungs-

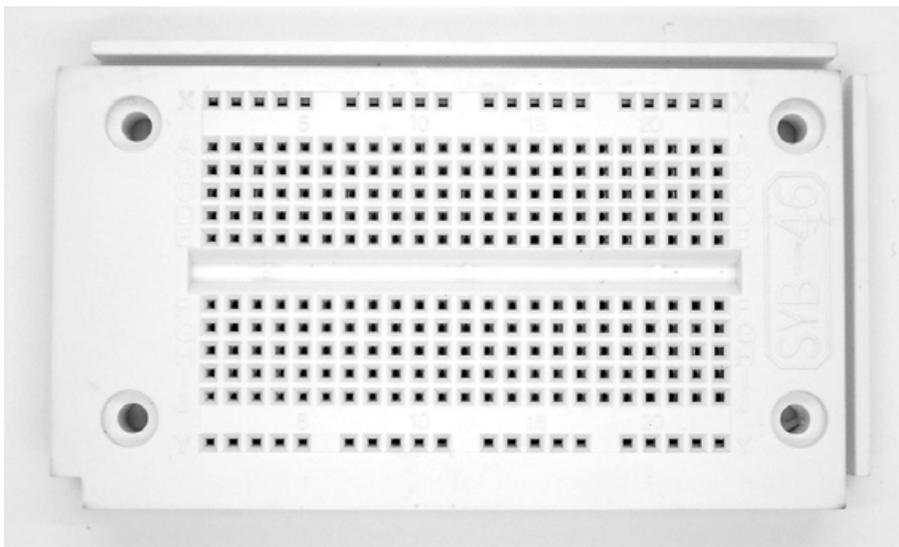


Abb. 1.2: Das Experimentierfeld

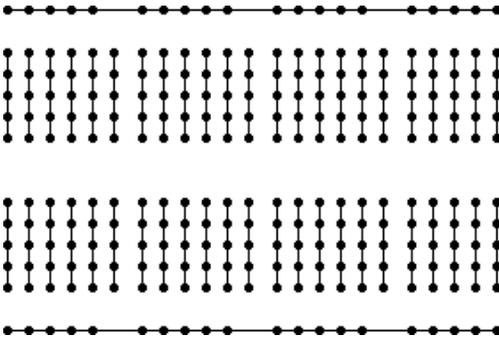


Abb. 1.3: Die internen Kontaktreihen

schienen. Abb. 1.3 zeigt alle internen Verbindungen. Man erkennt die kurzen Kontaktreihen im Mittelfeld und die langen Versorgungsschienen am Rand.

Das Einsetzen von Bauteilen benötigt relativ viel Kraft. Die Anschlussdrähte knicken daher leicht um. Wichtig ist, dass die Drähte exakt von oben eingeführt werden. Dabei hilft eine Pinzette oder eine kleine Zange. Ein Draht wird möglichst kurz über dem Steckbrett gepackt und senkrecht nach unten gedrückt. So lassen sich auch empfindliche Anschlussdrähte, wie die verzinnenden Enden des Batterieclips oder der Power-LED, einsetzen.

Für die Versuche benötigen Sie kurze und längere Drahtstücke, die Sie passend von dem beiliegenden Schaltdraht abschneiden müssen. Zum Abisolieren der Drahtenden hat es sich als praktisch erwiesen, die Isolierung mit einem scharfen Messer rundherum einzuschneiden.

## Die Batterie

Die meisten Versuche in diesem Buch werden mit Batterien bei einer Spannung von 6 V durchgeführt. Verwenden Sie vier Mignonalkalizellen oder wahlweise auch Mignon-NiMh-Akkus, wobei allerdings die Spannung nur etwa 4,8 V beträgt. Das Batte-

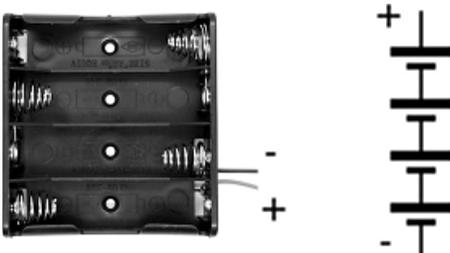


Abb. 1.4: Die Batterie real und als Schaltsymbol



Abb. 1.5: Die Leuchtdiode

riefach ist mit einem roten (Plus) und einem schwarzen (Minus) Anschlusskabel versehen.

Die Kabelenden sind abisoliert und verzinnt. Sie sind damit steif genug, um sie in die Kontakte des Steckbretts einzuführen. Allerdings können sie durch häufiges Stecken ihre Form verlieren und aufspießen. Es wird daher empfohlen, die Batterieanschlüsse immer angeschlossen zu lassen und zum Abschalten nur eine der Batterien aus dem Fach zu nehmen.

### Leuchtdioden

Das „Lernpaket LEDs“ enthält, außer der weißen Power-LED, eine rote Standard-LED. Bei allen Leuchtdioden muss grundsätzlich die Polung beachtet werden. Der Minusanschluss heißt *Kathode* und liegt am kürzeren Anschlussdraht. Der Plusanschluss ist die *Anode*. Im Inneren der LED erkennt man einen kelchartigen Halter für den LED-Kristall, der an der Kathode liegt. Der Anodenanschluss ist mit einem extrem dünnen Drähtchen mit einem Kontakt auf der Oberseite des Kristalls verbunden. Achtung: Anders als Glühlämpchen dürfen LEDs im Normalfall nicht direkt mit einer Batterie verbunden werden. Es ist fast immer ein Vorwiderstand nötig.

### Widerstände

Die Widerstände im Lernpaket sind Metallschichtwiderstände mit Toleranzen von  $\pm 1\%$ . Die Widerstandsschicht ist auf einen Keramikstab aufgebracht und mit einer Schutzschicht überzogen. Die Beschriftung erfolgt in Form von Farbringen. Neben dem Widerstandswert ist auch die Genauigkeitsklasse angegeben.

Widerstände gibt es üblicherweise in den Werten der E24-Reihe, wobei jede Dekade 24 Werte mit etwa gleichmäßigem Abstand zum Nachbarwert enthält.



Abb. 1.6: Ein Widerstand

**Tabelle 1.1:** Widerstandswerte nach der Normreihe E24

1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1
5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Der Farbcode verwendet vier Ringe für den Widerstand und einen Ring für die Toleranz. Die ersten drei Ringe stehen für drei Ziffern, der vierte für einen Multiplikator des Widerstandswerts in Ohm. Ein vierter Ring gibt die Toleranz an.

**Tabelle 1.2:** Der Widerstands-Farbcode

Farbe	Ring 1 1. Ziffer	Ring 2 2. Ziffer	Ring 3 3. Ziffer	Ring 4 Multiplikator	Ring 5 Toleranz
Schwarz		0	0	1	
Braun	1	1	1	10	1 %
Rot	2	2	2	100	2 %
Orange	3	3	3	1.000	
Gelb	4	4	4	10.000	
Grün	5	5	5	100.000	0,5 %
Blau	6	6	6	1.000.000	
Violett	7	7	7	10.000.000	
Grau	8	8	8		
Weiß	9	9	9		
Gold				0,1	
Silber				0,01	

Ein Widerstand mit den Farbringen Rot, Rot, Schwarz, Gold und Braun hat den Wert 22 Ohm bei einer Toleranz von 1 %. Im Lernpaket befinden sich jeweils zwei Widerstände der folgenden Werte:

- 22  $\Omega$  Rot, Rot, Schwarz, Gold, Braun
- 100  $\Omega$  Braun, Schwarz, Schwarz, Schwarz, Braun
- 1 k $\Omega$  Braun, Schwarz, Schwarz, Braun, Braun
- 10 k $\Omega$  Braun, Schwarz, Schwarz, Rot, Braun

Metallschichtwiderstände mit insgesamt fünf Ringen sind oft schwieriger zu lesen als die älteren Kohleschichtwiderstände mit nur vier Ringen. Die Farben Rot, Orange und Braun sind teilweise nur schwer zu unterscheiden. Da hilft es bei der Orientierung, dass der letzte Ring grundsätzlich braun ist.



