

## 16.2 Fertigungsverfahren

### 16.2.1 Verbindungen (Fügen)

Durch Fügen werden lösbare oder unlösbare Verbindungen hergestellt (**Übersicht**). Unlösbare Verbindungen können nur durch Zerstörung des Verbindungsmittels, z. B. des Lotes, getrennt werden.

#### 16.2.1.1 Lösbare Verbindungen in der Elektrotechnik

**Schrauben** verwendet man in der Elektrotechnik z. B. zum Verbinden von Sammelschienen oder von Gehäuse und Deckel, zum Befestigen von Drehknöpfen und Schaltern sowie zum Klemmen von Leitern.

**Klemmen (Bild 1)** teilt man in Schraubklemmen und schraublose Klemmen ein. Den notwendigen Kontaktdruck erreicht man durch die Schraube oder durch Federkraft.

**Federklemmverbindungen** sind universelle Verbindungssysteme für ein-, mehr- und feindrähtige Kupferleiter von 0,08 mm<sup>2</sup> bis 35 mm<sup>2</sup>. Dabei verwendet man z. B. das Käfigzugfeder-Anschlussystem (**Bild 2**). Zum Anschließen des Leiters wird die Käfigzugfeder heruntergedrückt und der abisolierte Leiter in die Klemmstelle eingeführt. Der Leiter wird im Bereich der Kontaktzone mit querschnittsgerechter Klemmkraft von der Käfigzugfeder gegen die Stromschiene gedrückt. Käfigzugfeder-Verbindungen sind lösbar, rüttelsicher und wartungsfrei.

Man verwendet sie z. B. für Leiterverbindungen in Abzweigdosen.

**Steckverbinder (Bild 3)** für gedruckte Schaltungen auf Leiterplatten bestehen aus einer Messer- und Federleiste. Die Messerleiste wird auf der Leiterplatte montiert, die Federleiste am Aufbauahmen.

#### 16.2.1.2 Unlösbare Verbindungen in der Elektrotechnik

Unlösbare Verbindungen entstehen z. B. durch

- Crimpen<sup>1</sup>,
- Löten,
- Kleben.

Bei der **Crimpverbindung (Bild 4a)** werden die abisolierten mehr- oder feindrähtigen Leiter z. B. in eine Aderendhülse oder in einen Kabelschuh eingeführt (**Bild 4b**). Die leitende Verbindung wird mithilfe einer Zange (**Bild 5**) hergestellt. In der Praxis werden für den Fachbegriff Crimpen auch Pressen oder Quetschen verwendet.

<sup>1</sup> von to crimp (engl.) = pressen

#### Übersicht: Einteilung von Verbindungen

- **Lösbare Verbindungen**  
z. B. Schrauben, Stecken, Klemmen
- **Unlösbare Verbindungen**  
z. B. Löten, Kleben, Nieten

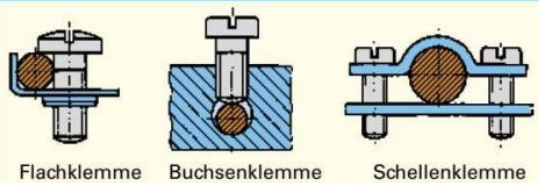


Bild 1: Klemmenarten

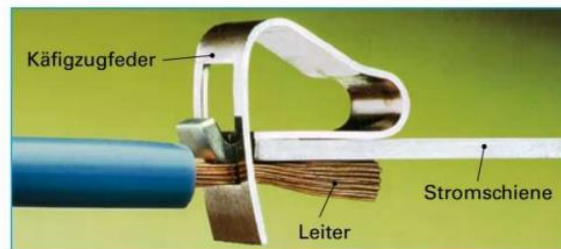


Bild 2: Käfigzugfeder-Anschlussystem



Bild 3: Steckverbinder für Leiterplatten

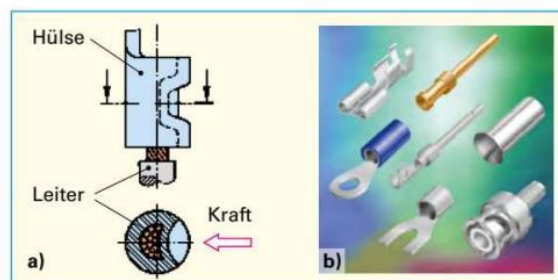


Bild 4: Crimpverbindung



Bild 5: Crimpzange

## Löten

Löten (**Übersicht**) ist das Verbinden metallischer Werkstoffe mithilfe eines Lotes. Werkstoff und Lot bilden eine Legierung. Durch Löten entsteht eine unlösbare Verbindung.

Beim Löten benetzt das flüssige Lot die Lötstelle. Dies wird erreicht, wenn die Lötstelle metallisch rein ist und der Werkstoff und das Lot ausreichend erwärmt werden. Bei zu niedriger Arbeitstemperatur entsteht ein hoher elektrischer Widerstand (Kaltlötstelle), bei zu hoher Arbeitstemperatur verdampfen Bestandteile des Lotes. Die Lötstelle wird spröde. Eine einwandfreie Lötstelle hat eine glatte und metallisch glänzende Oberfläche. Auch ist der Abstand (Lötspalt) zwischen den zu lötenden Teilen zu beachten. Damit das flüssige Lot durch Kapillarwirkung in den Lötspalt hineingezogen wird, sollte der Lötspalt maximal 0,2 mm betragen.

**Lote** sind **Hilfsstoffe** der Elektrotechnik und werden in Weich- und Hartlote unterteilt. Als Weichlote werden Legierungen aus Zinn (Sn), Silber (Ag) und/oder Gold (Au) verwendet. Die Zusammensetzung bestimmt die Arbeitstemperatur, z. B. 227 °C bei dem Lot S-Sn99Cu1. In der Elektrotechnik verwendet man Weichlote in Drahtform mit eingelagertem Flussmittel. Das Kurzzeichen für Weichlote beginnt nach internationaler Norm mit dem Buchstaben S (**Bild 1**). Das Weichlöten wird in der Elektrotechnik häufig verwendet, weil Lötverbindungen elektrisch gut leiten. Allerdings ist die Festigkeit der verwendeten Zinn-Lote sehr gering. Hartlote, z. B. das Silberhartlot B-Ag 72Cu-780 (Arbeitstemperatur 780 °C), verwendet man, wenn Verbindungen höher mechanisch belastet werden müssen.



Seit 1.7.2006 ist durch EU-Richtlinien Blei in der Elektronikfertigung verboten.

**Flussmittel** sollen Oxide bzw. Verunreinigungen lösen oder chemisch binden, den Fluss des Lotes begünstigen und eine weitere Oxidation verhindern. Die Wahl des Flussmittels richtet sich nach dem Lötverfahren und dem Werkstoff des Werkstücks. Zum Weichlöten wird in der Elektrotechnik als Flussmittel häufig Kolophonium verwendet. Im Elektrolot ist das Flussmittel Kolophonium in Pulverform eingearbeitet. Deshalb muss bei Verwendung eines Elektrolotes kein Flussmittel der Lötstelle zugeführt werden. Die Flussmittelkennzeichnung erfolgt nach DIN EN ISO 9454 mithilfe von drei Ziffern (**Bild 2**).

Die **Lötverfahren** werden nach der Arbeitstemperatur und nach der Art der Erwärmung eingeteilt. Nach der Art der Erwärmung unterscheidet man beim Weichlöten hauptsächlich das Kolben-, Tauch-, Schwall- und Induktionslöten. Bei der **Kolbenlötung** erwärmt der LötKolben eine Lötspitze. Für Lötarbeiten an empfindlichen Bauteilen, wie z. B. Feldeffekt-Transistoren (**Seite 217**), werden temperaturgeregelte Lötstationen (**Bild 3**) verwendet. Industrielle Lötverfahren sind das **Schlepplöten**, das **Wellenlöten** (**Bild 4**) und das Induktionslöten. SMD-Bauelemente werden im Reflow-Verfahren (**Seite 615**) gelötet.

Zum **Entlöten** von elektronischen Bauelementen mit dem LötKolben wird eine Entlötpumpe oder ein Metallgeflecht (Löt-sauglitze) verwendet, welches das Löt-zinn aufsaugt. Die Löt-sauglitze wird mit der LötKolbenspitze auf die Lötstelle gedrückt. Nach Erwärmung der Litze wird das schmelzende Lot durch Kapillarwirkung aufgesaugt. Entlötarbeiten werden auch mit Entlötgeräten ausgeführt, bei denen das flüssige Lot mit Vakuum von der Lötstelle abgesaugt werden kann (**Bild 3**).

### Übersicht: Fachbegriffe Löten

- Weichlöten < 450 °C
- Hartlöten > 450 °C
- Hochtemperaturlöten > 900 °C
- Arbeitstemperatur: Temperatur, bei der das Lot benetzt, fließt und bindet



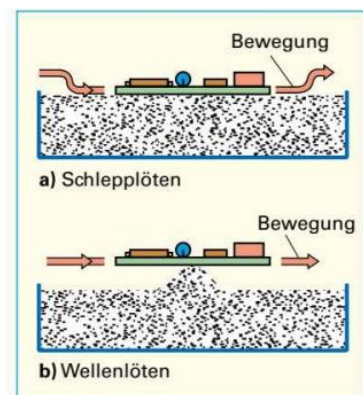
**Bild 1: Weichlot der Elektrotechnik (Beispiel)**



**Bild 2: Flussmittel der Elektrotechnik (Beispiel)**



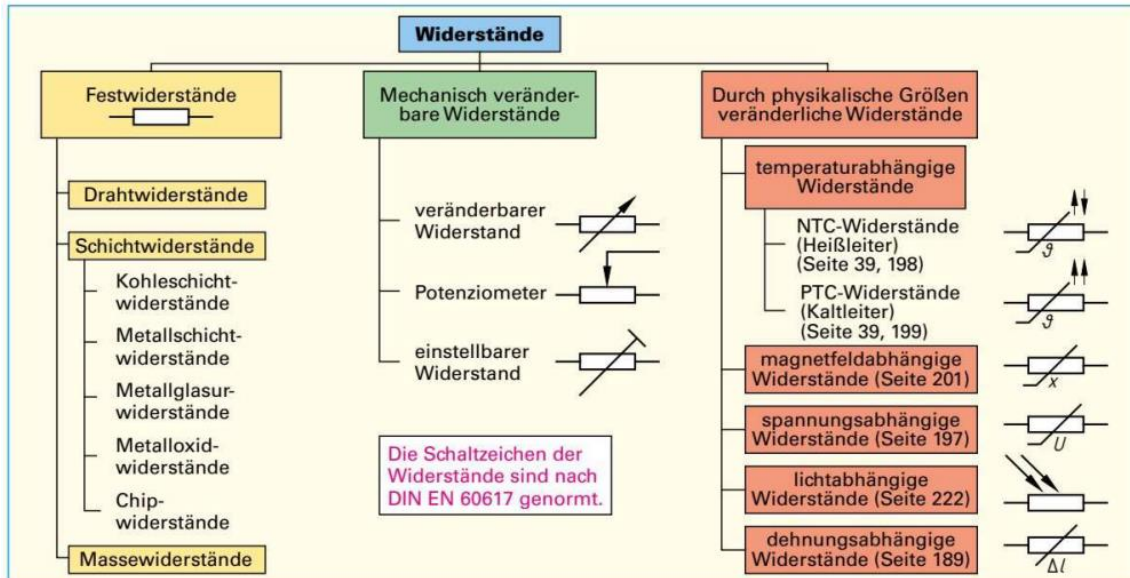
**Bild 3: Löt- und Entlötpumpe**



**Bild 4: Lötverfahren**

## 2.10 Bauarten von Widerständen

Widerstände teilt man nach der Bauart (**Bild 1**) ein. Weiterhin unterscheidet man lineare Widerstände, z. B. Festwiderstände, und nichtlineare Widerstände, z. B. NTC-Widerstände.



**Bild 1: Einteilung technischer Widerstände**

**Festwiderstände** haben genormte Bemessungswerte (Nennwerte) mit einer zulässigen Toleranz, die in Prozent vom Bemessungswert angegeben wird. Die Normreihen dieser Nennwiderstände sind so aufgebaut, dass sie jeden Zwischenwert abdecken können. Die Bezeichnung der Normreihe, z. B. E12, bedeutet, dass 12 Widerstandswerte von 1,0 bis 8,2 (**Bild 2**) innerhalb einer Dekade<sup>1</sup> vorhanden sind.

Die nach DIN<sup>2</sup> IEC<sup>3</sup> festgelegten E-Reihen und deren Toleranzen sind: E6 ( $\pm 20\%$ ), E12 ( $\pm 10\%$ ), E24 ( $\pm 5\%$ ), E48 ( $\pm 2\%$ ), E96 ( $\pm 1\%$ ) und E192 ( $\pm 0,5\%$ ).

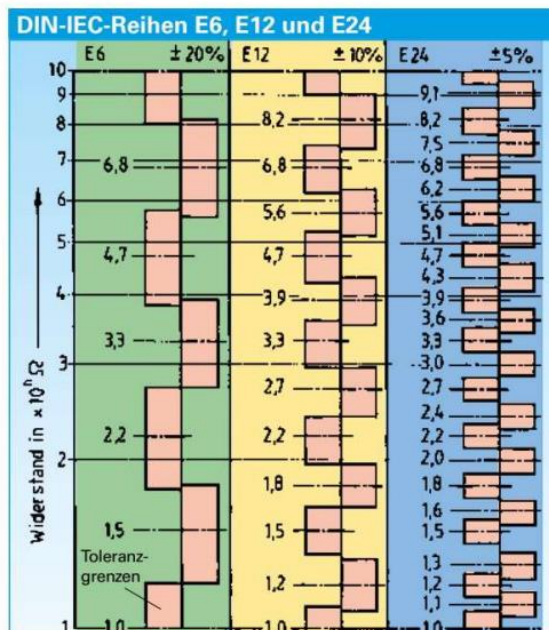
Widerstandswert und Fertigungstoleranz werden durch Zahlen oder Farbringe auf dem Widerstand gekennzeichnet. Widerstände bis einschließlich der Reihe E48 haben 4 Farbringe (**Tabelle, Seite 41**). Sind Widerstände mit 5 Farbringen versehen, z. B. ab der Reihe E96, geben die ersten drei Ringe die drei Ziffern des Widerstandswertes, der vierte Ring gibt den Multiplikator an und der fünfte die Toleranz (siehe Tabellenbuch Elektrotechnik).

**Belastbarkeit von Widerständen.** Sie hängt davon ab, wie gut die Stromwärme an die Umgebung abgegeben werden kann. Hohe Belastbarkeit bedingt deshalb auch große Abmessungen. Man gibt die Bemessungsleistung von Widerständen in Watt bei einer bestimmten Temperatur an, z. B. 1 W bei 70 °C.

<sup>1</sup> Dekade, von dekas (griech.) = zehn

<sup>2</sup> DIN, Abk. für: Deutsches Institut für Normung;

<sup>3</sup> IEC, Abk. für: International Electrotechnical Commission



**Bild 2: Toleranzgrenzen**

### Beispiel:

Welche Widerstandswerte entsprechen der Reihe E12?

### Lösung:

0,1 Ω; 0,12 Ω; 0,15 Ω ... 0,82 Ω **oder** 1,0 Ω; 1,2 Ω; 1,5 Ω ... 8,2 Ω **oder** 10 Ω; 12 Ω; 15 Ω ... 82 Ω **oder** 100 Ω; 120 Ω; 150 Ω ... 820 Ω **oder** 1 kΩ; 1,2 kΩ; 1,5 kΩ ... 8,2 kΩ usw.

Die Belastbarkeit aller Widerstände hängt von der Baugröße und der Umgebungstemperatur ab.

**Drahtwiderstände** bestehen aus einem Keramikkörper, auf den ein Widerstandsdraht, z. B. aus Konstantan, gewickelt ist. Anschlussfahnen, -schellen oder -kappen sorgen für die Stromzuführung. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen werden Drahtwiderstände mit Lack, Zement oder Glas überzogen. Drahtwiderstände werden etwa von  $0,3 \Omega$  bis  $500 \text{ k}\Omega$  mit Bemessungsleistungen bis  $300 \text{ W}$  gefertigt.

**Schichtwiderstände** haben als Widerstandswerkstoff eine dünne Schicht aus kristalliner Kohle, einem Edelmetall oder einem Metalloxid z. B. auf einem Keramikkörper. Bei Metallschichtwiderständen (**Bild 1**) trägt man eine Paste aus Metallen, Metallverbindungen und Glaspulver auf und brennt sie anschließend ein (**Dickschichttechnik**). Sollen sehr dünne Schichten auf dem Keramikkörper entstehen, dampft man die Metalle im Vakuum durch eine Maske auf (**Dünnschichttechnik**). Zum Schutz gegen Feuchtigkeit, hohe Umgebungstemperatur und mechanische Beschädigung erhalten Schichtwiderstände einen Überzug aus Lack, Kunstharz oder Silikonzement. Edelmetallschichtwiderstände sind bei gleichen Abmessungen höher belastbar als Kohleschichtwiderstände (**Bild 1**). Kohleschichtwiderstände sind unempfindlich gegen kurzzeitige Überlastung (Impulsüberlastung). Metallschichtwiderstände sind temperaturstabil und haben besonders kleine Widerstandstoleranzen (bis zu  $\pm 0,005\%$ ). Ihr Wertebereich kann zwischen  $0,1 \text{ m}\Omega$  bis  $100 \text{ M}\Omega$  betragen.


**Chip-Widerstände** (**Bild 2**) werden für die Oberflächenmontage (SMD-Technik, **Seite 615**) mit einer Belastung bis  $2 \text{ W}$  hergestellt. Die Bezeichnung der Bauformen, z. B. 1206, besteht immer aus vier Ziffern. Die ersten beiden Ziffern geben die Länge, die zweiten beiden Ziffern die Breite des Bauteils in  $1/100 \text{ Zoll} = 0,254 \text{ mm}$  an.

**Mechanisch veränderbare Widerstände** werden als Stellwiderstände und als Drehwiderstände (**Bild 3**) hergestellt. Die drei Anschlüsse bezeichnet man mit E (Eingang), S (Schleifkontakt) und A (Ausgang). Je nach Einstellung des Schleifkontaktes ändert sich der abgegriffene Widerstandswert zwischen S und A bzw. S und E.

**Auswahl von Widerständen.** Widerstände werden ausgewählt nach:

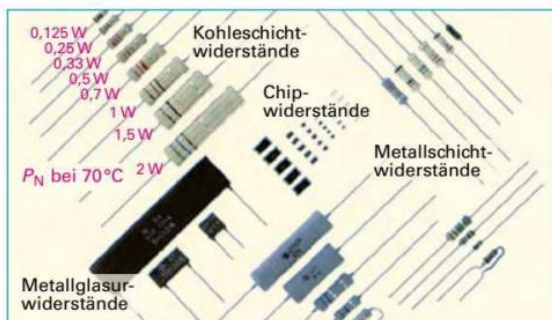
- Widerstandswert (Bemessungswert),
- Toleranz,
- Bemessungsleistung  $P_N$ ,
- Widerstandsverhalten bei Temperaturänderung,
- Bauform (**Bild 1**).

**Tabelle: Farbkennzeichnung für Widerstände**

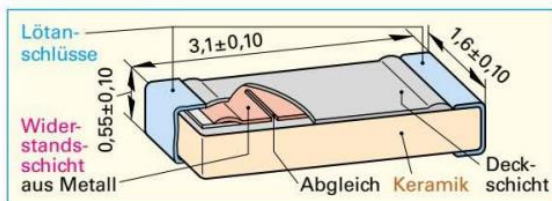


Kennfarbe		1.Ziffer	2.Ziffer	Multiplikator	Toleranz in %
nach DIN IEC 62	nach IEC 757	Widerstandswert in $\Omega$			
schwarz (sw)	BK (black)	—	0	1	—
braun (br)	BN (brown)	1	1	10	$\pm 1$
rot (rt)	RD (red)	2	2	$10^2$	$\pm 2$
orange (or)	OG (orange)	3	3	$10^3$	—
gelb (gb)	YE (yellow)	4	4	$10^4$	—
grün (gn)	GN (green)	5	5	$10^5$	$\pm 0,5$
blau (bl)	BU (blue)	6	6	$10^6$	$\pm 0,25$
violett (vi)	VT (violet)	7	7	$10^7$	$\pm 0,1$
grau (gr)	GY (grey)	8	8	$10^8$	—
weiß (ws)	WH (white)	9	9	$10^9$	—
gold (au)	GD (gold)	—	—	0,1	$\pm 5$
silber (ag)	SR (silver)	—	—	0,01	$\pm 10$
ohne Farbe		—	—	—	$\pm 20$

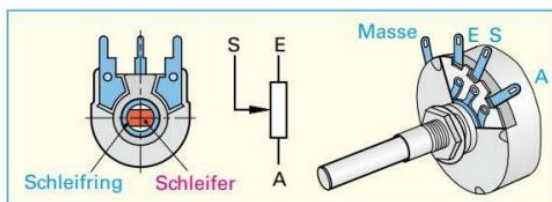
Beispiel:  
Erster Farbring näher am Anschlussdraht  
4 7 x 10  $\pm 5\% \Rightarrow 470 \Omega \pm 5\%$



**Bild 1: Bauformen und Baugrößen von Widerständen**



**Bild 2: Aufbau eines Chip-Widerstandes (Bauform 1206)**



**Bild 3: Drehwiderstand (Potenziometer)**

## 4.5 Kenngrößen und Bauarten von Kondensatoren

Kondensatoren werden in der Elektrotechnik vielfältig benutzt. Man verwendet sie z. B. als

- Glättungskondensator (**Seite 255**),
- Kompensationskondensator (**Seite 166**),
- frequenzabhängigen Widerstand (**Seite 145**),
- Koppelkondensator (**Tabelle Seite 215**).

Folienkondensatoren sind nach **Bild 2** aufgebaut. Je nach Anwendung müssen Kenngrößen, Bauarten und Eigenschaften beachtet werden (**Bild 1**).

### 4.5.1 Kenngrößen

Die Bemessungskapazität (**Nennkapazität**) ist auf dem Kondensator (**Bild 1**) angegeben. Die Stufung der Kapazität erfolgt wie bei den Widerständen nach den E-Reihen (**Seite 40**), z. B. 1  $\mu\text{F}$ , 1,2  $\mu\text{F}$ , 1,5  $\mu\text{F}$  ... 8,2  $\mu\text{F}$ . Die Bemessungskapazität kann vollständig mit der Einheit oder verkürzt bzw. codiert angegeben sein. Es gilt z. B.: p39  $\cong$  0,39 pF; 3n9  $\cong$  3,9 nF; 39p  $\cong$  39 pF, 0,39  $\cong$  0,39  $\mu\text{F}$ .

Die **Bemessungsspannung** ist die maximal zulässige Spannung, die dauernd am Kondensator anliegen darf. Sie kann als Gleichspannung oder als Effektivwert einer sinusförmigen Wechselspannung angegeben werden und ist auf die Umgebungstemperatur von 40 °C bezogen. Wird die Bemessungsspannung überschritten, so kann der Kondensator durchschlagen. Dadurch wird er zerstört. Die Durchschlagfestigkeit  $E_D$  hängt vom Isolierstoff ab (**Seite 607, Tabelle 2**).

Die **Toleranz** (Abweichung von der Bemessungskapazität) wird entweder vollständig, z. B. 1  $\mu\text{F} \pm 5\%$ , oder codiert durch Farbkennzeichnung (**Tabelle Seite 41**) bzw. Kennbuchstaben, z. B. M  $\cong \pm 20\%$ ; K  $\cong \pm 10\%$ , J  $\cong \pm 5\%$ , angegeben.

Der **Verlustfaktor**  $\tan \delta$  bei Wechselstrom ist der Quotient aus dem Wirk- und dem Blindanteil, z. B.  $\tan \delta = I_w / I_{bc}$  (**Seite 147**). Man ermittelt ihn z. B. für 1 kHz bei einer Temperatur von 20 °C. Der Wert  $\tan \delta$  soll bei Verwendung des Kondensators im Wechselstromkreis mit hoher Frequenz möglichst klein sein, damit die Wärmeverluste gering sind. Der **Temperaturbeiwert**  $\alpha_C$ , auch Temperaturkoeffizient genannt, gibt die Kapazitätsänderung je Kelvin Temperaturänderung an.

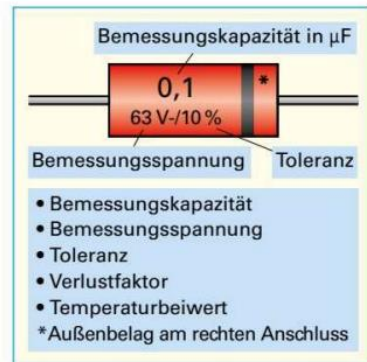
### 4.5.2 Bauarten

Bei Kondensatoren unterscheidet man verschiedene Bauarten (**Übersicht**). Festkondensatoren haben immer konstante Kapazitätswerte, z. B. 0,47  $\mu\text{F}$ . Dreh- und Trimmerkondensatoren sind Kondensatoren mit veränderbarer Kapazität, z. B. 10 pF bis 100 pF.

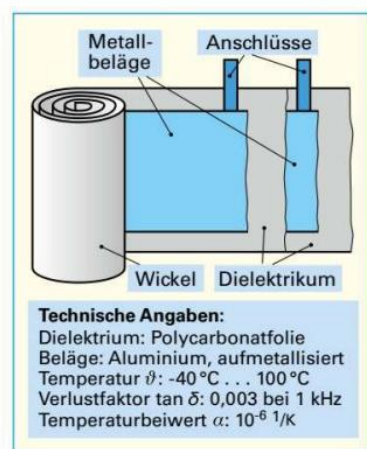
**Kunststofffolien-Kondensatoren (Bild 3)**, Kennzeichen K, haben als Dielektrikum Kunststofffolien, z. B. aus

- Polycarbonat (C),
- Polypropylen (P),
- Polystyrol (S).

Die Kondensatorbeläge aus dünnen Metallfolien werden zu einem Wickel gerollt (**Bild 2**) oder geschichtet und isolierend umhüllt. Die Kapazitätswerte reichen von einigen nF bis in den  $\mu\text{F}$ -Bereich. Die Bemessungsspannungen betragen 63 V bis 1000 V.



**Bild 1: Wichtige Kenngrößen von Kondensatoren**



**Bild 2: Kondensatoraufbau**

#### Übersicht: Bauarten von Kondensatoren

- Kunststofffolien-Kondensatoren
- Metallpapier-Kondensatoren
- Keramik-Kondensatoren
- Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren
- Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren
- Drehkondensatoren
- Trimmerkondensatoren
- Doppelschichtkondensatoren
- Chipkondensatoren



**Bild 3: Folienkondensatoren**

**Metallisierte Kunststofffolien-Kondensatoren**, Kennzeichen MK, (**Bild 1a**) erhält man durch Aufdampfen dünner Metallschichten auf die Kunststofffolien. Schlägt der Kondensator durch, so verdampft der dünne Metallbelag in der Umgebung der Fehlerstelle durch den entstehenden Lichtbogen. Dadurch wird die Umgebung der Durchschlagstelle auf beiden Belägen metallfrei, und die Lagen sind wieder voneinander isoliert. Diesen Vorgang nennt man Selbstheilung.

**Metallpapierkondensatoren** kurz MP-Kondensatoren, bestehen aus einem Papierband, auf das im Vakuum eine dünne Metallschicht, z. B. aus Zink, aufgedampft ist. MP-Kondensatoren sind gewickelt. Die Beläge des MP-Wickels sind aber wesentlich dünner als die üblichen Aluminiumfolien bei Kondensatoren. MP-Kondensatoren sind wie MK-Kondensatoren selbstheilend.

**Keramik-Kondensatoren** haben als Dielektrikum eine keramische Masse. Auf die Oberfläche der dünnwandigen Keramikkörper (Dielektrikum) wird beidseitig ein Belag aus einem Edelmetall aufgedampft. Es gibt Kondensatoren mit Kapazitäten von 1 pF bis 470 nF. Übliche Bemessungsspannungen sind 400 V, z. B. bei Röhren- oder Scheiben-Kondensatoren (**Bild 1b**).

**Aluminium-Elektrolytkondensatoren** (**Bild 2a und b**) haben eine positive Elektrode (Anode) aus einer Aluminiumfolie, auf der eine Aluminiumoxidschicht aufgebracht ist. Diese nur wenige tausendstel Millimeter dicke Oxidschicht wirkt als Dielektrikum. Die andere Elektrode (Katode) ist ein Elektrolyt, der das poröse und empfindliche Dielektrikum vor direkter Berührung mit der Anschlusselektrode schützt. Als Anschlusselektrode dient der Metallbecher, in dem Anode und Elektrolyt untergebracht sind. Am häufigsten werden trockene Elektrolytkondensatoren (**Bild 3**) verwendet. Bei falscher Polung (+ und - vertauscht) wird die dünne Oxidschicht abgebaut. Der Kondensator wird dann nach Anlegen der Betriebsspannung vom Strom sehr stark erwärmt und zerstört.

**Tantal-Elektrolytkondensatoren** (**Bild 2c**) sind ebenfalls gepolte Kondensatoren. Ihre Kapazität ist nahezu unabhängig von der Temperatur. Die Anode besteht aus Tantal (Folie, Draht oder Sinterkörper), die Katode ist aus einem Elektrolyt, z. B. Schwefelsäure, oder aus Mangandioxid. Das Dielektrikum ist Tantalpentoxid ( $Ta_2O_5$ ).

**Doppelschichtkondensatoren** haben eine sehr große Elektrodenoberfläche und sind ähnlich wie Elektrolytkondensatoren aufgebaut. Dadurch erhält man Kapazitäten bis zu 3000 F. Die Spannungsfestigkeit beträgt aber nur einige Volt. Sie werden als Energiespeicher, z. B. bei Halbleiterspeichern, verwendet.

**Chip-Kondensatoren** (**Bild 4**) haben besonders kleine Abmessungen und werden z. B. für Leiterplatten in der SMD-Technik (**Seite 615**) verwendet. Die Bauelemente werden nicht mehr durch die Platine gesteckt, sondern können einseitig, beidseitig oder in gemischter Bestückung auf die Leiterplatten gesetzt und gelötet werden.

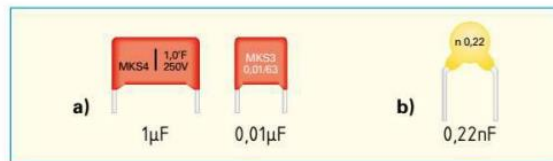


Bild 1: Kondensatoren

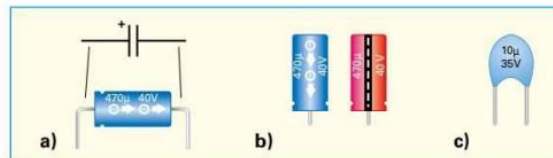


Bild 2: Elektrolytkondensatoren

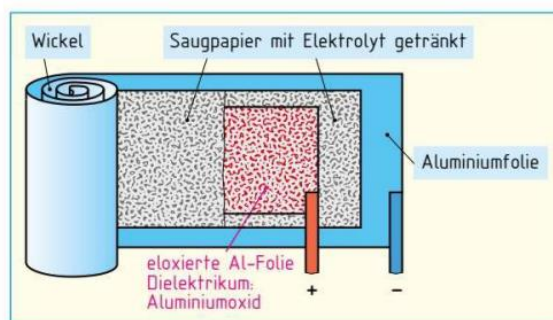


Bild 3: Aufbau eines Elektrolytkondensators

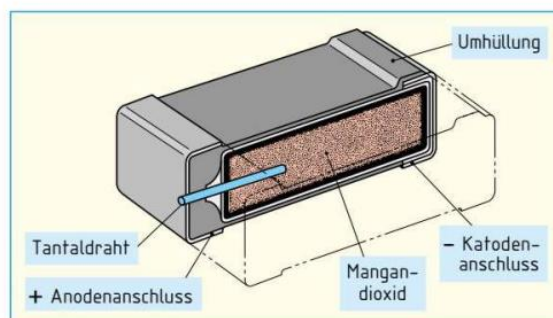


Bild 4: Tantal-Chip-Kondensatoren

#### Wichtiges zu Elektrolytkondensatoren

- Sind nur für Gleichspannung geeignet.
- Beim Anschließen ist auf Polarität und Spannungshöhe zu achten.
- Flüssige Elektrolyten können die Umwelt belasten.
- Sind nach dem Abfallgesetz zu entsorgen.