Abb. 1.7: Der Elektrolytkondensator

## Kondensatoren

Ein Kondensator besteht aus zwei Metallflächen und einer Isolierschicht. Legt man eine elektrische Spannung an, bildet sich zwischen den Kondensatorplatten ein elektrisches Kraftfeld, in dem Energie gespeichert ist. Ein Kondensator mit großer Plattenfläche und kleinem Plattenabstand hat eine große Kapazität, speichert also bei einer gegebenen Spannung viel Ladung. Die Kapazität eines Kondensators wird in Farad (F) gemessen. Das Isoliermaterial (Dielektrikum) vergrößert die Kapazität gegenüber Luftisolation. Große Kapazitäten erreicht man mit Elektrolytkondensatoren (Elkos). Das Dielektrikum besteht aus einer sehr dünnen Schicht Aluminiumoxid. Der Elko enthält einen flüssigen Elektrolyten und aufgewickelte Aluminiumfolien mit großer Oberfläche. Die Spannung darf nur in einer Richtung angelegt werden. In der falschen Richtung fließt ein Leckstrom und baut die Isolationsschicht allmählich ab, was zur Zerstörung des Bauteils führt. Der Minuspol ist durch einen weißen Streifen gekennzeichnet und hat einen kürzeren Anschlussdraht. Das Lernpaket enthält Elkos mit 1.000 und 47  $\mu\text{F}$ .

## Transistoren

Transistoren sind Bauelemente zur Verstärkung kleiner Ströme. Das Lernpaket enthält zwei NPN-Transistoren BC548B. Die Anschlüsse des Transistors heißen Emitter (E), Basis (B) und Kollektor (C). Der Basisanschluss liegt in der Mitte. Der Emitter liegt rechts, wenn Sie auf die Beschriftung schauen und die Anschlüsse nach unten zeigen.

## Der Tastschalter

Der Tastschalter im Lernpaket besitzt einen Schließkontakt mit zwei Anschlüssen, die jeweils doppelt herausgeführt sind.

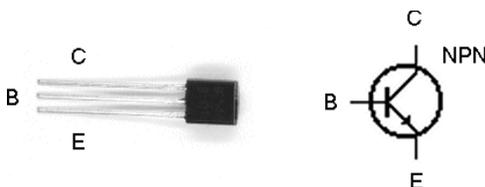


Abb. 1.8: Der Transistor

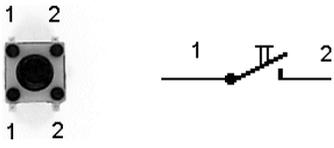


Abb. 1.9: Der Tastschalter

# 4 Halbleiter und Sperrschichten

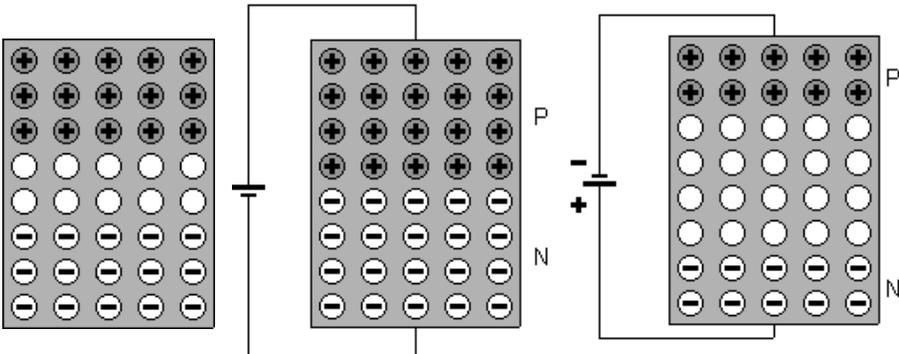
Leuchtdioden sind eine besondere Form der Halbleiterdiode. Wie andere Dioden leiten sie den Strom nur in einer Richtung. Die Halbleitertechnik hat seit der Mitte des 20. Jahrhunderts zu einer Revolution in der Elektronik geführt. Wer mit Dioden, Transistoren und integrierten Schaltkreisen arbeiten möchte, sollte eine elementare Vorstellung von den physikalischen Grundlagen der Halbleitertechnik haben.

## 4.1 Diodensperrschichten

Halbleiter liegen in ihrer Leitfähigkeit zwischen den Metallen und den Isolatoren, wobei eine ganz scharfe Einteilung nicht möglich ist. Zu den Halbleitern gehören, neben Silizium, auch Germanium, Kohlenstoff und Verbindungen aus drei- und fünfwertigen Elementen wie z. B. Galliumarsenid, das in Leuchtdioden verwendet wird. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters steigt allgemein bei einer Erwärmung an.

Das am meisten verwendete Halbleitermaterial ist Silizium. Im abgeleiteten Sinne des Wortes nennt man Halbleiter auch solche Bauelemente, die aus Halbleitermaterial gebaut sind, also z. B. Dioden und Transistoren. Man verwendet für diese Bauelemente kein reines Silizium, sondern solches, das mit Fremdatomen gezielt verunreinigt (dotiert) wurde, um eine bestimmte Leitfähigkeit herzustellen. Verwendet man fünfwertige Stoffe (z. B. Phosphor), erhält man freie Elektronen und damit eine negative (N-)Leitfähigkeit. Mit dreiwertigen Stoffen (z. B. Aluminium) erreicht man Elektronenfehlstellen, die zu einer P-Leitfähigkeit führen. Dabei wandern Elektronenlöcher quasi als positive Ladungsträger durch den Kristall, indem benachbarte Elektronen ein Loch füllen und damit wieder ein neues Loch zurücklassen. Die Leitfähigkeit des Materials kann durch unterschiedlich starke Dotierung in weiten Grenzen eingestellt werden. Dioden und Transistoren bestehen aus mehreren Schichten unterschiedlich dotierten Siliziums. Zwischen den Schichten bilden sich isolierende Sperrschichten aus.

Dioden sind Halbleiter-Bauelemente, die den Strom nur in einer Richtung leiten. Man verwendet z. B. Silizium und erzeugt zwei Schichten aus n- und p-dotiertem Material. An der Berührungsfläche zwischen beiden Schichten bildet sich eine nicht leitende Sperrschicht geringer Dicke. Freie Elektronen füllen in diesem Bereich



**Abb. 4.1:** Schichten-  
aufbau einer Diode

**Abb. 4.2:** Diode in  
Durchlassrichtung

**Abb. 4.3:** Vergrößerung der  
Sperrschicht in Sperrrichtung

Löcher, sodass, wie im reinen Silizium, praktisch keine freien Ladungsträger mehr vorhanden sind. Die Diode ist damit zunächst ein Nichtleiter.

Legt man an die äußeren Kontakte der Diode eine kleine Spannung, vergrößert oder verkleinert sich die Sperrschicht. Zunächst soll der N-Anschluss mit dem Minuspol und der P-Anschluss mit dem Pluspol 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 die N- und die P-Schicht zu berühren, d. h., die Sperrschicht hebt sich auf. Damit fließt nun 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 besser. An eine typische Diode vom Typ 1N4004 kann eine Sperrspannung von bis zu 400 V gelegt werden.