## 9 Elektronik

### 9.1 Halbleiterwerkstoffe

Als Halbleiterwerkstoffe verwendet man fast ausschließlich die Grundstoffe Silicium, Germanium oder chemische Verbindungen, z. B. Galliumarsenid oder Indiumantimonid (**Tabelle**).

Halbleiterwerkstoffe müssen außerordentlich rein sein. Man erreicht bei der Herstellung Reinheitsgrade, bei denen auf  $10^{10}$  Atome nur ein einziges Fremdatom kommt.

Bei sehr tiefen Temperaturen sind die Halbleiterwerkstoffe Nichtleiter. Die Leitfähigkeit lässt sich durch Zusetzen von Fremdstoffen oder durch äußere Einflüsse, z. B. durch Lichteinstrahlung und durch elektrische oder magnetische Felder, stark verändern. Halbleiterwerkstoffe finden Anwendung bei der Herstellung von elektronischen Bauelementen (**Übersicht**).

Der spezifische Widerstand von **Halbleiterwerkstoffen** liegt zwischen dem elektrischer Leiter (Metalle) und dem von Nichtleitern.

**Atomarer Aufbau.** Halbleiteratome bilden ein Kristallgitter. Der Kern eines Silicium-Atoms enthält 14 Protonen und 14 Neutronen. Silicium hat auf der äußeren Schale vier **Valenzelektronen**<sup>1</sup>; d. h., es ist vierwertig. Jedes Elektron davon umkreist den eigenen und je einen benachbarten Atomkern.

**Eigenleitung.** Bei Raumtemperatur schwingen die Atome im Kristallgitter um ihre Ruhelage ungeordnet hin und her (Wärmebewegung). Dadurch brechen einige der Atombindungen auf. Einzelne Außenelektronen entfernen sich von ihren Atomen und sind innerhalb des Kristalls frei beweglich (**Leitungselektronen**). Eine am Halbleiterkristall angelegte Spannung bewirkt ein elektrisches Feld und treibt diese freien Elektronen vom Minus- zum Pluspol (**Bild 1**).

Sobald sich ein Valenzelektron aus seiner Atombindung entfernt, hinterlässt es dort eine Lücke, ein Loch, das man auch **Defektelektron** nennt. Die Löcher tragen ebenfalls zur Stromleitung bei. Ein Valenzelektron einer benachbarten Bindung kann nämlich ein solches Loch ausfüllen. An der Stelle, wo es vorher war, entsteht wieder ein Loch. Das Loch wandert durch den ganzen Kristall vom Pluspol zum Minuspol (**Bild 2**).

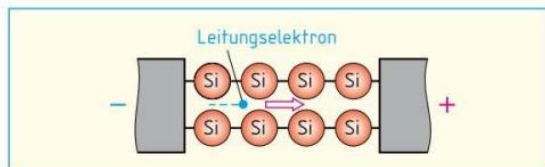
**Störstellenleitung.** Fügt man dem reinen Halbleiterwerkstoff einen ganz geringen Fremdstoffanteil zu (**dotieren**), z. B. ein einziges Bor-Atom auf  $10^5$  Siliciumatome, steigt die Leitfähigkeit um das Tausendfache.

**Tabelle: Halbleiterwerkstoffe (Beispiele)**

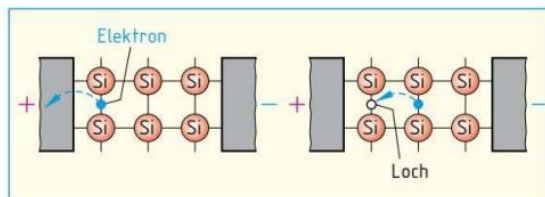
Werkstoff	Anwendung
Silicium (Si)	Dioden, Transistoren, Integrierte Schaltungen, Thyristoren, Solarzellen
Germanium (Ge)	Hochfrequenz-Transistoren, Detektoren für Gamma-Strahlung
Galliumarsenid (GaAs)	Leuchtdioden, Laser, HF-Transistoren
Indiumantimonid (InSb) Indiumarsenid (InAs)	Feldplatten, Hall-Generatoren
Cadmiumsulfid (CdS)	Fotowiderstände
Siliciumcarbid (SiC)	Heißeleiter, Varistoren, Leuchtdioden, SiC-MOSFET
Gallium-Indium-Nitrid	Weiß LED

#### Übersicht: Elektronische Bauelemente (Auswahl)

- Diode (Seite 202)
- Heißeleiter (Seite 198)
- IGBT (Seite 249)
- Kaltleiter (Seite 199)
- Transistor (Seite 206)
- Triac (Seite 247)
- Varistor (Seite 197)
- Z-Diode (Seite 203)



**Bild 1: Elektronenleitung im Halbleiter**



**Bild 2: Löcherleitung im Halbleiter**

#### **i** Dotieren<sup>2</sup>

Bei Silicium werden Fremdatome mit niedriger, z. B. drei Valenzelektronen, oder höherer Wertigkeit, z. B. fünf Valenzelektronen, zugefügt. Damit kann die Leitfähigkeit von Halbleiterwerkstoffen beeinflusst werden.

<sup>1</sup> von valere (lat.) = wert sein; valenz (chemische Wertigkeit)

<sup>2</sup> von dotare (lat.) = ausstatten, mitgeben

**N-Leiter.** Silicium kann mit fünfwertigen Fremdatomen (z.B. Phosphor oder Arsen) dotiert werden. Für die Elektronenpaar-Bindung werden jedoch nur vier Valenzelektronen des Phosphoratoms benötigt (**Bild 1a**). Das verbleibende 5. Valenzelektron wird somit bei geringer Wärmebewegung des Atoms zu einem frei beweglichen Leitungselektron. Einen mit fünfwertigen Fremdatomen dotierten Siliciumkristall nennt man **N-Leiter**.

**P-Leiter.** Silicium kann auch mit dreiwertigen Fremd-  
atomen (z.B. Aluminium) dotiert werden. Für die vollständige Elektronenpaar-Bindung fehlt ein Elektron (**Bild 1b**). Dadurch hinterlässt dieses Elektron ein positives Loch (Defektelektron). Einen mit dreiwertigen Fremdatomen dotierten Siliciumkristall nennt man **P-Leiter**.

Die durch Dotieren entstandenen P-Leiter und N-Leiter bleiben weiterhin nach außen elektrisch neutral.

Die Leitfähigkeit im dotierten Halbleiter nimmt nur so lange zu, bis alle Fremdatome beim N-Leiter ihr überzähliges Elektron abgegeben haben bzw. im P-Leiter von ihrem Nachbaratom je ein Elektron aufgenommen haben.

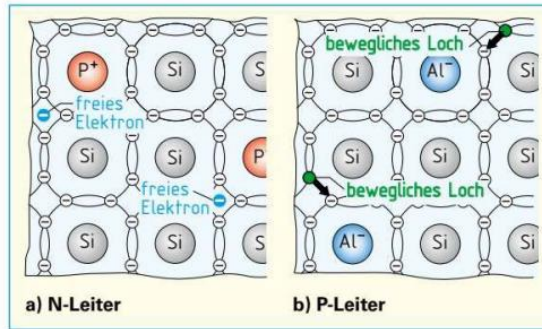
Die elektrische Leitfähigkeit der Störstellenleitung ist nur wenig temperaturabhängig.

**PN-Übergang.** Bringt man einen P-Leiter und einen N-Leiter zusammen, entsteht an der Berührungsstelle ein PN-Übergang (**Bild 2**).

An der Grenze vom N- zum P-Leiter dringen ohne angelegte Spannung nur durch die Wärmebewegung Elektronen vom N-Leiter in den P-Leiter ein und rekombinieren<sup>2</sup> dort mit den Löchern. Umgekehrt diffundieren<sup>1</sup> Löcher des P-Leiters in den N-Leiter und verbinden sich dort mit den freien Elektronen (**Bild 2**). Beiderseits der Grenze verarmt der Halbleiterkristall an freien Ladungsträgern: Die Grenzschicht wirkt wie ein Isolator und bildet eine Sperrschicht.

Fehlen jedoch in der Grenzschicht Leitungselektronen und Löcher, üben die Ladungen der ortsgeladenen Ionen ihren Einfluss aus: Das N-Grenzgebiet ist positiv, das P-Grenzgebiet negativ aufgeladen. Diese Raumladungszonen beenden die weitere Diffusion: Die negative P-Grenzschicht zieht die diffundierten Löcher und die positive N-Grenzschicht die eingedrungenen Elektronen zurück. Die Ladungen in der etwa um 1 µm dicken Grenzschicht verursachen eine **Diffusionsspannung**  $U_{Diff}$  von z. B. 0,7V bei Silicium am PN-Übergang. Durch Anlegen einer äußeren Spannung kann der PN-Übergang in Sperrrichtung oder in Durchlassrichtung betrieben werden (**Bild 3**).

Der PN-Übergang wirkt wie ein Kondensator. Die Sperrschicht besitzt eine Kapazität (**Sperrschicht-Kapazität**).



**Bild 1: N-Leiter und P-Leiter**

**i Fachbegriffe Halbleitertechnik**

**P-Leiter:** 3-wertig dotiert, Löcher (**Defektelektronen**) sind Ladungsträger.

**N-Leiter:** 5-wertig dotiert, freie Elektronen (**Leitungselektronen**) sind Ladungsträger.

**Diffundieren<sup>1</sup>:** Elektronen des N-Leiters dringen in den P-Leiter ein, Löcher des P-Leiters dringen in den N-Leiter ein.

**Rekombinieren<sup>2</sup>:** Vereinigung von Ladungsträgern, z. B. Elektron vereinigt sich mit Loch.

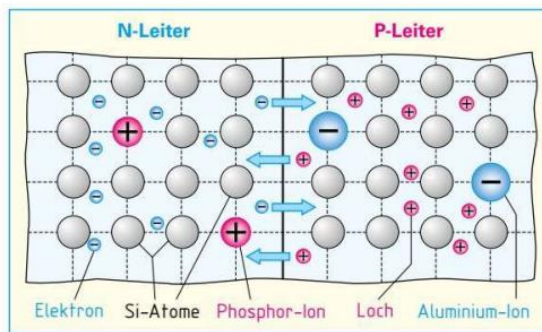
**Diffusionsspannung:** Spannungsfall an der Raumladungszone eines PN-Übergangs, an dem keine äußere Spannung anliegt.  
(bei Si:  $U_{Diff} \approx 0,7\text{ V}$  und bei Ge:  $U_{Diff} \approx 0,3\text{ V}$ ).

**Sperrschicht:** Entsteht am PN-Übergang

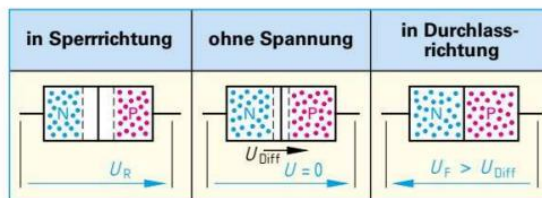
**Eigenleitung:** Geringe elektrische Leitfähigkeit undotierter (reiner) Halbleiter.

**Störstellenleitung:** Durch Hinzufügen von Fremdatomen (dotieren) erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit stark.

<sup>1</sup> von diffundere (lat.) = ausbreiten, zerstreuen  
<sup>2</sup> von recombinare (lat.) = wiedervereinigen



**Bild 2: Wirkungsweise des PN-Übergangs**



**Bild 3: PN-Übergang mit angelegter Spannung**

## 9.4 Halbleiterdioden

Halbleiterdioden sind elektronische Bauelemente mit zwei Anschlüssen und meist einem PN-Übergang.

### 9.4.1 Wirkungsweise

Die Halbleiterdiode besteht aus einer P-Schicht und einer N-Schicht (**Seite 196**), die an den Enden mit metallischen Kontakten versehen sind. Der Anschluss an der P-Schicht heißt Anode, der Anschluss an der N-Schicht Katode.

**Versuch:** Nehmen Sie von einer Si-Diode, z. B. von der BAY 44, durch Strom- und Spannungsmessung die Kennlinie auf, und zwar in Durchlassrichtung mit der Stromfehlerschaltung (**Bild 2a**) und in Sperrrichtung mit der Spannungsfehlerschaltung (**Bild 2b**). Schließen Sie die Schaltungen über einen Vorwiderstand  $R_V$  von 1 k $\Omega$  an ein einstellbares Netzteil an und erhöhen Sie langsam die Spannung in Durchlassrichtung bis etwa 1 V, in Sperrrichtung bis höchstens 50 V.

In Durchlassrichtung fließt nach Überwinden eines Schwellwerts von etwa 0,7 V ein hoher Strom (rund 100 mA bei 1 V), in Sperrrichtung dagegen ein geringer, kaum messbarer Strom ( $\approx 20$  nA bei 50 V) (**Bild 3**).

Eine Halbleiter-Diode leitet, wenn man sie in Durchlassrichtung (**Bild 2a**) polt, und sie sperrt den elektrischen Strom, wenn sie in Sperrrichtung (**Bild 2b**) gepolt ist.

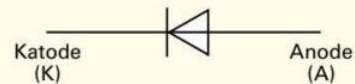
Die Katode ist oft durch einen Ring gekennzeichnet (**Bild 3**). Je nach Halbleiterwerkstoff unterscheiden sich die Kennwerte der Dioden (**Tabelle**).

**Durchlassrichtung** (Forward<sup>1</sup>). Der Pluspol der äußeren Spannungsquelle (**Bild 2a**) wird an die Anode der Diode und der Minuspol der Spannungsquelle an die Katode angeschlossen. Ab der **Schleusenspannung**  $U_S$  ist die Diffusionsspannung des PN-Übergangs überwunden und ein Durchlassstrom  $I_F$  fließt (**Bild 3**).

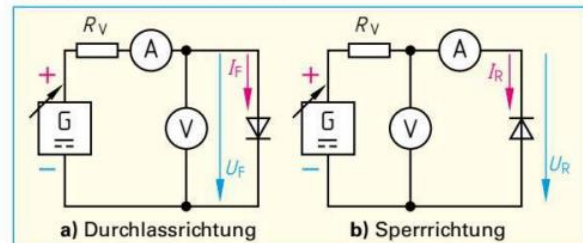
**Sperrrichtung** (Reverse<sup>2</sup>). Der Minuspol der äußeren Spannungsquelle (**Bild 2b**) wird an die Anode der Diode und der Pluspol an die Katode angeschlossen. Auch mit steigender Sperrspannung  $U_R$  fließt nur ein verschwindend geringer Sperrstrom  $I_R$ . Oberhalb der Spitzensperrspannung  $U_{Rmax}$  steigt der Sperrstrom jedoch so stark an, dass er die Diode zerstören kann. Darum muss z. B. der Scheitelwert der gleichzurichtenden Wechselspannung immer kleiner als  $U_{Rmax}$  sein.

**i** Dioden verwendet man z. B.

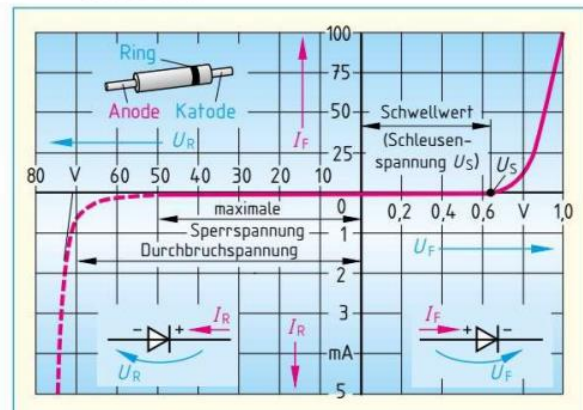
- zum Gleichrichten (**Seite 251**)
- als Freilaufdiode (**Seite 111 und 212**)



**Bild 1: Schaltzeichen Diode**



**Bild 2: Messschaltungen zur Kennlinienaufnahme einer Diode**



**Bild 3: Kennlinie einer Si-Halbleiterdiode (BAY 44)**

**Tabelle: Vergleich von Germanium- und Siliciumdioden**

Kenngroße	Germaniumdioden	Siliciumdioden
Schwellenwert der Durchlassspannung $U_S$	$\approx 0,3$ V	$\approx 0,7$ V
Stromdichte $J$	0,8 A/mm <sup>2</sup>	1,5 A/mm <sup>2</sup>
maximale Betriebstemperatur $\vartheta_{max}$	$\approx 75$ °C	$\approx 150$ °C
Wirkungsgrad $\eta$	95 %	99 %
Spitzensperrspannung $U_{Rmax}$	30 V ... 120 V	100 V ... 6000 V

**Beispiel:**

Für eine Türsprechanlage wird eine stabile Spannung von 5,6 V benötigt. Die Eingangsspannung  $U_1 = 12$  V einer Stabilisierungsschaltung (Bild 2, Seite 203) schwankt um 10%. Der Laststrom  $I_L$  kann zwischen 0 mA und 20 mA betragen. Berechnen Sie  $R_{vmin}$ ,  $R_{vmax}$  und wählen Sie  $R_v$  aus der E12-Reihe (Seite 662) aus.

**Lösung:**

$$I_{Zmax} \approx \frac{P_{tot}}{U_Z} = \frac{400 \text{ mW}}{5,6 \text{ V}} \approx 71,4 \text{ mA}$$

$$I_{Zmin} = 0,1 \cdot I_{Zmax} = 0,1 \cdot 71,4 \text{ mA} = 7,14 \text{ mA}$$

$$R_{vmin} = \frac{U_{1max} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}} = \frac{13,2 \text{ V} - 5,6 \text{ V}}{71,4 \text{ mA}} = 106,4 \Omega$$

$$R_{vmax} = \frac{U_{1min} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}} = \frac{10,8 \text{ V} - 5,6 \text{ V}}{7,14 \text{ mA} + 20 \text{ mA}} = 191,6 \Omega$$

$$R_v = 150 \Omega$$

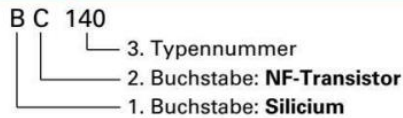
**9.4.4 Halbleiterkennzeichnung**

Halbleiter, die meist in der Unterhaltungselektronik eingesetzt sind, kennzeichnet man mit 2 Buchstaben und 3 Ziffern (Tabelle). Halbleiter für andere Aufgaben, z.B. für kommerzielle Zwecke, bezeichnen 3 Buchstaben und 2 Ziffern, z.B. BCY 95.

**Beispiel 1:**

Um welches Bauelement handelt es sich bei dem Typ BC 140?

**Lösung:**



**Z-Dioden** erhalten nach der Typangabe, durch einen Schrägstrich abgetrennt, einen Kennbuchstaben für die Toleranz: A:  $\pm 1\%$ , B:  $\pm 2\%$ , C:  $\pm 5\%$ , D:  $\pm 10\%$ . Den Bemessungswert der Durchbruchspannung  $U_Z$  gibt eine Dezimalzahl an, bei der statt des Kommas der Buchstabe V steht.

**Beispiel 2:**

Welche Bauelemente werden mit a) BZY 92/C9V1, b) CQR45, c) BAY 89 bezeichnet?

**Lösung:**

- a) BZY 92/C9V1 ist eine Silicium-Z-Diode (Industrietyp) mit einer Z-Spannung von 9,1 V und einer Toleranz von  $\pm 5\%$ ,
- b) CQR45 kennzeichnet eine Leuchtdiode,
- c) BAY 89 den Industrietyp einer Silicium-Diode.

**Vorwiderstand bei Z-Dioden (Bild 2, Seite 203)**

- $R_v$  Vorwiderstand
- $U_1$  Eingangsspannung
- $U_Z$  Z-Spannung
- $I_Z$  Z-Strom
- $I_L$  Laststrom
- $S$  Stabilisierungsfaktor
- $U_2$  Ausgangsspannung
- $\Delta$  Differenzzeichen

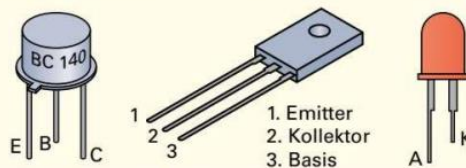
$$R_{vmin} = \frac{U_{1max} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}}$$

$$R_{vmax} = \frac{U_{1min} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}}$$

$$S = \frac{\Delta U_1 \cdot U_2}{\Delta U_2 \cdot U_1}$$

Die Indizes max und min bedeuten den Größt- bzw. den Kleinstwert.

**Tabelle: Kennzeichnung von Halbleitern nach Pro-Elektron-Typenschlüssel (Auswahl)**



**Erster Buchstabe (Halbleiterwerkstoff)**

A	Germanium	D	Z. B. Indium-antimonid
B	Silicium	R	Polykristalline Stoffe, z. B. für Feldplatten, Foto-bauelemente
C	III-V-Werkstoff, z. B. Gallium-arsenid		

**Zweiter Buchstabe (Art des Bauelements)**

A	Diode	Q	Strahlungssender
B	Kapazitätsdiode	R	Steuerbarer Gleichrichter
C	NF-Transistor	S	Schalttransistor
D	NF-Leistungstransistor	T	Steuerbarer Leistungsgleichrichter
F	HF-Transistor	X	Vervielfacher-Diode
H	Hallgenerator	Y	Leistungsdiode
L	HF-Leistungstransistor	Z	Z-Diode (Begrenzerdiode)
P	Strahlungsempfänger		

**Dritter Buchstabe und Ziffern**

Der 3. Buchstabe kennzeichnet (kommerzielle) Industrietypen. Zahlen, die den Buchstaben folgen, dienen der laufenden Nummerierung.

NF: Niederfrequenz, HF: Hochfrequenz

**Wiederholungsfragen**

- 1 Wie viele Außenelektronen besitzen die Atome der halbleitenden Grundstoffe?
- 2 Was versteht man unter der Eigenleitung der Halbleiterwerkstoffe?
- 3 Erläutern Sie den Unterschied zwischen Eigenleitung und Störstellenleitung.
- 4 Welche Ladungsträger enthalten P-Leiter, welche N-Leiter und wodurch entstehen sie?
- 5 Erklären Sie die Wirkungsweise einer Halbleiterdiode.
- 6 Wie polt man eine Halbleiterdiode in Durchlassrichtung?
- 7 Was geschieht in einem PN-Übergang, wenn er in Sperrichtung betrieben wird?
- 8 Welche Besonderheit haben Z-Dioden?
- 9 Warum muss man bei einer Z-Diode eine Strombegrenzung vorsehen?
- 10 Nennen Sie Anwendungen von Z-Dioden.
- 11 Erklären Sie die Bezeichnung BZX C8V2.

## 9.5 Transistoren

Transistoren<sup>1</sup> sind verstärkende (aktive) Halbleiterbauelemente. Man kann sie in bipolare<sup>2</sup> und unipolare<sup>3</sup> Transistoren (Seite 217) einteilen (Tabelle 1).

### 9.5.1 Bipolare Transistoren

#### Einteilung

Bipolare Transistoren stellt man meist aus Silicium her. Sie sind aus drei übereinander liegenden Halbleiterschichten aufgebaut, bei denen sich P- und N-Leiter abwechseln (Bild 1). Je nach Zonenfolge entsteht ein PNP- oder ein NPN-Typ (Tabelle 2). In der Praxis setzt man überwiegend NPN-Transistoren ein.

#### Aufbau

Die drei Halbleiterzonen sind kontaktiert, die Anschlüsse führen nach außen. Die mittlere Zone nennt man **Basis**, die beiden äußeren Emitter und Kollektor. Der **Emitter**<sup>4</sup> sendet Ladungsträger aus, die der **Kollektor**<sup>5</sup> wieder einsammelt. Am Übergang vom N- zum P-Leiter bilden sich Sperrschichten aus, beim bipolaren Transistor also zwei.

Die Basis-Emitter-Strecke ist im Transistorbetrieb in Durchlassrichtung, die Basis-Kollektor-Strecke in Sperrrichtung gepolt. Der Emitterpfeil im Transistor-Schaltzeichen gibt die technische Stromrichtung an.

#### Ströme und Spannungen

**Versuch 1:** Schließen Sie einen Leistungstransistor, z. B. den BD 135, und zwei Strommesser an die Netzgeräte G1 und G2 an (Messschaltung Bild 2). (Die beiden Spannungsmesser werden bei diesem Versuch noch nicht benötigt.) Verändern Sie mithilfe G1 den Basisstrom und beobachten Sie die Auswirkung auf den Kollektorstrom.

Eine geringe Basisstromänderung  $\Delta I_B$ , z. B. 0,5 mA, hat eine große Veränderung des Kollektorstroms  $\Delta I_C$ , z. B. 50 mA, zur Folge.

Ein kleiner Basisstrom  $I_B$  verursacht beim Transistor einen großen Kollektorstrom  $I_C$ . Den Quotienten aus Kollektorstrom  $I_C$  und Basisstrom  $I_B$  nennt man Gleichstromverstärkung oder Gleichstromverhältnis  $B$ .

#### Beispiel:

Ermitteln Sie das Gleichstromverhältnis für einen Basisstrom  $I_B = 2 \text{ mA}$  und einen Kollektorstrom  $I_C = 250 \text{ mA}$ .

#### Lösung:

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{250 \text{ mA}}{2 \text{ mA}} = 125$$

Die Emitterzone ist beim bipolaren Transistor stark dotiert, die Kollektorzone etwas weniger. Die äußer-

<sup>1</sup> von trans (lat.) = hinüber und resistere (lat.) = Widerstand leisten  
<sup>2</sup> von bis (lat.) = zwei(mal)  
<sup>3</sup> von unus (lat.) = einer  
<sup>4</sup> von emittere (lat.) = aussenden, ausströmen  
<sup>5</sup> von colligere (lat.) = einsammeln

Tabelle 1: Transistor-Arten mit Schaltzeichen

Bipolare Transistoren		Unipolare Transistoren							
		Uni-junction-Transistor	Feldeffekt-Transistoren						
			Sperrschicht-FET		Isolierschicht-FET				
NPN	PNP	IGBT*	N-Typ	P-Kanal	N-Kanal	Anreicherung	Verarmung	Anreicherung	Verarmung

\* Der IGBT (Seite 249) ist eine Kombination aus einem bipolaren und einem unipolaren Transistor.

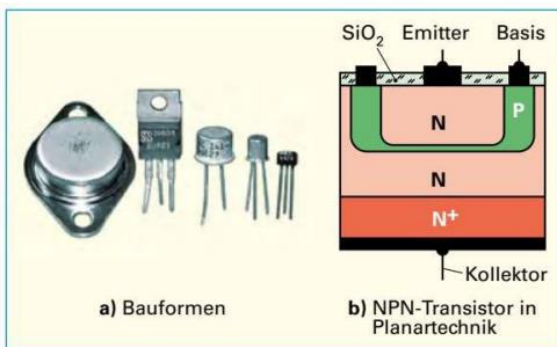


Bild 1: Baufornen und Aufbau bipolarer Transistoren

Tabelle 2: Aufbau und Schaltzeichen bipolarer Transistoren

Typ	Zonenfolge	Diodenvergleich	Schaltzeichen
NPN			
PNP			

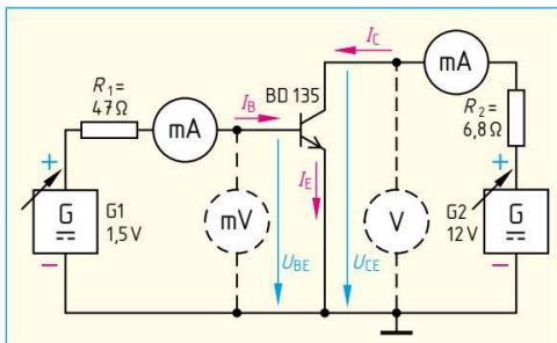


Bild 2: Messschaltung zur Kennlinienaufnahme eines NPN-Transistors in Emitter-Schaltung

ordentlich dünne Basisschicht (wenige  $\mu\text{m}$  dick) enthält nur eine geringe Zahl Fremdatome. Fließt ein Basisstrom, überfluten vom Emmitter her viele Ladungsträger (z. B. Elektronen beim NPN-Transistor) die dünne Basisschicht. Diese Schicht ist nur wenig dotiert. Deshalb kann auch nur ein geringer Teil der Elektronen dort mit Löchern rekombinieren. Die meisten Ladungsträger treibt das elektrische Feld der Basis-Kollektor-Sperrschicht in den Kollektor hinein (Bild 1). So entsteht der hohe Kollektorstrom, der um den Faktor 10 bis 500 größer sein kann als der Basisstrom.

Im bipolaren Transistor steuert der Basisstrom den Kollektorstrom. Für die Steuerung ist nur eine geringe elektrische Leistung nötig.

Ist die Basis-Emitter-Spannung  $U_{BE} = 0\text{V}$  oder kleiner als der Schwellenwert von etwa  $0,4\text{V}$ , sperrt der Transistor. Es fließt nur ein verschwindend kleiner Sperrstrom, der von thermisch erzeugten Ladungsträgerpaaren in der Basis-Kollektor-Sperrschicht stammt.

**Kennlinien**

**Versuch 2:** Nehmen Sie die Kennlinien eines Transistors auf, z. B. des BD 135 (Bild 2, Seite 206), und zwar die Kennlinie  $I_C = f(U_{CE})$  für verschiedene Basisströme und die Kennlinien  $I_B = f(U_{BE})$  und  $I_C = f(I_B)$  jeweils für eine fest eingestellte Spannung  $U_{CE}$ , z. B. für  $U_{CE} = 12\text{V}$ .

Die **Eingangskennlinie**  $I_B = f(U_{BE})$  entspricht einer Diodenkennlinie. Den Zusammenhang zwischen dem Basisstrom und dem Kollektorstrom gibt die **Stromsteuerkennlinie**  $I_C = f(I_B)$  an. Abhängig vom eingestellten Basisstrom ergibt sich bei Veränderung von  $U_{CE}$  ein entsprechender Kollektorstrom. Diese Kennlinienschar nennt man **Ausgangskennlinienfeld**.

Da diese drei Kennlinien voneinander abhängig sind, kann man sie auch in einem Vierquadranten-Kennlinienfeld darstellen (Bild 2). Eine Basis-Emitter-Spannung von  $U_{BE} = 0,65\text{V}$  führt zu einem Basisstrom  $I_B = 1\text{mA}$ . Für den Fall von  $U_{CE} = 12\text{V}$  fließt damit ein Kollektorstrom  $I_C = 150\text{mA}$ .

**Beispiel:**

Ermitteln Sie aus dem Kennlinienfeld (Bild 2) bei  $U_{CE} = 12\text{V}$  und  $I_B = 2\text{mA}$  die fehlenden Werte für a)  $I_C$  und b)  $U_{BE}$ . c) Berechnen Sie das Gleichstromverhältnis  $B$ .

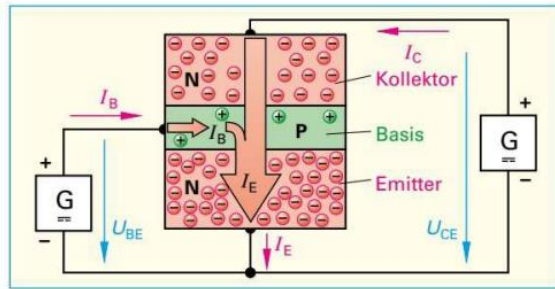
**Lösung:**

- a)  $I_C = 250\text{mA}$                       b)  $U_{BE} = 0,8\text{V}$
- c)  $B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{250\text{mA}}{2\text{mA}} = 125$

**Gehäuse**

Der Transistorkristall ist mit seinen Anschlüssen in ein Gehäuse aus Kunststoff oder Metall eingebaut. TO<sup>1</sup> 92 ist ein typisches Gehäuse für Kleinsignaltransistoren, TO 220 und TO 3 dagegen für Leistungstransistoren (Tabelle und Seite 668).