Man kann die Diode als elektrisches Ventil bezeichnen, da sie den Strom nur in einer Richtung passieren lässt. Sie wird daher häufig als Gleichrichter eingesetzt.

## 4.2 Diodenkennlinien

Als Kennlinie bezeichnet man ein Diagramm, das wichtige Größen, hier Spannung und Stromstärke, in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit darstellt. Für jeden Diodentyp ergibt sich ein typischer Verlauf der Durchlasskennlinie. So erkennt man z. B. Leuchtdioden (LED) an ihrer relativ großen Durchlassspannung von über 1,5 V.

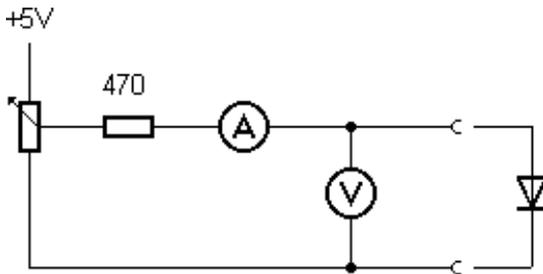


Abb. 4.4: Aufbau zur Aufnahme von Kennlinien

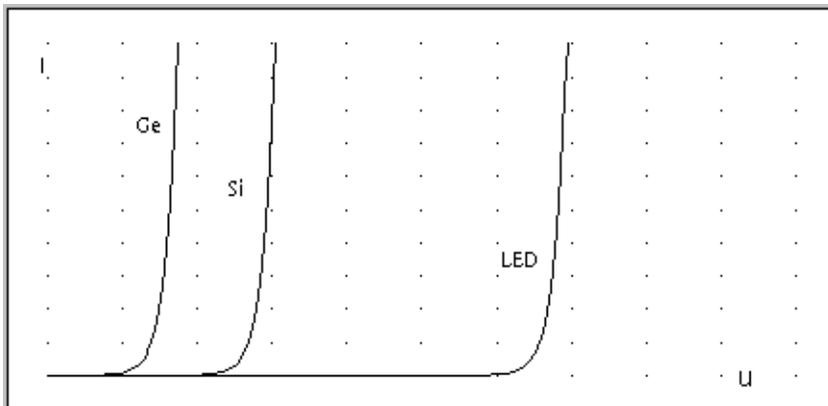


Abb. 4.5: Messergebnisse für verschiedene Dioden

Zur Aufnahme einer Kennlinie benötigt man nach Abb. 4.4 eine regelbare Spannungsquelle oder eine feste Spannungsquelle und ein Potenziometer. Man misst nacheinander für einige Messpunkte die Spannung und die Stromstärke des Prüflings. Die Wertepaare werden in einer Tabelle aufgelistet und dann in ein Diagramm übertragen.

Die Kennlinien verschiedener Dioden sind zwar gegeneinander verschoben, sie zeigen jedoch bei nicht zu großen Strömen alle den gleichen steilen Anstieg oberhalb einer gewissen Schwelle. Der Anstieg ist exponentiell, wobei jeweils eine Erhöhung um ca. 20 mV zu einer Verdoppelung des Stroms führt. Ein zehnfacher Strom erhöht die Diodenspannung um etwa 60 mV bis 80 mV. Dieser Zusammenhang gilt bei Si-Dioden mit guter Genauigkeit über große Bereiche. Der scheinbare Knick in der Diodenkennlinie ist nur auf den Darstellungsmaßstab zurückzuführen. Trägt man den Diodenstrom im logarithmischen Maßstab gegen die Diodenspannung auf, ergibt sich eine Gerade. Abb. 4.6 zeigt diese Darstellung für eine typische Si-Diode. Der streng exponentielle Verlauf der Kennlinie wird erst bei wesentlich größeren Strömen durch

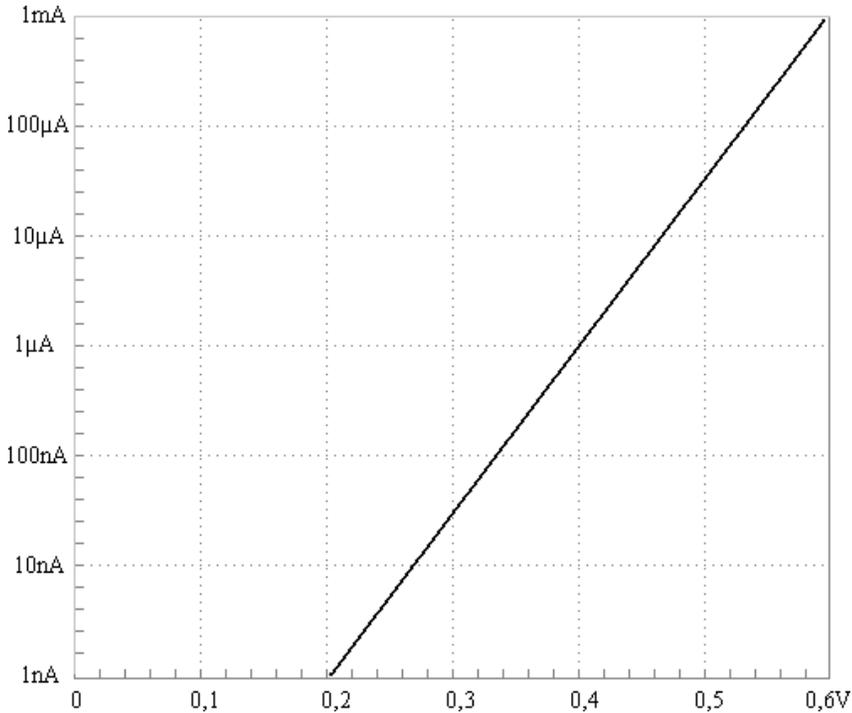


Abb. 4.6: Diodenkennlinie im logarithmischen Maßstab

den Bahnwiderstand der Diode gestört, der auf die endliche Leitfähigkeit des dotierten Siliziums zurückzuführen ist und als ohmscher Widerstand in Reihe zur Sperrschicht in Erscheinung tritt.

Die Durchlassspannung bei gleichem Strom ist stark temperaturabhängig. Sie sinkt mit etwa 2 mV pro °C. Eine Messung der Kennlinie kann daher durch die innere Erwärmung der Diode beeinflusst werden.

Die Diodenkennlinie wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$I = I_S(T) \cdot e^{\left(\frac{U}{m \cdot U_T}\right)}$$

I: Diodenstrom

$I_S$ : Sperrstrom

U: Diodenspannung zwischen Kathode und Anode

$U_T$ : Temperaturspannung,  $U_T = kT/e = 25,5 \text{ mV}$

Boltzmannkonstante  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Absolute Temperatur  $T = 296 \text{ K} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$

Elektronenladung  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$m$ : Korrekturfaktor,  $> 1$

Die Gleichung zeigt einen exponentiellen Anstieg des Diodenstroms in Durchlassrichtung. Die Steilheit ergibt sich aus der allein aus physikalischen Naturkonstanten ableitbaren Temperaturspannung  $U_T$  (25,5 mV bei 23 °C, 25 mV bei 17 °C) und dem Korrekturfaktor  $m$ , der meist etwas größer als 1 ist. Die absolute Lage der Kurve wird durch den Sperrstrom  $I_S$  festgelegt.  $I_S$  ist eine theoretische Größe, die kaum praktisch nachzumessen ist und vielmehr aus der Durchlassspannung an einem beliebigen Arbeitspunkt bestimmt werden kann. Bei Germaniumdioden ist  $I_S$  wesentlich größer (typ. 100 nA) als bei Siliziumdioden (typ. 10 pA), weshalb die Ge-Kennlinie zu kleineren Spannungen hin verschoben ist. Typische Werte für die korrigierte Temperaturspannung  $mU_T$  liegen für beide Typen bei 30 mV ( $m$  ist ca. 1,2).