<sup>1</sup> TO, Abkürzung von Transistor Outlines

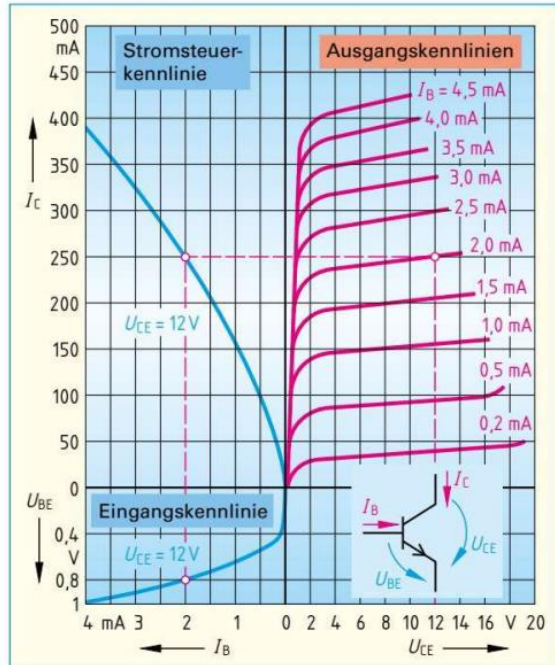


**Bild 1: Ströme im NPN-Transistor (Emitter-Schaltung)**

**Gleichstromverhältnis, Ströme beim Transistor**

$$B = \frac{I_C}{I_B} \qquad I_E = I_B + I_C$$

$B$  Gleichstromverhältnis       $I_B$  Basisstrom  
 $I_C$  Kollektorstrom             $I_E$  Emmitterstrom



**Bild 2: Vierquadranten-Kennlinienfeld des Transistors BD 135**

Tabelle: Gehäuse für Transistoren (Beispiele)			
Ansichten	Gehäuseform	Ansichten	Gehäuseform
	TO 92 z. B. BC250		TO 220 z. B. BD649
	TO 18 z. B. BC107		TO 3 z. B. 2N3055
	TO 126 z. B. BD135		
B Basis    C Kollektor    E Emmitter			

### 9.5.1.1 Transistoren in der Praxis

Transistoren werden in vielen Anwendungen eingesetzt. Je nach Einsatzgebiet werden Transistoren z. B. zum Anpassen von Spannungen, Schalten großer Lasten und Verstärken kleiner Signale (Spannungen und Ströme) (**Tabelle 2**) verwendet.

Für alle Anwendungen des Transistors ist folgendes zu beachten (**Bild**):

- Der Transistor wird über die Basis-Emitter-Strecke gesteuert. Dazu muss die Basis-Emitter-Strecke in Durchlassrichtung betrieben werden.
- Für den Betrieb ist der Transistor immer an Gleichspannung anzuschließen.
- Die Transistorströme  $I_B$  und  $I_C$  sind zu begrenzen.
- Die Verlustleistung  $P_{tot}$  darf nicht überschritten werden.
- Je nach Anwendung sind die notwendigen Gleichspannungswerte (Arbeitspunkte) einzustellen.

Der Hersteller von Transistoren gibt deren Kennwerte (z. B.  $U_{BE}$ ,  $U_{CE}$ ,  $I_B$  und  $I_C$ ) häufig in Form von Kennlinien an.

 Datenblatt NPN-Transistor BC 107, BC 171, BC 237: **Seite 668**

Auch sind die Grenzwerte (**Tabelle 1**) wie maximale Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CEmax}$ , maximaler Kollektorstrom  $I_{Cmax}$  und maximale Verlustleistung  $P_{tot}$  zu beachten.

Der Transistor ist so auszuwählen, dass im Betriebsfall keine Grenzwerte überschritten werden.

**Beispiel:**

Für ein Netzgerät (30 V/2,5 A) ist ein geeigneter Transistor nach **Tabelle 1** auszuwählen.

**Lösung:**

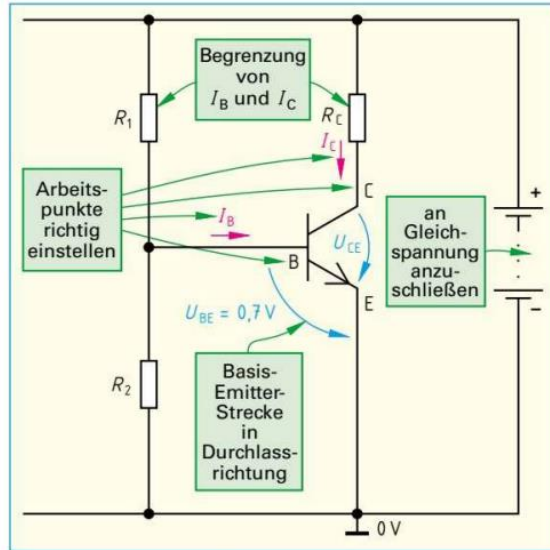
Aus **Tabelle 1**: **2N3055**

$U_{CEmax} > 30\text{ V}$ ;  $I_{Cmax} > 2,5\text{ A}$

**Übersicht:**

**Anwendungen von Transistoren (Beispiele)**

- Bistabile Kippschaltung (**Seite 213**)
- Dämmerungsschalter (**Seite 222**)
- Gleichstrom-Umrichter (**Seite 262**)
- Netzgerät (**Seite 274**)
- NF-Verstärker (**Seite 216**)



**Bild:** Anschlussregeln für Transistoren

**Tabelle 1: Grenzwerte und Gehäuseformen von Transistoren (Beispiele)**

Grenzwerte	2N3055	BC 107	BD 237
$U_{CEmax}$	60 V	50 V	80 V
$I_{Cmax}$	15 A	0,1 A	2 A
$P_{tot}$	115 W	0,3 W	25 W
Gehäuse*	TO 3	TO 18	TO 126

\* siehe auch **Seite 207 (Tabelle)**

**Tabelle 2: Einsatzgebiete von Transistoren (Beispiele)**

Anpassung von Spannungen	Schalten	Verstärken
Niederer Spannungswert wird in höheren Spannungswert umgesetzt, z. B. 5 V von Sensor auf 24 V für SPS.	Große Lastströme werden über Steuerstrom für Relais geschaltet.	Kleine Signale verschiedener Frequenzen werden verstärkt.

### 9.5.1.4 Transistor als Schalter

Den Transistor als Schalter (**Bild 1**) setzt man ein, um Verbraucher, z. B. Leuchten, (**Bild 1**) schnell, kontaktlos und elektronisch ein- oder auszuschalten.

Beim Schalten des Transistors, z. B. bei Kippstufen, sind nur die Schaltzustände „Sperren“ (Schalter geöffnet) oder „Leiten“ (Schalter geschlossen) wichtig. Als Schalter wirkt die Kollektor-Emitter-Strecke CE, die sehr hochohmig (gesperrt) bzw. niederohmig (leitend) sein kann. Die Steuerstrecke ist die Basis-Emitter-Strecke BE.

**Versuch:** Schalten Sie einen Transistor, z. B. BC 140, über eine Meldeleuchte P1 (12 V, 100 mA) an die Betriebsspannung  $U_b$  (**Bild 1**).

a) Legen Sie an den Eingang vor den Basisvorwiderstand  $R_v$  erst 0 V und dann  $+U_b$  (Brücke von  $+U_b$  an  $R_v$ ). Messen Sie  $I_B$ ,  $I_C$  und  $U_{CE}$ .

Bei gesperrtem Transistor liegt an P1 keine Spannung. Dann sind  $I_B = 0$  mA,  $U_{CE} = U_b$  und  $I_C$  beträgt einige  $\mu$ A. Bei leitendem Transistor liegt an P1 fast die gesamte Spannung von  $U_b \approx 12$  V.  $I_B$  und  $I_C$  sind erheblich größer, und  $U_{CE}$  geht fast auf null zurück.

b) Legen Sie nun an den Eingang eine Rechteckspannung mit der Frequenz von etwa 10 Hz und oszilloskopieren Sie die Spannung  $U_{CE}$ .

Das Rechtecksignal wird verstärkt und invertiert auf den Ausgang übertragen. Ein- und Ausschalten des Transistors erfolgt im Takt der Rechteckspannung (**Tabelle und Bild 1**).

#### Schalten bei ohmscher Last

Im gesperrten Zustand (**Bild 2**) ist der Widerstand  $R_{CE}$  der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors sehr groß (Arbeitspunkt A1). Steigt der Basisstrom  $I_B$ , sinkt die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$ . Beim Basisstrom  $I_{Bmin}$  beträgt  $U_{CE}$  fast null Volt (P). Der Transistor befindet sich am Sättigungsanfang, die sogenannte Übersteuerung beginnt. Die zugehörige Spannung wird **Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung**  $U_{CEsat}$  genannt, z. B.  $U_{CEsat} = 0,7$  V. Erhöht man  $U_{BE}$  und  $I_B$  weiter, wandert der Arbeitspunkt des Transistors zum Arbeitspunkt A2. Der Widerstand  $R_{CE}$  des Transistors ist nun sehr klein. Im Arbeitspunkt A2 ist  $U_{CEsat}$  auf eine Restspannung von etwa  $U_{CERest} = 0,2$  V abgesunken.

Transistoren als Schalter haben zwei Schaltzustände: Sie sind leitend (gesättigt) oder nichtleitend (gesperrt).

Die stabilen Schaltzustände Ein (A3) und Aus (A1) auf der Arbeitsgeraden von  $R_C$  im Ausgangskennlinienfeld (**Bild 2**) müssen stets unter der Leistungshyperbel  $P_{tot}$  des Transistors liegen. Die Arbeitsgerade darf während des Schaltens die Hyperbel schneiden. Wenn der Schaltvorgang in sehr kurzer Zeit abläuft, z. B.  $t$  kleiner als  $1 \mu$ s, wird der Transistor während des Schaltens thermisch nicht überlastet.

Schaltzeiten sind vom Transistortyp und von der Schaltung abhängig. Um die Schaltzeiten klein zu halten und ein sicheres Schalten zu gewährleisten, werden Transistoren in Schaltverstärkern mit einem um den Übersteuerungsfaktor  $\ddot{u}$  größeren Basisstrom  $I_B$  angesteuert.

Um Schalttransistoren sicher durchzuschalten, steuert man die Transistoren mit  $I_B = \ddot{u} \cdot I_{Bmin}$  an. In der Praxis wählt man einen Übersteuerungsfaktor von  $\ddot{u} = 2 \dots 5$ .

Durch die Übersteuerung verringern sich die Einschaltzeit und auch die Verlustleistung  $P_v = U_{CEsat} \cdot I_C$  des Transistors, weil bei ansteigendem  $I_C$  die Sättigungsspannung  $U_{CEsat}$  auf Werte von etwa  $U_{CERest} = 0,2$  V absinkt. Die Ausschaltzeit des Transistors wird jedoch vergrößert, da die Basis von

<sup>1</sup> sat ist die Abkürzung für Saturation (engl.) = Sättigung

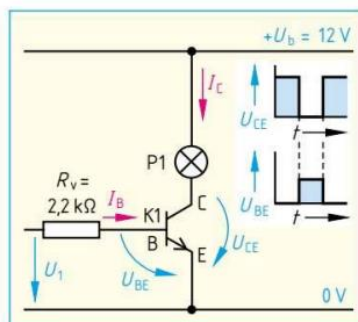


Bild 1: Transistor als Schalter

Tabelle: Spannungsverlauf Transistor als Schalter

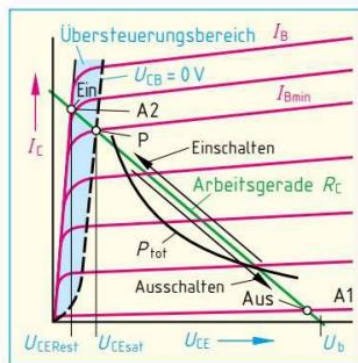
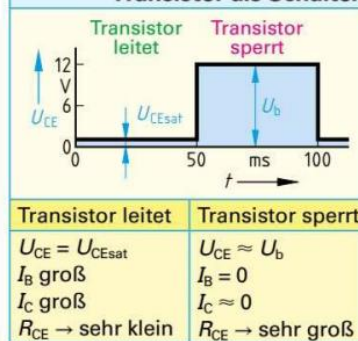


Bild 2: Schaltzustände des Transistors bei Widerstandslast

**Transistor als Schalter**

$$B = \frac{I_C}{I_B} \quad I_B = \frac{\ddot{u} \cdot I_C}{B_{min}} \quad I_B = \ddot{u} \cdot I_{Bmin}$$

$$R_v = \frac{(U_1 - U_{BE}) \cdot B_{min}}{\ddot{u} \cdot I_C}$$

$\ddot{u}$  Übersteuerungsfaktor  
 $I_B$  Basisstrom mit Übersteuerung  
 $I_{Bmin}$  min. erforderlicher Basisstrom an Übersteuerungsgrenze  
 $B_{min}$  min. Gleichstromverhältnis  
 $I_C$  Kollektorstrom  
 $R_v$  Basisvorwiderstand  
 $U_1$  Eingangsspannung  
 $U_{BE}$  Basis-Emitter-Spannung

den vielen Ladungsträgern erst ausgeräumt werden muss. Zur Verringerung der Schaltzeiten wird der Basisvorwiderstand parallel mit dem Beschleunigungskondensator  $C$  überbrückt (**Bild 1**). Der Widerstand  $R_1$  (**Bild 1**) gewährleistet, dass auch bei offenem Eingang der Transistor K1 über den Widerstand  $R_1$  sicher gesperrt ist (0V an der Basis).

**Beispiel:**

Die typische Ausgangsspannung eines NAND-Gatters (**Bild 2**) beträgt bei 1-Signal  $U_1 = 3,4$  V. Bei der Durchlassspannung  $U_F = 1,65$  V beträgt der Strom durch die LED CQX 35  $I_F = 20$  mA. Der Transistor BC 107 hat folgende Kennwerte:  $U_{BE} = 0,65$  V,  $B_{min} = 150$ ,  $U_{CEsat} = 0,2$  V. Bestimmen Sie aus der Reihe E12 (**Seite 662**) a) den Kollektorwiderstand  $R_C$  und b) den Basisvorwiderstand  $R_V$  bei einem Übersteuerungsfaktor  $\ddot{u} = 3$ .

**Lösung:**

a)  $R_C = \frac{U_b - U_F - U_{CEsat}}{I_F} = \frac{5\text{ V} - 1,65\text{ V} - 0,2\text{ V}}{20\text{ mA}}$   
 $R_C = 158\ \Omega$ ; gewählt:  $R_C = 150\ \Omega$

b)  $R_V = \frac{(U_1 - U_{BE}) \cdot B_{min}}{\ddot{u} \cdot I_C} = \frac{(3,4\text{ V} - 0,65\text{ V}) \cdot 150}{3 \cdot 20\text{ mA}}$   
 $R_V = 6,9\text{ k}\Omega$ ; gewählt:  $R_V = 6,8\text{ k}\Omega$

**Schalten bei induktiver Last**

Beim Schalten einer induktiven Last (**Bild 3a**), z.B. einer Relaispule, wird beim Einschalten des Transistors der Stromanstieg durch die Selbstinduktion verzögert und verläuft auf der Einschaltkurve von A1 bis A2 (**Bild 3b**). Beim Ausschalten wird in der Spule eine Induktionsspannung induziert, die ohne Diode R1 einen Strom nach der Ausschaltkurve zur Folge hat.

Beim Ausschalten einer induktiven Last kann eine hohe Induktionsspannung an der Kollektor-Emitter-Strecke entstehen, die den Transistor zerstört.

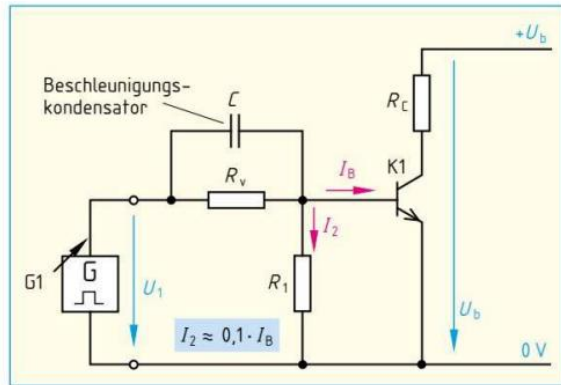
Als Schutz gegen schädliche Induktionsspannungen wird zur Induktivität meist eine **Freilaufdiode** (**Bild 3a und 3b**, Ausschaltkurve mit Diode R1) oder ein **RC-Glied** parallel geschaltet.