Sowohl die Temperaturspannung  $U_T$  als auch der Sperrstrom  $I_S$  sind von der Temperatur abhängig. Die Temperatur wird dabei in Kelvin angegeben ( $0 \text{ }^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$ ). Insgesamt ergibt sich ein Abfall der Diodenspannung um etwa 2 mV/K. Auch der Sperrstrom ist stark von der Temperatur abhängig. Eine Temperaturerhöhung um zehn Grad verdoppelt den Sperrstrom.

Jede Diode hat zusätzlich einen gewissen Bahnwiderstand, der wie ein ohmscher Widerstand in Reihe zur Sperrschicht wirkt. Bei größeren Strömen bewirkt er eine Abweichung vom idealen Verlauf der Kennlinie. Der Bahnwiderstand ist bei Si-Dioden relativ klein und kann bei Ge-Dioden und bei LEDs erhebliche Werte annehmen. Bei größeren Strömen kann der differenzielle Innenwiderstand der Sperrschicht kleiner als der Bahnwiderstand werden, sodass der Bahnwiderstand den Verlauf der Kennlinie bestimmt.

### 4.3 Kennlinie der Power-LED

Eine vereinfachte Messung der Diodenkennlinie der Power-LED benötigt nur wenige Messpunkte. Es reicht daher, den Vorwiderstand auszutauschen. Mit 10 k $\Omega$ , 1 k $\Omega$  und 100  $\Omega$  wird ein Bereich von zwei Zehnerpotenzen abgedeckt. An jedem Punkt soll die Durchlassspannung gemessen werden. Aus der Differenz zur Batteriespannung 6 V errechnet man die Spannung am Vorwiderstand und den Strom.

Die Messung brachte für ein Muster der Power-LED die folgenden Ergebnisse.

Vorwiderstand	Diodenspannung	Diodenstrom
10 k $\Omega$	2,49 V	0,35 mA
1 k $\Omega$	2,66 V	3,34 mA
100 $\Omega$	2,94 V	30,6 mA

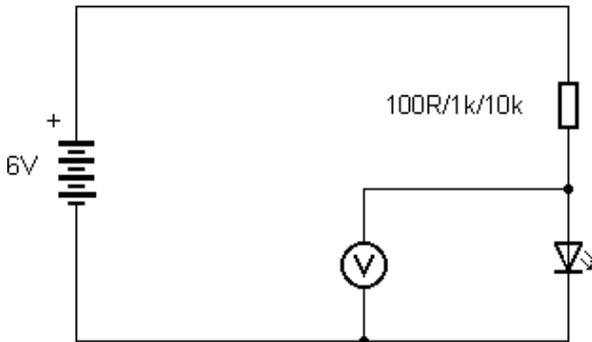


Abb. 4.7: Messung der Diodenspannung bei unterschiedlichen Strömen

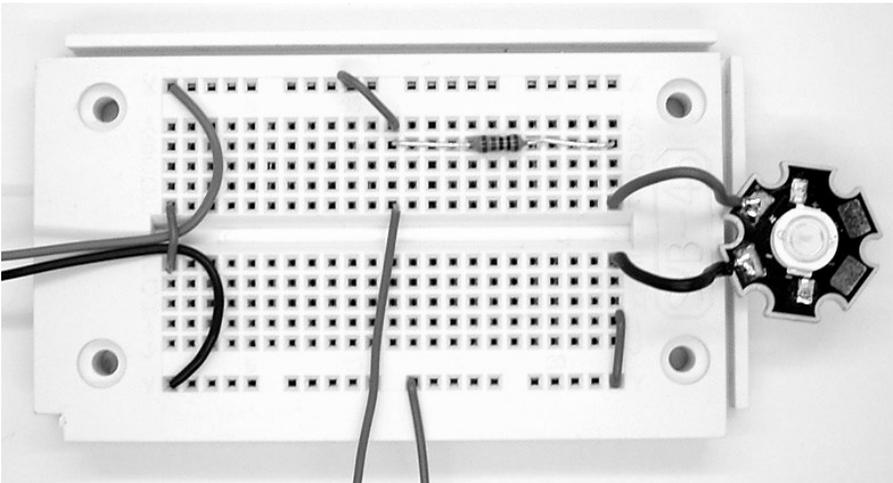


Abb. 4.8: Messung der LED-Spannung

Die Diodenströme ändern sich jeweils etwa um den Faktor 10. Bei einer idealen Diode sollten sich dabei gleiche Differenzen in den gemessenen Diodenspannungen ergeben. Tatsächlich aber führt die erste Stufe zu einem Anstieg um 170 mV, die zweite Stufe aber zu einem Anstieg um 280 mV. Der Unterschied ist bereits auf den Bahnwiderstand zurückzuführen, d. h., zusätzliche 90 mV sind der Spannungsabfall am internen Serienwiderstand. Bei 30 mA ergibt sich daraus ein Widerstand von  $3 \Omega$ .

Wenn man die Diodenkennlinie berechnen möchte, kann von der allgemeinen Diodengleichung ausgegangen werden. Dabei ist in erster Linie die korrigierte Temperaturspannung  $mU_T$  wichtig. Um zunächst noch den Einfluss des Bahnwiderstands zu

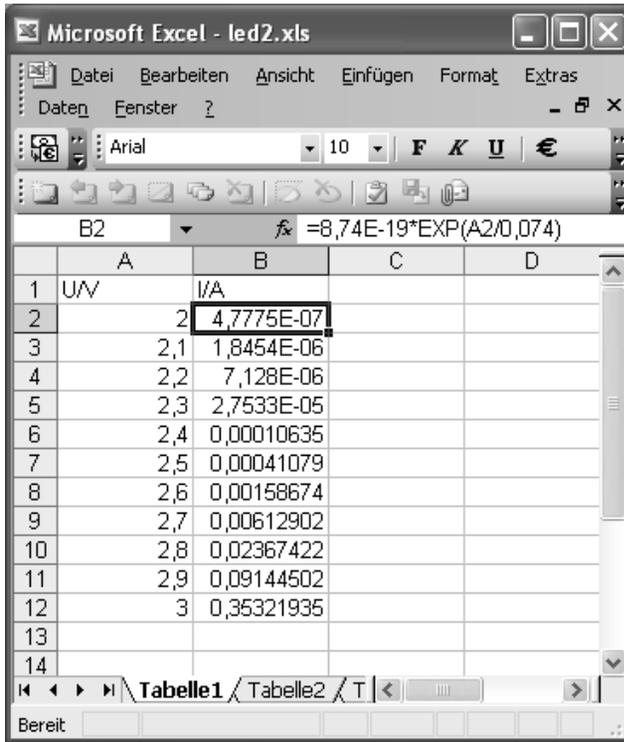


Abb. 4.9: Kennlinienberechnung in Excel

vernachlässigen, sollen die beiden ersten Messpunkte verwendet werden. Während die Durchlassspannung einer Si-Diode bei zehnfachem Strom um 60 mV bis 80 mV ansteigt, fällt die Erhöhung bei der Power-LED mit 170 mV deutlich größer aus. Daraus ergibt sich eine größere Temperaturspannung von 74 mV, der Korrekturfaktor  $m$  liegt also mit etwa  $m = 3$  deutlich höher als bei Si-Dioden. Der Sperrstrom  $I_S$  ergibt sich dann aus dem Vergleich mit einem Messpunkt mit ca.  $8,74 \times 10^{-19}$  A. Mit einer Excel-Tabelle kann nun der theoretische Verlauf der Kennlinie ohne Berücksichtigung des Bahnwiderstands berechnet werden. Die Excel-Formel lautet für die in der Zelle A2 eingetragene Spannung „= 8,74E-19\*EXP(A2/0,074)“.