**Schalten bei kapazitiver Last**

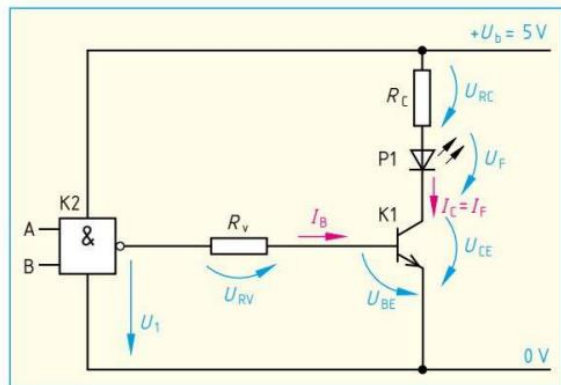
Beim Einschalten einer kapazitiven Last, z.B. dem Ladekondensator eines Netzteils, ist der Kollektorstrom stark erhöht, da der Verlustwiderstand  $R$  durch den Kondensator  $C$  kurzgeschlossen wird (**Bild 4a**). Der Einschaltstrom verläuft auf der Kurve Einschalten, ohne Widerstand  $R_1$ . Beim Ausschalten von A2 nach A1 sinkt der Strom schnell ab (**Bild 4b**).

Beim Einschalten einer kapazitiven Last kann der Transistor durch den hohen Ladestrom des Kondensators zerstört werden.

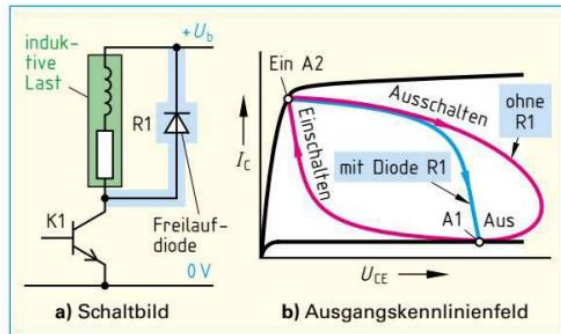
Der in Reihe geschaltete Widerstand  $R_1$  (**Bild 4a**) begrenzt den Einschaltstrom (**Bild 4b**).



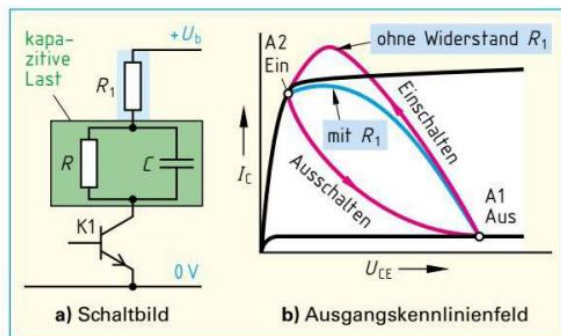
**Bild 1: Schaltung zur Schaltzeitverkürzung**



**Bild 2: Transistor als Schalter mit NAND-Gatter**



**Bild 3: Schaltverhalten bei induktiver Last**



**Bild 4: Schaltverhalten bei kapazitiver Last**

## 9.6 Optoelektronik

Die Optoelektronik befasst sich mit optoelektronischen Bauelementen (**Bild 1**), die im infraroten, sichtbaren und ultravioletten Bereich (**Seite 128**) der elektromagnetischen Strahlung eingesetzt werden. Licht, das vom Auge optisch wahrgenommen werden kann, hat eine Wellenlänge von 380 nm bis 780 nm (**Seite 384**).

### 9.6.1 Optoelektronische Sender

#### Leuchtdioden

Leuchtdioden (LED<sup>1</sup>) sind lichtemittierende (lichtaussendende) Dioden. Sie sind im Gegensatz zu Glühlampen keine Temperaturstrahler.

 LED-Lampen: **Seite 394**

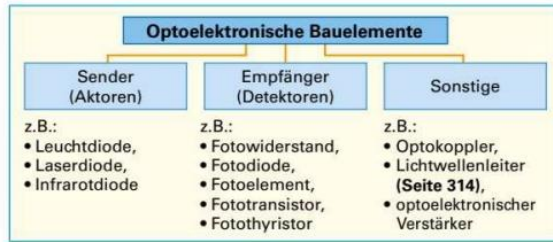
**Aufbau und Wirkungsweise.** Leuchtdioden wandeln den elektrischen Strom innerhalb des PN-Überganges in Licht um. Die Halbleitermaterialien für Leuchtdioden bestehen aus Mischkristallen, z.B. Galliumarsenid (GaAs).

Das Halbleitermaterial, z.B. GaAs, und die Dotierung bestimmen die abgestrahlte Lichtfarbe (**Tabelle**). Eine Dotierung mit z.B. Stickstoff (N) oder Phosphor (P) ergibt je nach Dotierungsgrad verschiedene Lichtfarben.

Fließt durch die Leuchtdiode Strom in Durchlassrichtung (**Bild 2**), so strahlt sie Licht ab. Deshalb gibt man in den Datenblättern (**Seite 667**) die Durchlasskennlinie an. Aus der Durchlasskennlinie kann man entnehmen, dass die Durchlassspannung z.B. einer rotleuchtenden Diode etwa  $U_F = 1,6V$  beträgt.

Der maximale Strom  $I_{Fmax}$  darf je nach Diodentyp, z.B. CQX35 ( $I_{Fmax} = 50\text{ mA}$ ), nicht überschritten werden. Deshalb ist zur Strombegrenzung immer ein Vorwiderstand  $R_v$  (**Bild 2**) oder ein Konstantstromerzeuger (**Seite 228**) notwendig. Leuchtdioden haben eine Lichtausbeute bis zu 250 lm/W (Lumen/Watt).

**Low-Power-LED.** Dies sind z.B. Standard-Leuchtdioden (**Bild 3**), Duo- und Blink-Leuchtdioden mit Strömen bis zu etwa 50 mA. Duo-LEDs enthalten zwei Dioden in einem Gehäuse. Zur Ziffern- oder Zahlendarstellung werden mehrere balkenförmige LEDs in Form einer 8 angeordnet (Siebensegmentanzeige). Weitere Anzei-



**Bild 1: Einteilung optoelektronischer Bauelemente**

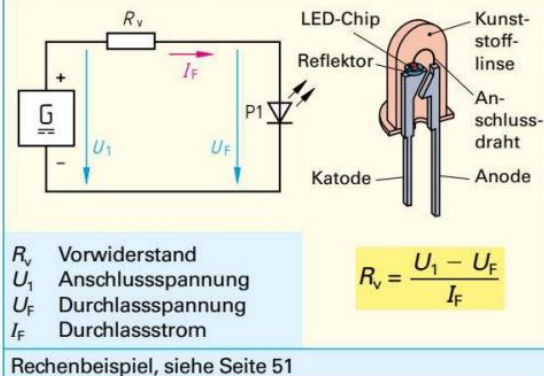
**Tabelle: Halbleiterwerkstoffe für Leuchtdioden (Auswahl)**

Werkstoff und Dotierung	Farbe, Bereich	Wellenlänge in nm	Spannung $U_F$
GaAsSi	infrarot	930	1,2 V
GaAsP	rot	655	1,6 V
GaAsPN	orange	625	1,6 V
GaAsPN	gelb	590	1,8 V
GaPN	grün	555	1,8 V
InGaN	blau	465	3 V
GaN/InGaN	weiß*	–	3,5 V

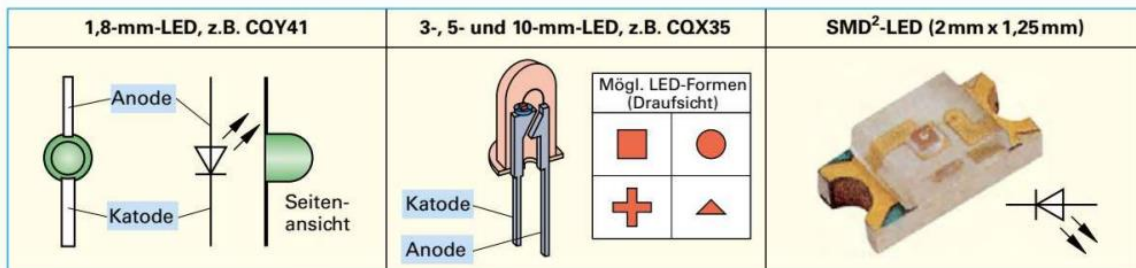
\* entsteht durch additive Farbmischung von Rot, Grün und Blau oder durch Bedampfen eines blauen LED-Chip mit Phosphor

 Datenblatt Leuchtdiode CQX35: **Seite 667**

#### Vorwiderstand und Aufbau von Leuchtdioden



**Bild 2: LED mit Vorwiderstand**



**Bild 3: Bauarten von Standard-Leuchtdioden (Beispiele)**

<sup>1</sup> LED, Abk. für: Light Emitting Diode (engl.) = Licht emittierende Diode; emittieren (lat.) = aussenden  
<sup>2</sup> SMD, Abk. für: Surface Mounted Device (engl.) = oberflächenmontiertes Bauelement

geformate haben z. B. 14 und 16 Segmente. Weiterhin gibt es z. B. LEDs in SMD-Ausführung (**Bild 3, Seite 220**).

**High-Power-LEDs (Hochleistungs-LEDs).** Sie haben Leistungen von 1 W bis etwa 20 W und Ströme bis zu 1 A. Die Lichtausbeute kann mehrere Hundert Lumen/Watt betragen. Zur Ansteuerung werden Stabilisierungsschaltungen (**Seite 275**) verwendet. Zum Dimmen verwendet man die Pulsweitenmodulation (**Seite 263**).

**LEDs an Wechselspannung.** Werden Leuchtdioden mit Wechselspannung betrieben, darf die maximale LED-Sperrspannung (meist 5 V) nicht überschritten werden. Damit die Sperrspannung während der negativen Halbwelle begrenzt wird, schaltet man antiparallel zur LED P1 eine Diode R3 (**Bild 2**). Dadurch wird die Sperrspannung an der LED auf etwa 0,7 V begrenzt.

**Anwendung:** LEDs werden als Anzeigeelemente, z. B. in der Messtechnik, für Beleuchtungen, in der Werbung (**Bild 1**) sowie bei Verkehrsampeln verwendet. In Taschenlampen verwendet man Power-LED mit einem Lichtstrom bis 5000 lm. Weitere LED-Lampen haben GU5,3-, GU10-, E14- oder E27-Sockel (**Seite 390**) und sind für Betriebsspannungen von 12 V und 230 V erhältlich. LEDs haben Vor- und Nachteile (**Übersicht**).

**Laserdioden** 

Laserdioden (**Bild 3**), auch Halbleiterlaser genannt, wandeln elektrische Energie in energiereiche Lichtstrahlung um.

Eine Laserdiode besteht vor allem aus einem Halbleiterkristall, z. B. Galliumarsenid, mit PN-Übergang, der in Durchlassrichtung betrieben wird. Je nach Wellenlänge des ausstrahlenden Laserstrahls hat er im sichtbaren Bereich eine bestimmte Farbe, z. B. bei 655 nm die Farbe Rot.

Laserdioden geringer Leistung benötigen eine Spannung von ein bis zwei Volt bei einem Strom von etwa 50 mA. Da Laserdioden gegen Überstrom und Überspannung empfindlich sind, wird im Betrieb zusätzlich zur Laserdiode eine Fotodiode (**Bild 3**) verwendet. Mithilfe der Fotodiode wird der Diodenstrom der Laserdiode kontrolliert. Bei der Laserdiode ist auf ausreichende Kühlung zu achten, da auf kleinstem Raum eine hohe Energiedichte durch die Laserstrahlung erreicht wird. Laserdioden verwendet man z. B. in Laserdruckern, DVD-Laufwerken, Laserpointern und zur Längenmessung.

Durch die hohe Energiedichte können Laserstrahlen z. B. die Augen schädigen. Deshalb ist die Leistung der Laserstrahlung, z. B. bei Laserpointern, nach DGUV<sup>1</sup> B2 auf 1 mW begrenzt.



**Bild 1: Anwendungen von LEDs**

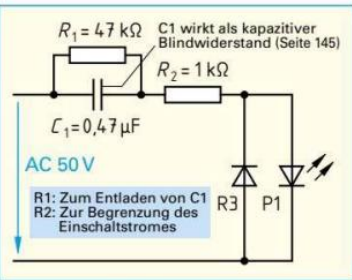
<sup>1</sup> DGUV, Abk. für: Deutsche gesetzliche Unfallversicherung

**Übersicht: Vor- und Nachteile von Leuchtdioden (Auswahl)**

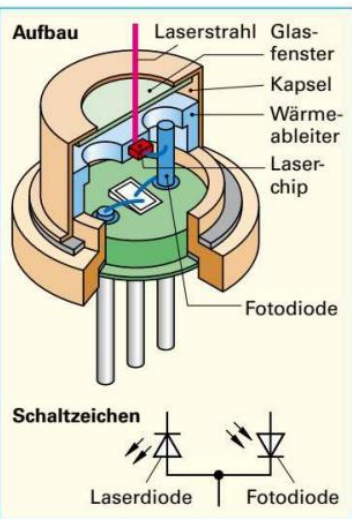
- Vorteile:**
- trägheitslos
  - lange Lebensdauer (≈ 25 000 h)
  - geringer Leistungsverbrauch
  - alle Lichtfarben möglich
  - Dimmen möglich
  - stoßfest
  - Betrieb an Kleinspannung
  - keine UV- oder IR-Strahlung
- Nachteile:**
- hohe Einschaltströme im µs-Bereich
  - Vorschaltgerät notwendig

**i Organische Leuchtdioden (OLED)** bestehen aus halbleitenden Kunststoffen und werden z. B. für Displays in mobilen Geräten verwendet.