Abb. 4.9 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Es stimmt im mittleren Bereich zwischen etwa 2,3 V bis 2,6 V gut mit den realen Messergebnissen überein. Eine Erhöhung der Spannung um 100 mV führt jeweils zu einem vierfach größeren Strom. Damit ist die Kennlinie wesentlich flacher als die einer Si-Diode.

Die Kennlinien in Abb. 4.10 zeigen die berechneten Kennlinien einer Si-Diode (links) und der Power-LED (Mitte) im Vergleich zur real gemessenen Kennlinie der Power-

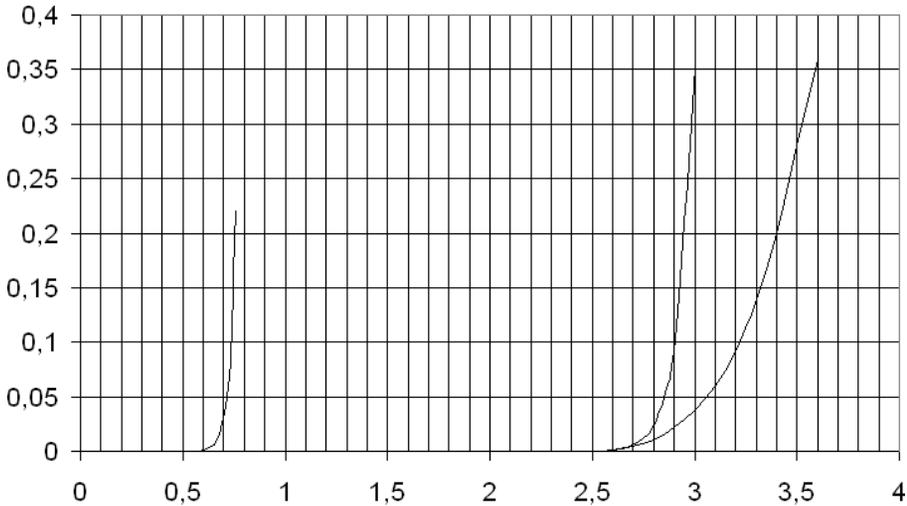


Abb. 4.10: Theoretische und reale Kennlinien

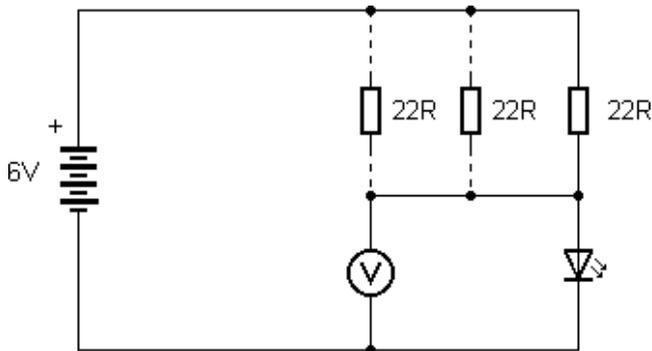


Abb. 4.11: Messung bei größeren Strömen

LED (rechts). Bei größeren Strömen verläuft die reale Kennlinie wesentlich flacher als berechnet, weil der Bahnwiderstand sich zunehmend bemerkbar macht. Die Berechnung lässt bereits bei 3,0 V den Nennstrom von 350 mA erwarten. Tatsächlich wird dieser Strom jedoch erst bei ca. 3,6 V erreicht. Daraus ergibt sich ein Bahnwiderstand von ca. 2  $\Omega$ , während bei kleineren Strömen etwa 3  $\Omega$  ermittelt wurde. Man muss allerdings bedenken, dass die steigende Temperatur bei großem Strom zu einer kleineren Diodenspannung führt, sodass ohne Bahnwiderstand sogar eine Spannung von deutlich unter 3 V bei 350 mA zu erwarten wäre.

Abb. 4.11 zeigt die Messung bei größeren Strömen. Mit dem Material im Lernpaket können drei Ströme durch Parallelschaltung von Widerständen erreicht werden.

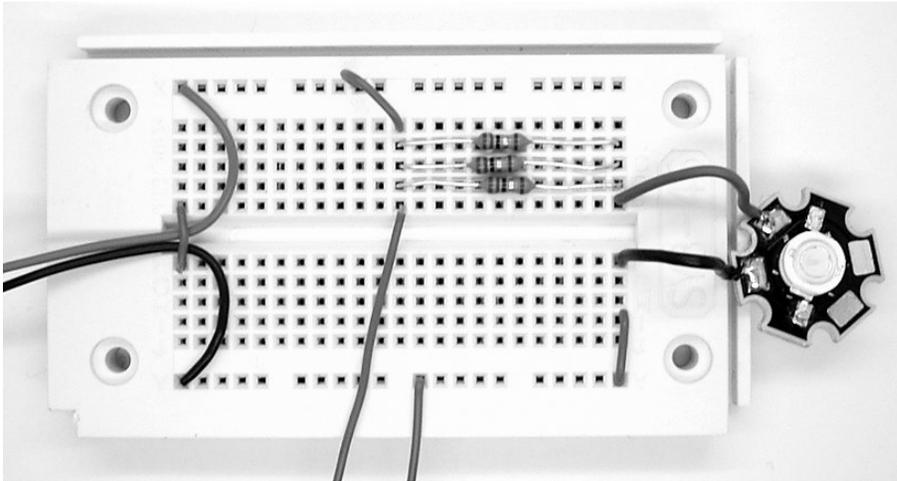


Abb. 4.12: Messung der Diodenspannung bei maximalem Strom

Die Tabelle zeigt typische Messergebnisse mit einem, zwei und drei Widerständen. Die Spannung an der LED ändert sich etwas mit der Temperatur und mit der Einschaltdauer.

Vorwiderstand	Diodenspannung	Diodenstrom
22 $\Omega$	3,17 V	129 mA
11 $\Omega$	3,44 V	233 mA
7,33 $\Omega$	3,64 V	322 mA

## 4.4 Messung der Kristalltemperatur

Jeder Halbleiter verändert seinen Widerstand mit der Temperatur. Bei Siliziumdioden sinkt die Diodenspannung um 2 mV pro Grad, d. h., der Temperaturkoeffizient ist  $T_k = -2 \text{ mV/K}$ . Diese Tatsache wird z. B. für die Temperaturmessung am Siliziumchip eines PC-Prozessors genutzt. Für eine Power-LED wird bei einem Strom von 350 mA ein  $T_k$  von  $-4 \text{ mV/K}$  angegeben. Diese Eigenschaft kann verwendet werden, um die Temperatur in der LED über die Spannung zu messen.

Ein Problem bei der Spannungsmessung besteht darin, dass sich die Kristalltemperatur nach dem Einschalten in wenigen Millisekunden bis auf einen vorläufigen Endwert erhöht. Mit einem Oszilloskop sieht man, dass die Durchlassspannung in den ersten Millisekunden sinkt. Danach folgt eine langsame Abnahme der Spannung, weil der Kühlkörper sich langsamer erwärmt.