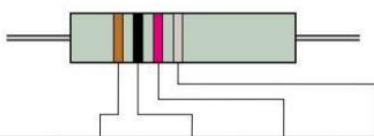
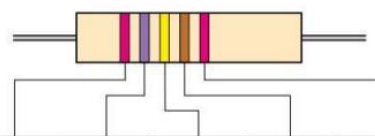
 [www.led-info.de](http://www.led-info.de)



**Bild 2: LED an Wechselspannung**



**Bild 3: Laserdiode**

i		<b>Kennzeichnung von Widerständen und Kondensatoren</b>				DIN EN 60062																																										
<b>Farbschlüssel für Kohleschichtwiderstände</b>						<b>Farbschlüssel für Metallschichtwiderstände</b>																																										
																																																
Kennfarbe	Kurzzeichen	1. Ziffer	2. Ziffer	Multiplikator	Toleranz in %	Kennfarbe	1. Ziffer	2. Ziffer	3. Ziffer	Multiplikator	Toleranz in %																																					
		Widerstandswert in Ω					Widerstandswert in Ω																																									
—	BK (sw)	—	0	1	—	—	0	0	1	—	—																																					
—	BN (br)	1	1	10 <sup>1</sup>	±1	—	1	1	1	10 <sup>1</sup>	±1																																					
—	RD (rt)	2	2	10 <sup>2</sup>	±2	—	2	2	2	10 <sup>2</sup>	±2																																					
—	OG (or)	3	3	10 <sup>3</sup>	—	—	3	3	3	10 <sup>3</sup>	—																																					
—	YE (ge)	4	4	10 <sup>4</sup>	—	—	4	4	4	10 <sup>4</sup>	—																																					
—	GN (gn)	5	5	10 <sup>5</sup>	±0,5	—	5	5	5	10 <sup>5</sup>	±0,5																																					
—	BU (bl)	6	6	10 <sup>6</sup>	±0,25	—	6	6	6	10 <sup>6</sup>	±0,25																																					
—	VT (vi)	7	7	10 <sup>7</sup>	±0,1	—	7	7	7	10 <sup>7</sup>	±0,1																																					
—	GY (gr)	8	8	10 <sup>8</sup>	—	—	8	8	8	10 <sup>8</sup>	—																																					
—	WH (ws)	9	9	10 <sup>9</sup>	—	—	9	9	9	10 <sup>9</sup>	—																																					
keine	—	—	—	—	±20	keine	—	—	—	—	—																																					
Silber	SR	—	—	10 <sup>-2</sup>	±10	Silber	—	—	—	10 <sup>-2</sup>	±10																																					
Gold	GD	—	—	10 <sup>-1</sup>	±5	Gold	—	—	—	10 <sup>-1</sup>	±5																																					
<b>E-Reihen für Widerstände und Kondensatoren</b>																																																
E6	1,0		1,5		2,2		3,3		4,7		6,8																																					
E12	1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2																																				
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																								
E48	1,00	1,21	1,47	1,78	2,15	2,61	3,16	3,83	4,64	5,62	6,81	8,25	1,05	1,27	1,54	1,87	2,26	2,74	3,32	4,02	4,87	5,90	7,15	8,66	1,10	1,33	1,62	1,96	2,37	2,87	3,48	4,22	5,11	6,19	7,50	9,09	1,15	1,40	1,69	2,05	2,49	3,01	3,65	4,42	5,36	6,49	7,87	9,53
Beispiel Reihe E12: 1,0 Ω; 1,2 Ω ... 8,2 Ω; 1,0 kΩ; 1,2 kΩ ... 8,2 kΩ; 10 kΩ; 12 kΩ ... 82 kΩ; 100 kΩ; 120 kΩ ... 820 kΩ																																																
<b>Alphanumerische Kennzeichnung von Widerständen und Kondensatoren</b>																																																
Widerstände	R33	3R3	33R	K33	3K3	33K	M33	3M3	33M																																							
	0,33 Ω	3,3 Ω	33 Ω	0,33 kΩ	3,3 kΩ	33 kΩ	0,33 MΩ	3,3 MΩ	33 MΩ																																							
Kondensatoren	4p7	47p	n47	4n7	47n	μ47	4μ7	47μ	m47																																							
	4,7 pF	47 pF	0,47 nF	4,7 nF	47 nF	0,47 μF	4,7 μF	47 μF	0,47 mF																																							



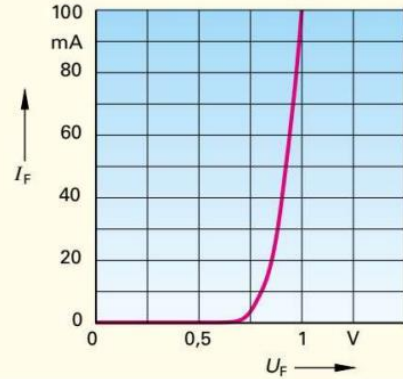
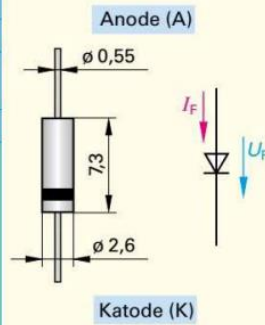
## Dioden

BAY 44  
CQX 35  
BZX 55 ...

### Silicium-Universaldiode BAY 44 (Auszug aus dem Datenblatt)

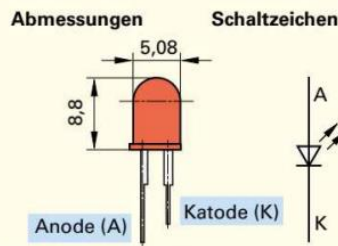
Grenzwerte	
Sperrspannung	$U_{Rmax} = 50 \text{ V}$
Durchlassstrom	$I_{Fmax} = 250 \text{ mA}$
Sperrschichttemperatur	$\vartheta_{jmax} = 150 \text{ °C}$
Verlustleistung	$P_{tot} = 250 \text{ mW}$

#### Abmessungen Schaltzeichen

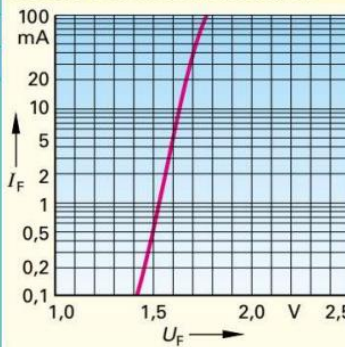


### Leuchtdiode CQX 35 rotleuchtend (Auszug aus dem Datenblatt)

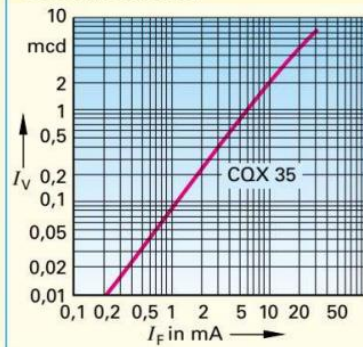
Grenzwerte	
Sperrspannung	$U_{Rmax} = 5 \text{ V}$
Durchlassstrom	$I_{Fmax} = 50 \text{ mA}$
Verlustleistung	$P_{tot} = 100 \text{ mW}$



#### Durchlassstrom $I_F$ in Abhängigkeit von der Durchlassspannung $U_F$



#### Lichtstärke $I_V$ in Abhängigkeit vom Durchlassstrom $I_F$



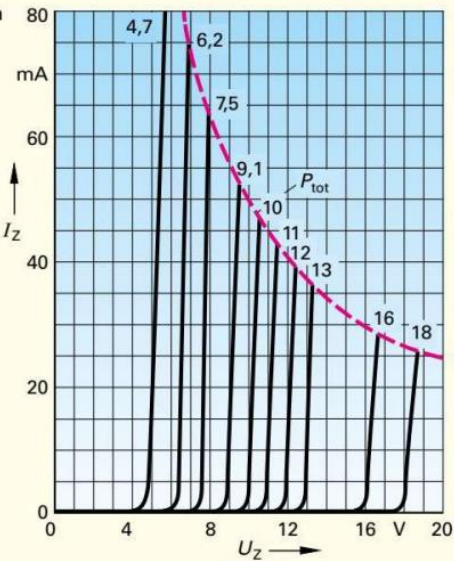
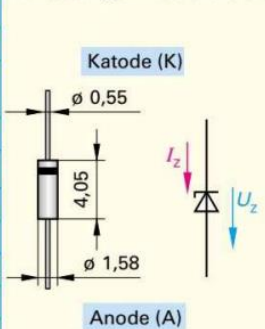
### Z-Dioden BZX 55/C4V7... BZX 55/C 18 (Auszug aus dem Datenblatt)

Grenzwerte	
Verlustleistung	$P_{tot} = 500 \text{ mW}$
Z-Strom	$I_Z = P_{tot}/U_Z$
Sperrschichttemperatur	$\vartheta_{jmax} = 175 \text{ °C}$
Wärmewiderstand	$R_{thU} = 300 \text{ K/W}$

#### Z-Spannung bei $I_Z = 5 \text{ mA}$

Diode	$U_Z$ in V
BZX55/C4V7	4,4 ... 5,0
BZX55/C6V2	5,8 ... 6,6
BZX55/C7V5	7,0 ... 7,9
BZX55/C9V1	8,5 ... 9,6
BZX55/C10	9,4 ... 10,6
BZX55/C11	10,4 ... 11,6
BZX55/C12	11,4 ... 12,7
BZX55/C13	12,4 ... 14,1
BZX55/C16	15,3 ... 17,1
BZX55/C18	16,8 ... 19,1

#### Abmessungen Schaltzeichen



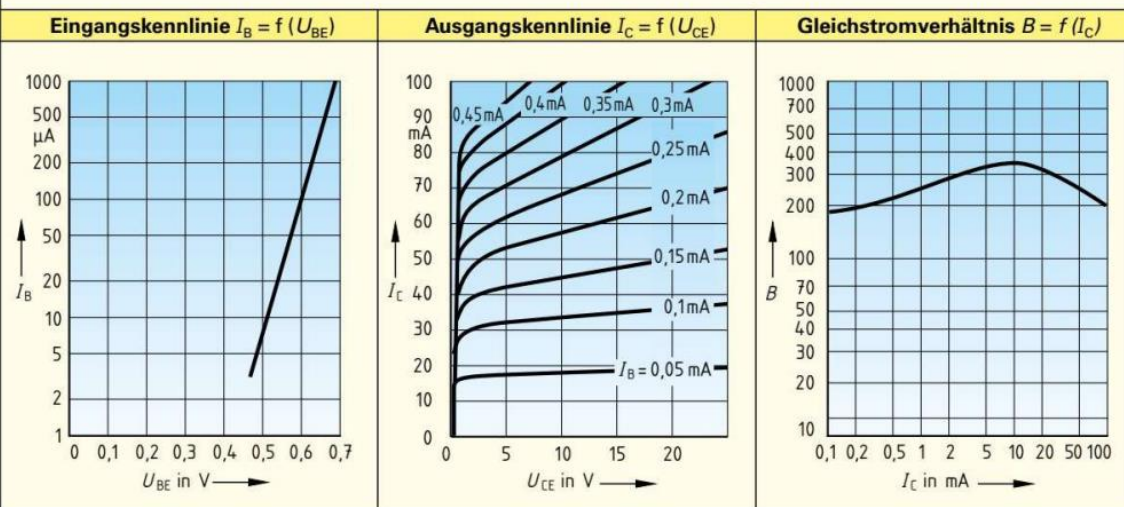
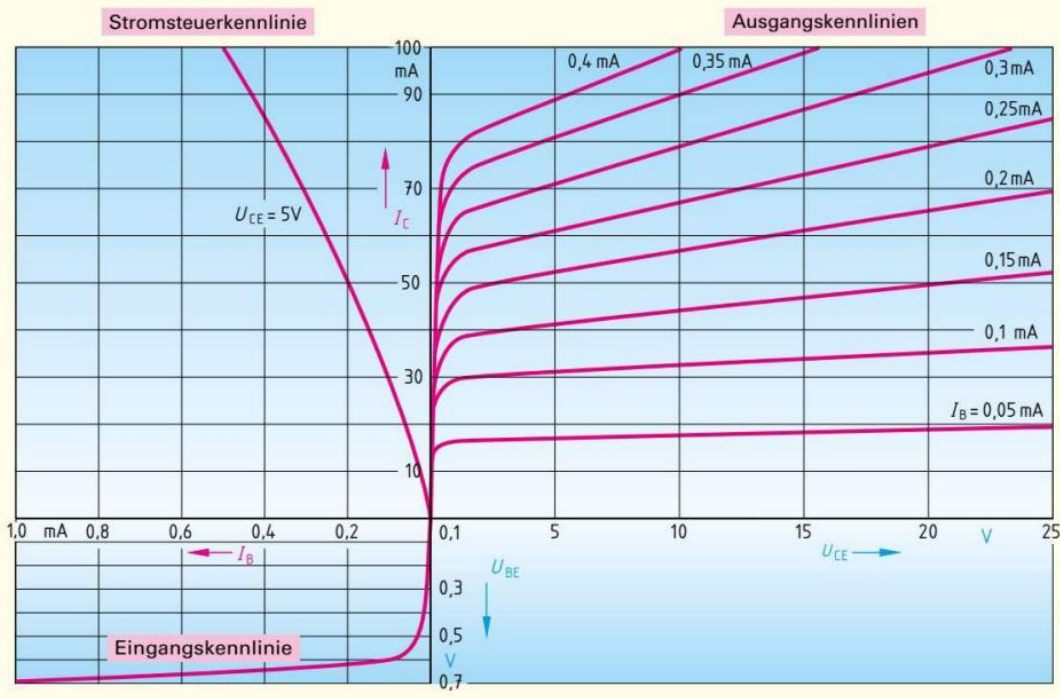


# NPN-Transistor

BC 107  
BC 171  
BC 237

Grenzwerte		Schaltzeichen	Anschlüsse und Gehäuseformen	
Kollektor-Emitterspannung	$U_{CEmax} = 50\text{ V}$		BC 107	
Basis-Emitterspannung	$U_{BEmax} = -5\text{ V}$			
Kollektorstrom	$I_{Cmax} = 100\text{ mA}$			
Basisstrom	$I_{Bmax} = 50\text{ mA}$			
Verlustleistung bei 25 °C	$P_{tot} = 300\text{ mW}$			
<b>Gleichstromverhältnis B bei:</b>				
$U_{CE} = 5\text{ V}, I_C = 2\text{ mA}$	min. 180    typ. 290    max. 460			
$U_{CE} = 5\text{ V}, I_C = 100\text{ mA}$	150    200    300			

## Vierquadrantenkennlinienfeld



## 5 Magnetisches Feld

### 5.1 Eigenschaften der Magnete und Darstellungshilfen

Stoffe, die von Magneten angezogen werden, z.B. Eisen, Nickel und Kobalt, nennt man **ferromagnetische<sup>1</sup> Stoffe**.

**Pole** nennt man die Stellen eines Magneten mit der größten Kraftwirkung. Die magnetische Kraftwirkung nimmt von den Polen zur Magnetmitte hin ab. In der Mitte zwischen den Polen ist keine magnetische Kraftwirkung vorhanden. Diesen kleinen Grenzbereich nennt man **neutrale Zone** (Bild 2). Entsprechend der Anzeigerichtung einer Magnetnadel beim Kompass hat man den Pol, der in geographische Nord-Richtung zeigt, **Nordpol (N)**, den anderen **Südpol (S)** genannt.

**Versuch 1:** Nähern Sie einen Magneten einem zweiten Magneten.

*Nord- und Südpol der Magnete ziehen sich an. Die Nordpole der beiden Magnete stoßen sich ab, ebenso die Südpole (Bild 1).*

Teilt man einen Magneten, z. B. einen magnetisierten Eisendraht, entstehen wieder neue kleinere Magnete. Jeder Teilmagnet hat wieder einen Nordpol und einen Südpol (Bild 2). Denkt man sich die Teilung der Magnete weiter fortgesetzt, bleiben schließlich kleinste, nicht weiter teilbare Teilchen übrig. Diese nennt man **Elementarmagnete**. In ferromagnetischen Stoffen existieren kleine Bereiche, in denen die Elementarmagnete gleichmäßig ausgerichtet sind. Diese Bereiche hat man nach ihrem Entdecker **weissche<sup>2</sup> Bezirke** genannt (Bild 3).

**Magnetisieren.** Ferromagnetische Werkstoffe, z. B. Eisen oder Kobalt, die nicht magnetisiert sind, haben ungeordnete weissche Bezirke (Bild 3a). Nach außen zeigt sich deshalb keine magnetische Wirkung. Durch das **Magnetisieren** mit einem starken Magneten werden nur die vorhandenen ungeordneten weisschen Bezirke ausgerichtet (Bild 3b). Diese Ausrichtung erfordert Arbeit, die als **magnetische Energie** gespeichert wird.

**Entmagnetisieren.** Das Aufheben der ausgerichteten weisschen Bezirke nennt man **Entmagnetisieren**. Ein Werkstoff verliert seinen Magnetismus bei einer für ihn charakteristischen Temperatur, der sogenannten **Curie<sup>3</sup>-Temperatur**. Ebenso kann bei starken Erschütterungen, z. B. durch Hämmern des Magneten, der Magnetismus aufgehoben werden. Technisch wird mit Entmagnetisierungsgeräten entmagnetisiert.

Je mehr weissche Bezirke in einem magnetischen Werkstoff ausgerichtet sind, desto größer ist seine magnetische Wirkung. Sind alle vorhandenen weisschen Bezirke ausgerichtet, ist eine weitere Verstärkung der magnetischen Wirkung nicht mehr möglich. Der Magnetwerkstoff ist dann **magnetisch gesättigt** (Seite 88).

**Dauermagnete (Permanentmagnete<sup>4</sup>)** sind Stoffe, z. B. AlNiCo-Legierungen, die den Magnetismus über eine lange Zeit behalten und nur mit hohem Energieaufwand entmagnetisiert werden können. Diese Eigenschaft nennt man **hartmagnetisch**.