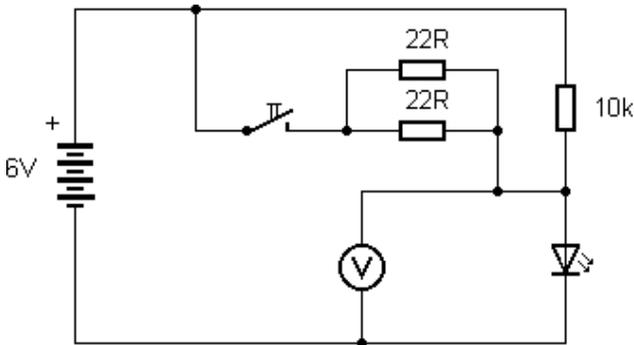


Abb. 4.13: Indirekte Temperaturmessung

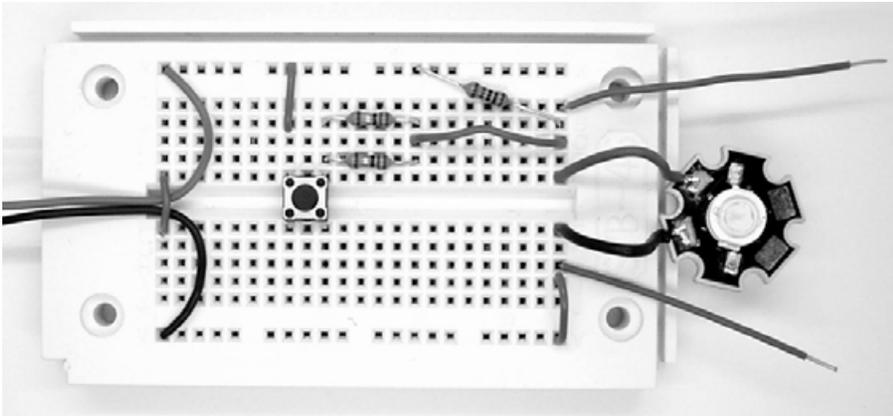


Abb. 4.14: Messung der Kristalltemperatur

Um die Erwärmung auch mit einem Digitalmultimeter messen zu können, muss ein Trick angewandt werden. Während zum Erwärmen ein großer Strom eingeschaltet wird, verwendet man einen kleineren Strom für die eigentliche Messung. Zuerst sollen die beiden 22- $\Omega$ -Widerstände zugeschaltet werden. Damit arbeitet man mit etwa  $2/3$  des zugelassenen Maximalstroms. Wenn nach ca. zwei Minuten der Kühlkörper seine Endtemperatur erreicht hat, wird der Schalter geöffnet. Durch die LED fließt über den 10-k $\Omega$ -Widerstand nur noch ein geringer Messstrom von ca. 3 mA. Sofort nach dem Öffnen des Schalters soll die Diodenspannung gemessen werden. Dann erkennt man eine ansteigende Spannung, während die LED langsam abkühlt. Nachdem die LED vollständig auf die Umgebungstemperatur abgekühlt ist, wird noch einmal die Spannung gemessen.

Der Versuch brachte folgende Ergebnisse:

Diodenspannung 1 (heiß): 2,43 V

Diodenspannung 2 (kalt): 2,50 V

Der gemessene Spannungsanstieg ist also 70 mV. Osram gibt einen Tk von  $-4$  mV/K bei 350 mA an. Demnach müsste man auf eine Temperaturerhöhung von 17,5 K schließen. Das erscheint allerdings wenig realistisch. Geht man davon aus, dass der angegebene Tk aus einem Anteil für die Sperrschicht und einem Anteil für den Bahnwiderstand besteht, ist der für die Messung bei kleinem Strom relevante Tk geringer. Allgemein zeigen Halbleiterdioden bei kleinen Strömen einen Tk von  $-2$  mV/K. Mit dieser Näherung kommt man auf einen Temperaturunterschied von 35 K. Die Raumtemperatur betrug während des Versuchs  $25$  °C. Damit kommt man auf eine Temperatur des Kühlkörpers von  $60$  °C, was durch Vergleichsmessungen mit einem Thermometer im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigt werden konnte.

Das Messergebnis deutet also auf eine Kühlkörpertemperatur von  $60$  °C hin. Bei vollem Strom und einer Leistungsaufnahme von 1 W wurde mit derselben Messmethode eine Temperatur von  $80$  °C bestimmt. Man muss aber bedenken, dass die Sperrschichttemperatur noch etwas höher liegt. Osram gibt einen Wärmewiderstand von 9 K/W zwischen LED-Kristall und Anschluss an. Dazu kommt noch einmal ein Wärmewiderstand in gleicher Größenordnung zwischen dem Metallkörper (der Power-LED) und dem Alu-Kühlkörper. Die Kristalltemperatur wird daher bei voller Leistung um etwa 20 K höher liegen als die Temperatur des Kühlkörpers. Sie liegt damit bei ca.  $100$  °C, also bereits an der erlaubten Obergrenze. Das stimmt gut mit den Datenblattangaben überein, nach denen der maximale Strom nur bis zu einer Umgebungstemperatur von  $30$  °C zulässig ist.

Diese Messmethode lässt sich auch anwenden, wenn eine Power-LED bereits an unzugänglicher Stelle eingebaut wurde. Man kann so feststellen, ob die LED zu heiß wird. Gerade im eingebauten Zustand können ungünstige Umstände eine wirksame Kühlung verhindern, was dann letztlich zu Überhitzung und einem raschen Verlust an Effektivität führt. Umgekehrt lassen sich Maßnahmen für eine bessere Kühlung überprüfen. Man könnte das Kühlblech z. B. auf einer größeren Metallfläche befestigen. Die Messung zeigt dann eine entsprechend geringere Diodentemperatur.

# 7 Kippschaltungen

Eine Kippschaltung nimmt immer einen von zwei Zuständen an: an oder aus. Man bezeichnet eine solche Schaltung auch als *Flip-Flop*. Das Umkippen in den jeweils anderen Zustand kann durch unterschiedliche Vorgänge ausgelöst werden. Außer durch angeschlossene Schalter und Kontakte können die Zustände auch selbstständig wechseln.

## 7.1 RS-Flip-Flop

Jedes Flip-Flop basiert auf der Rückkopplung eines Verstärkers. Mit zwei Emitterstufen erreicht man eine Phasengleichheit zwischen Ausgang und Eingang. In Abb. 7.1 wird die Rückkopplung durch einen Widerstand von 10 k $\Omega$  vom Ausgang auf den Eingang realisiert. Dadurch ist immer einer der beiden Transistoren gesperrt. Wenn der linke Transistor leitet, leitet er den Basisstrom des rechten Transistors ab, der damit gesperrt ist. Damit liegt die Kollektorspannung des Ausgangstransistors hoch und hält über den Rückkoppelwiderstand den Basisstrom des linken Transistors aufrecht. Umgekehrt erhält der linke Transistor keinen Basisstrom, wenn der rechte Transistor leitet und seine Kollektorspannung bis auf die Restspannung abgesunken ist. Beide Zustände sind stabil und können nur durch Einfluss von außen geändert werden.

Nach dem Einschalten der Betriebsspannung ist der Zustand der Schaltung zufällig und kann nicht vorhergesagt werden. Zwei Schaltkontakte können jedoch bestimmte Zustände erzwingen, indem jeweils einer der Transistoren kurz gesperrt wird. Der linke Taster bildet die Set-Funktion und schaltet die LED ein. Der R-Kontakt bildet dagegen den Reset-Schalter, der die LED ausschaltet. Beide Kontakte müssen jeweils nur kurz betätigt werden. Der jeweils eingeschaltete Zustand bleibt dann durch die Rückkopplung bestehen, bis die jeweils andere Taste betätigt wird.

Der im Lernpaket vorhandene Taster bildet den Einschaltkontakt. Der zweite Taster wird im Aufbau nach Abb. 7.2 mit Draht nachgebildet und dient zum Ausschalten der LED. Tippen Sie abwechselnd auf beide Taster, um die LED ein- und auszuschalten.

Im ausgeschalteten Zustand zeigt die LED immer noch ein schwaches Leuchten. Durch den Rückkopplungswiderstand fließt nämlich ein kleiner Strom durch die Basis des linken Transistors und durch die Power-LED. Praktisch wird die LED in die-

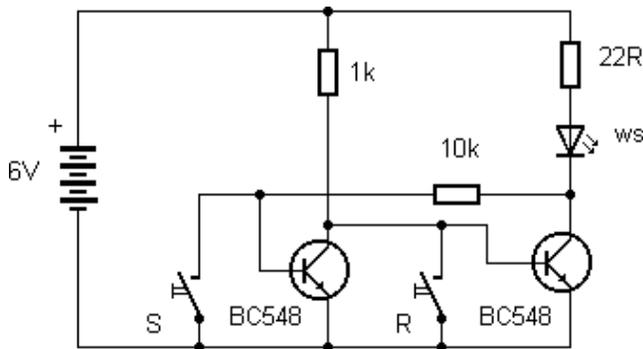


Abb. 7.1: Das Flip-Flop

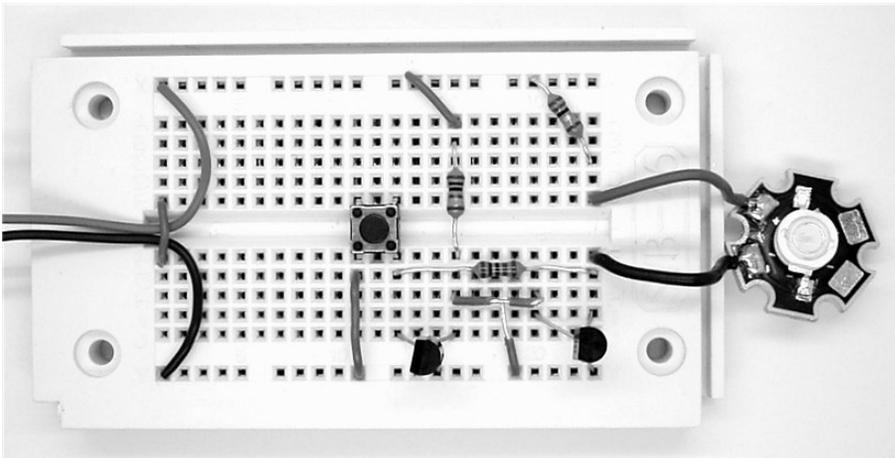


Abb. 7.2: Ein- und Ausschalten per Tastendruck

sem Zustand mit einem Vorwiderstand von  $10\text{ k}\Omega$  betrieben, was einen Strom von ca.  $0,3\text{ mA}$  zur Folge hat. Das kann von Vorteil sein, wenn die Beleuchtung im Dunkeln eingeschaltet werden soll. Das schwache Restlicht reicht nämlich aus, um die Lampe leichter zu finden.

## 7.2 Blinker

Führt man die Rückkopplung eines Flip-Flops über einen Kondensator, bleibt jeder Zustand nur so lange stabil, wie noch ein Lade- oder Entladestrom über den Kondensator fließt. Damit kippt die Schaltung von allein hin und her, d. h., die Power-LED

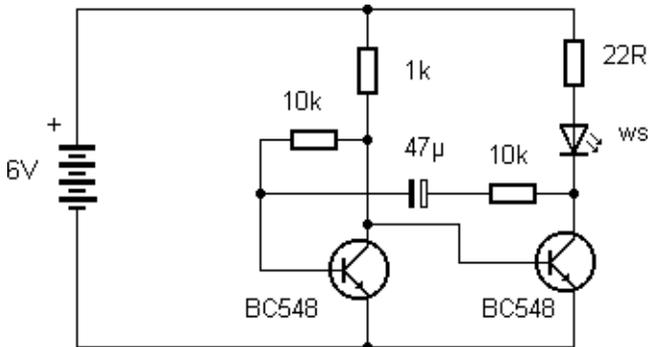


Abb. 7.3: Die astabile Kippschaltung

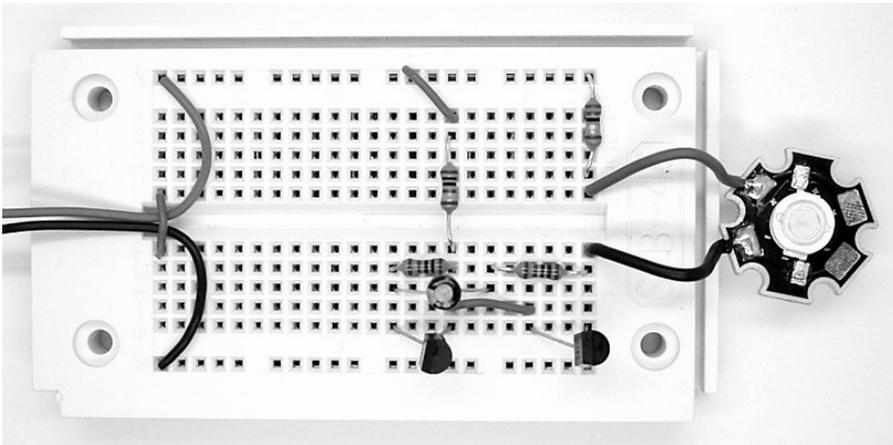


Abb. 7.4: Der LED-Blinker

blinkt. Die Blinkerschaltung in Abb. 7.3 verwendet eine Gegenkopplung des linken Transistors. Der 10-k $\Omega$ -Widerstand zwischen Basis und Kollektor stellt eine Kollektorspannung nahe der Basisschwelle des Ausgangstransistors ein, der damit einen mittleren Kollektorstrom aufweist. Damit leuchtet die Power-LED ohne den Rückkopplungskondensator nur schwach. Mit dem Kondensator kippt die Schaltung dagegen abwechselnd in den leitenden und den gesperrten Zustand. Die LED blinkt also.

Der Blinker arbeitet relativ langsam mit einer Blinkperiode um zwei Sekunden. Testen Sie die Schaltung auch mit 1.000  $\mu$ F. Sie erhalten dann einen extrem langsamen Wechsel in der Größenordnung von Minuten.

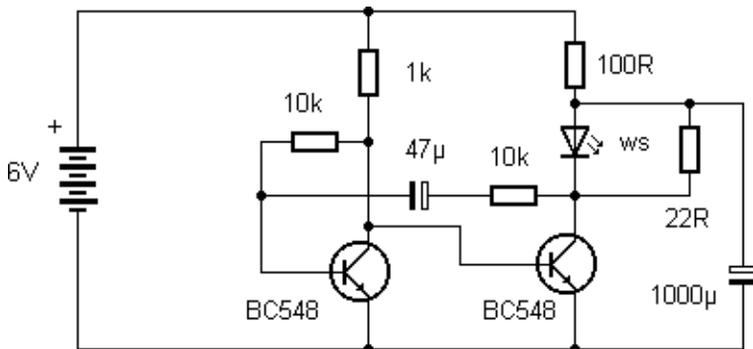


Abb. 7.5: Impulsblitzer

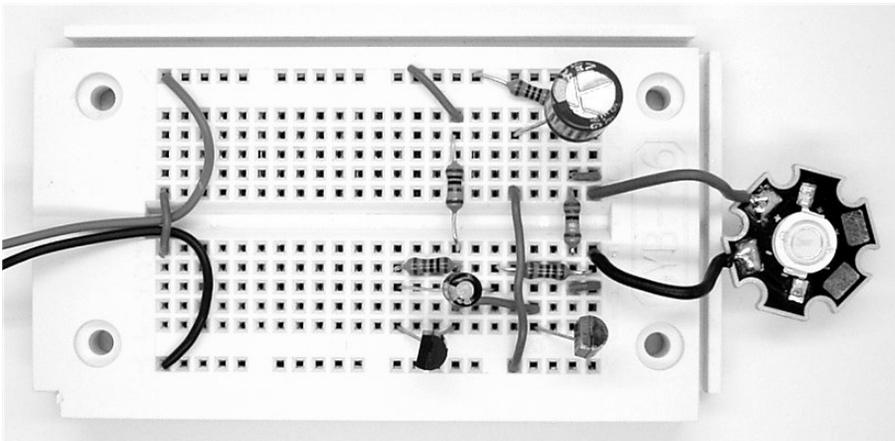


Abb. 7.6: Periodische Lichtblitze

### 7.3 Automatikblitzer

Aus dem Blinker lässt sich mit geringen Änderungen ein automatisches Blitzlicht bauen. Der 1.000- $\mu$ F-Elko lädt sich über den 100- $\Omega$ -Widerstand auf und gibt seine Energie jeweils am Anfang der Leitphase in einem Moment an die LED ab. Um ein längeres Nachleuchten mit geringerer Helligkeit zu verhindern, wird ein zusätzlicher 22- $\Omega$ -Widerstand parallel zur LED verwendet. Die LED-Spannung sinkt dann schnell unter die Diodenschwelle. Ein ähnlicher Lastwiderstand wurde bereits bei dem manuellen Blitzlicht in Kapitel 2.8 verwendet.

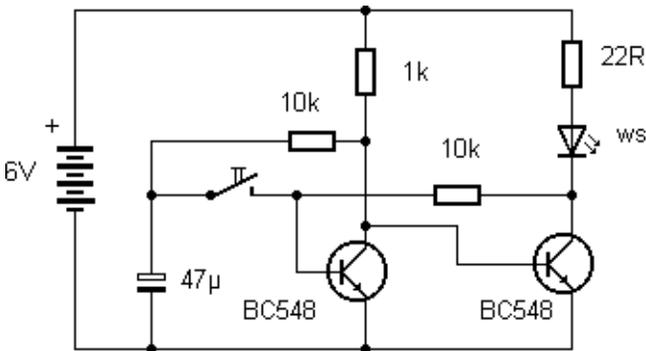


Abb. 7.7: Umschalter mit nur einer Taste

## 7.4 Toggle-Flip-Flop

Ein Toggle-Flip-Flop schaltet den Ausgangszustand mit jedem Eingangsimpuls um. Effektiv wird damit die Eingangsfrequenz durch zwei geteilt. Hier wird die Schaltung eingesetzt, um die LED mit nur einem Taster abwechselnd ein- und auszuschalten.

Die Schaltung ist zunächst identisch mit dem RS-Flip-Flop in Kapitel 7.1. Zusätzlich wird jedoch ein Elko mit  $47\ \mu\text{F}$  auf die Kollektorspannung des ersten Transistors geladen. Nach einigen Millisekunden ist die Kondensatorspannung jeweils genau gegensätzlich zur aktuellen Basisspannung. Wenn die LED gerade eingeschaltet ist, ist die Basisspannung gering, der Kondensator lädt sich jedoch auf eine Spannung um  $0,7\ \text{V}$  auf. Betätigt man nun die Taste, wird der linke Transistor leitend und sperrt den rechten Transistor. Das Flip-Flop kippt also um. Mit dem Öffnen des Tasters kann sich der Elko wieder entladen, sodass die nächste Betätigung des Tasters den linken Transistor sperrt und damit die LED einschaltet.

Auch bei dieser Schaltung bleibt ein geringes Restleuchten auch im ausgeschalteten Zustand bestehen, weil der Rückkoppelwiderstand von  $10\ \text{k}\Omega$  als LED-Vorwiderstand wirkt. Das schwache Leuchten ist von Vorteil, wenn die schaltbare Beleuchtung in dunklen Räumen verwendet werden soll.

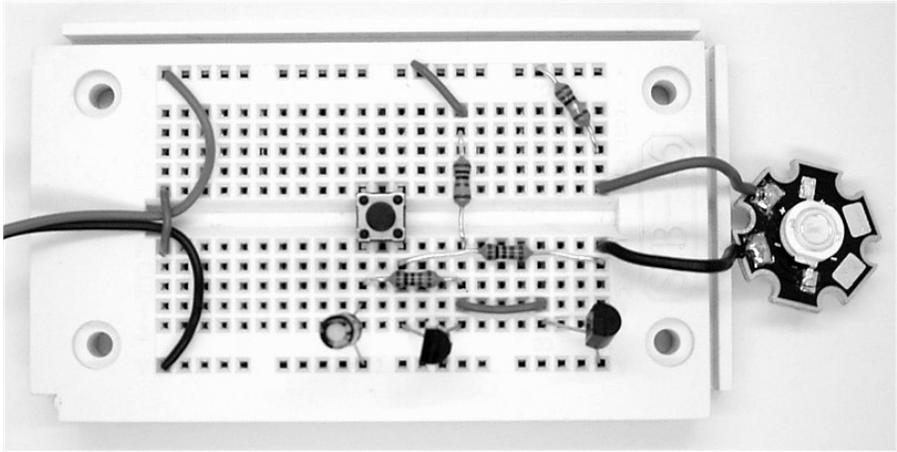


Abb. 7.8: Ein-/Aus-Taster

Burkhard Kainka

# Experimente mit Hochleistungs-LEDs

Moderne Power-LEDs sind auf dem besten Weg, die Lichtquellen der Zukunft zu werden. Eine weiße 1-W-LED bietet besten Wirkungsgrad bei einfachster Schaltungstechnik und unterscheidet sich in der Anwendung kaum von der normalen LED. Allenfalls die höhere Wärmeentwicklung muss genau beobachtet werden.

Bauen Sie Ihre eigene Batterie-Taschenlampe oder kreative Lichtsysteme für Haus und Hof. Dieses Buch liefert Ihnen einen Überblick und zahlreiche Bauvorschläge. Dabei geht es auch um Elektronik-Grundlagen und besondere Schaltungen mit Transistoren oder integrierten Schaltkreisen.

Das Buch richtet sich sowohl an Elektronik-Einsteiger wie auch an fortgeschrittene Anwender. Zahlreiche Grundsaltungen lassen sich ohne Vorkenntnisse aufbauen und erproben. Im Mittelpunkt stehen aber auch die Messtechnik sowie die Planung und Dimensionierung komplexer Schaltungen.

## Aus dem Inhalt

- Schaltungstechnik der Power-LEDs
- Grundlagen der Halbleiter-Schaltungstechnik
- Messtechnische Grundlagen
- Transistoren in Blink- und Blitzschaltungen
- Stromversorgung und Spannungswandler