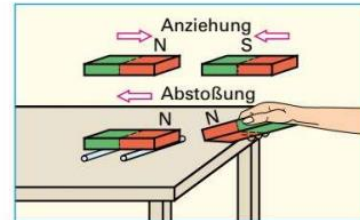


Bild 1: Kraftwirkungen magnetischer Pole

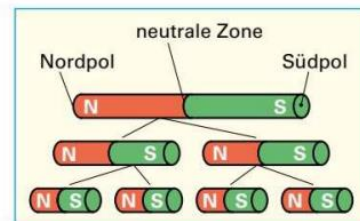


Bild 2: Zerlegung eines Magneten in Teilmagnete

#### **i** Magnete

- Magnete üben Anziehungskräfte auf ferromagnetische Stoffe aus.
- Magnete besitzen einen Nordpol und einen Südpol.
- Ungleichnamige Magnetpole ziehen sich an.
- Gleichnamige Magnetpole stoßen sich ab.
- Einen Magnet kann man sich aus vielen gleich gerichteten Elementarmagneten zusammengesetzt vorstellen.

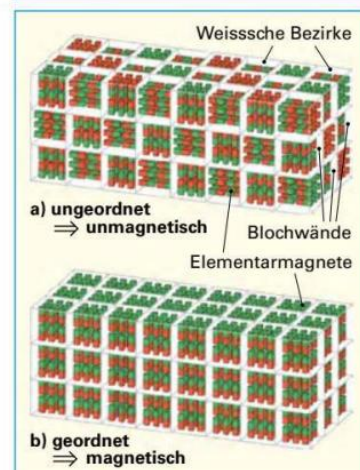


Bild 3: Weissche Bezirke in ferromagnetischen Stoffen

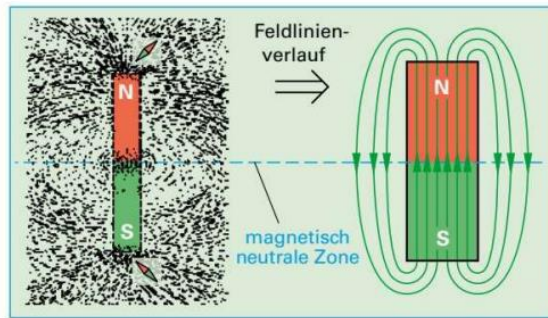
<sup>1</sup> ferromagnetisch = magnetisch, wie Eisen (lat. ferrum); <sup>2</sup> Weiss, franz. Physiker, 1885 bis 1940;

<sup>3</sup> Curie, Pierre, franz. Physiker 1859 bis 1906 <sup>4</sup> von permanere (lat.) = sich erhalten

**Versuch 1:** Legen Sie einen Stabmagneten unter eine Glasplatte und streuen Sie Eisenfeilspäne auf die Platte.

Die Späne werden zu kleinen Magneten, richten sich aus und bilden bogenförmige Linien, die von Pol zu Pol verlaufen (Bild 1).

Der Raum im und um einen Magneten ist durch einen Energiezustand gekennzeichnet, der **magnetisches Feld** genannt wird. Als Darstellungshilfe werden für das magnetische Feld Linien benutzt, die man **magnetische Feldlinien** nennt. Magnetische Feldlinien sind Linien, die den Verlauf der magnetischen Kraftwirkung darstellen. Man hat für die magnetischen Feldlinien den Richtungsverlauf wie in Bild 1 festgelegt.



**Bild 1:** Magnetischer Feldlinienverlauf eines Stabmagneten

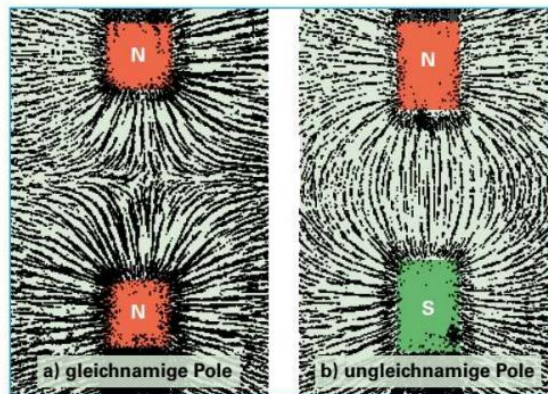


**Magnetischer Feldlinienverlauf**

- Magnetische Feldlinien sind immer geschlossene Linien ohne Anfang und Ende.
- Magnetische Feldlinien verlaufen außerhalb des Magneten vom Nordpol zum Südpol und innerhalb des Magneten vom Südpol zum Nordpol.
- Magnetische Feldlinien treten immer senkrecht aus der Magnetoberfläche aus bzw. in diese wieder ein.

**Versuch 2:** Legen Sie zwei Magnete mit ihren gleichnamigen Polen (N und N oder S und S) einander gegenüber, und streuen Sie Eisenfeilspäne auf die Glasplatte. Wiederholen Sie den Versuch mit ungleichnamigen Polen.

Die Feldlinien zwischen gleichnamigen Polen weichen einander aus (Bild 2a). Zwischen den ungleichnamigen Polen der Magnete verlaufen die Feldlinien bogenförmig (Bild 2b).



**Bild 2:** Magnetischer Feldlinienverlauf zwischen Magnetpolen

Zwischen den Polen haben die Feldlinien einen dichten Verlauf. Liegen die Feldlinien dicht beieinander, so ist die magnetische Kraftwirkung groß. Großer Abstand der Feldlinien bedeutet eine kleine magnetische Kraft.

Wichtige Felder für Magnetanwendungen sind **homogene<sup>1</sup> Felder** und **radialhomogene<sup>2</sup> Felder (Übersicht)**. Homogene Felder sind für technische Anwendungen besonders geeignet, da in diesen Feldern die Energieverteilung gleichmäßig ist. Oft kann man aber nur in bestimmten Teilbereichen einen homogenen Feldlinienverlauf erreichen. Soll eine drehende Kraftwirkung mithilfe eines magnetischen Feldes erzeugt werden, so ist das radialhomogene Feld vorteilhaft, da im schmalen Luftspalt die Ausnutzung der magnetischen Kraftwirkung gleichmäßig und mit gutem Wirkungsgrad möglich ist. Magnetanordnungen mit radialhomogenen Feldern findet man z.B. in Zeigermessgeräten, Motoren und Generatoren.

<sup>1</sup> homogen (griech.) = gleichmäßig  
<sup>2</sup> radial, von Radius (kreisförmig)

**Übersicht:**  
 Einteilung magnetischer Felder

**Homogene Felder**

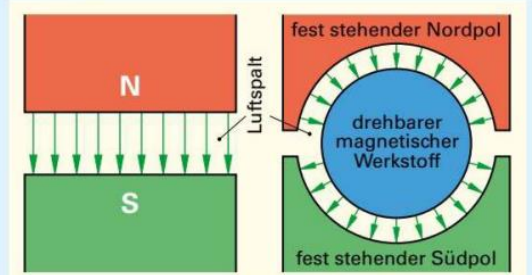
Die Richtung und die Größe der magnetischen Kraftwirkung ist an jeder Stelle im Feld gleich.

Die Feldlinien verlaufen parallel, in gleichem Abstand und in gleicher Richtung.

**Radialhomogene Felder**

Die magnetische Kraftwirkung verläuft im Feld strahlenförmig nach allen Richtungen. Die Größe der Kraft ist in schmalen Feldbereichen fast gleich.

Feldlinien zeigen strahlenförmig auf einen gedachten Mittelpunkt.



**Hinweis:** Obwohl die magnetischen Feldlinien geschlossene Linien sind, zeichnet man oft den Feldlinienverlauf vereinfacht nur im Luftspalt bzw. außerhalb der Magneten.

## 5.2 Elektromagnetismus

### 5.2.1 Stromdurchflossener Leiter und Magnetfeld

**Versuch 1:** Führen Sie einen Leiter durch das Loch in einer dünnen Plexiglasplatte und lassen Sie einen Gleichstrom durch den Leiter fließen. Bestreuen Sie dann die Glasplatte in der Umgebung des Leiters mit Eisenfeilspänen.

Die Eisenfeilspäne ordnen sich in konzentrischen<sup>1</sup> Kreisen um den Leiter herum an (Bild 1).

**Versuch 2:** Bringen Sie eine kleine, frei drehbare Magnetnadel in die Nähe des vom Gleichstrom durchflossenen Leiters aus Versuch 1 und führen Sie diese um den Leiter. Anschließend kehren Sie die Stromrichtung um und wiederholen den Versuch. Vergrößern Sie die Entfernung der Magnetnadel vom Leiter und beobachten Sie die Kraftwirkung auf die Magnetnadel.

Wird die Magnetnadel in einer Kreisbahn um den Leiter herumgeführt, zeigt sie in jedem Punkt in Richtung der Tangente<sup>2</sup> (Bild 2). Nach der Umkehr der Stromrichtung zeigt die Magnetnadel ebenfalls in die umgekehrte Richtung. In weiterer Entfernung vom Leiter ist die Kraftwirkung wesentlich schwächer ausgeprägt.

Die Richtung des Stromes im Leiter wird durch Symbole gekennzeichnet. Fließt der Strom aus dem Leiter heraus, so zeichnet man in den Leiterquerschnitt einen Punkt (•), fließt er in den Leiter hinein, so zeichnet man ein Kreuz (x) (Bild 3).

Die magnetischen Feldlinien verlaufen im Uhrzeigersinn, wenn man in Stromrichtung auf den Leiter blickt. Sie verlaufen gegen den Uhrzeigersinn, wenn der Strom auf den Betrachter zufließt.

Den Zusammenhang zwischen Stromrichtung und magnetischer Feldlinienrichtung zeigt die **Schraubenregel** (Rechtsschraubenregel, Bild 4).

**Schraubenregel:** Man denkt sich eine Schraube mit Rechtsgewinde in Richtung des Stromes in den Leiter geschraubt. Die Drehrichtung der Schraube gibt dann die Richtung der Feldlinien an.

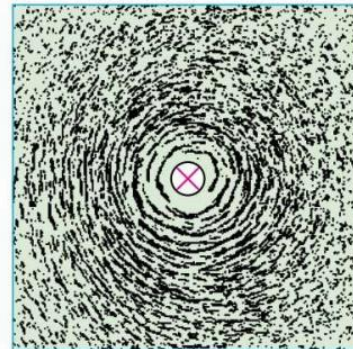
Auch stromdurchflossene flüssige oder gasförmige Leiter, z.B. ein Schweißlichtbogen, sind von einem Magnetfeld umgeben. Um Leiter, die vom Wechselstrom durchflossen werden, bildet sich ebenfalls ein Magnetfeld. Wie der Strom ändert dann auch das Magnetfeld ständig seine Größe und Richtung (magnetisches Wechselfeld).

#### **i** Strom und Magnetfeld

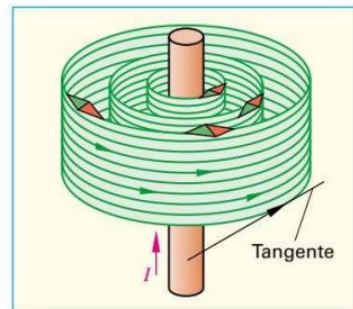
- Der elektrische Strom ist die Ursache für das magnetische Feld.
- Jede bewegte elektrische Ladung ist von einem magnetischen Feld umgeben.
- Ein stromdurchflossener Leiter erzeugt immer ein magnetisches Feld.
- Die Feldlinien um einen stromdurchflossenen Leiter haben die Form von konzentrischen Kreisen.
- Die Richtung des magnetischen Feldes ist abhängig von der Stromrichtung.
- Die Stärke des magnetischen Feldes nimmt mit zunehmender Entfernung vom Leiter ab.

<sup>1</sup> konzentrisch = Kreise, die um einen gemeinsamen Mittelpunkt herum angeordnet sind.

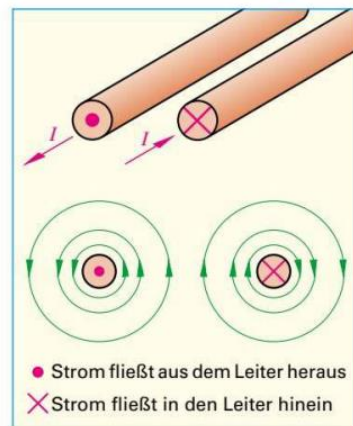
<sup>2</sup> Tangente = Gerade, die eine Kurve in einem Punkt berührt.



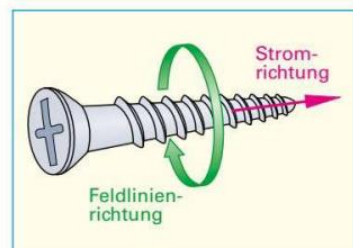
**Bild 1:** Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter



**Bild 2:** Magnetische Feldlinien um einen stromdurchflossenen Leiter



**Bild 3:** Richtung von Strom und Magnetfeld



**Bild 4:** Schraubenregel (Rechtsschraubenregel)

## 5.2.2 Stromdurchflossene Spule und Magnetfeld

**Versuch 1:** Biegen Sie einen Leiter zu einer Schleife und führen Sie diese durch die beiden Löcher einer dünnen Plexiglasplatte. Bestreuen Sie die Platte mit Eisenspänen und schließen Sie den Leiter an eine einstellbare Gleichspannungsquelle an. Prüfen Sie die Feldrichtung mit der Magnetnadel.

In der Leiterschleife entsteht ein magnetisches Feld (Bild 1). Die Schleife wirkt wie ein kurzer Stabmagnet.

Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Windung ergibt sich aus der Überlagerung der Magnetfelder der benachbarten Leiter (Bild 1). Innerhalb der Windung verlaufen die Feldlinien in gleicher Richtung und verstärken die magnetische Wirkung. Die Feldliniendichte ist dort groß. Außerhalb der Leiterschleife ergibt sich mit zunehmender Entfernung vom Leiter eine abnehmende Feldliniendichte. Um den Elektromagnetismus besser nutzen zu können, wickelt man einen langen Leiter zu einer **Spule**. Die Spule besteht aus vielen Leiterschleifen, die man **Windungen** nennt.

Eine Spule besteht aus mehreren in Reihe geschalteten Windungen.

Das Magnetfeld einer Spule ergibt sich aus der Überlagerung der Magnetfelder der einzelnen Windungen. Es entsteht ein Magnetfeld, das dem des Stabmagneten gleicht (Bild 2). Die Feldlinien verlaufen im Inneren der Spule parallel und in gleichem Abstand zueinander. Im Inneren einer Spule ist das Magnetfeld homogen. Dort, wo die Feldlinien aus der Spule austreten, bildet sich der Nordpol, wo sie eintreten, der Südpol. Außerhalb der Spule ist das Feld inhomogen (nicht homogen).

Stromdurchflossene Spulen sind Elektromagnete.

**Versuch 2:** Stellen Sie die Magnetfeldrichtung einer vom Gleichstrom durchflossenen Spule mithilfe einer Magnetnadel fest. Wechseln Sie die Stromrichtung in der Spule und beobachten Sie die Magnetnadel.

Die Magnetfeldrichtung (Polarität) einer Spule hängt von der Stromrichtung ab.

Nord- und Südpol einer Spule lassen sich auch mithilfe der **Spulen-Regel** bestimmen (Bild 3).

**Spulen-Regel:** Legt man die rechte Hand so um eine Spule, dass die Finger in Stromrichtung zeigen, dann zeigt der abgespreizte Daumen zum Nordpol der Spule.

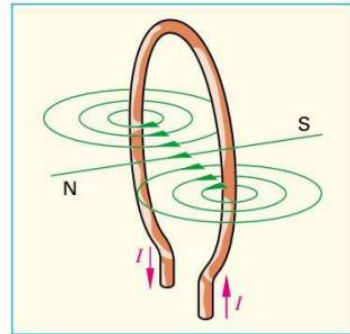


Bild 1: Magnetfeld einer Leiterschleife

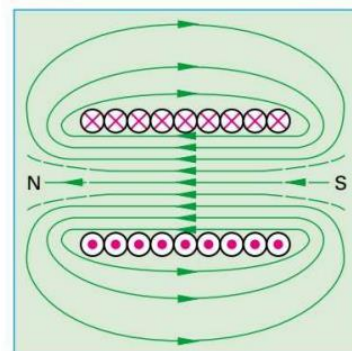
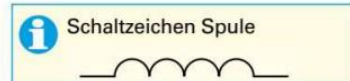


Bild 2: Magnetfeld einer Spule

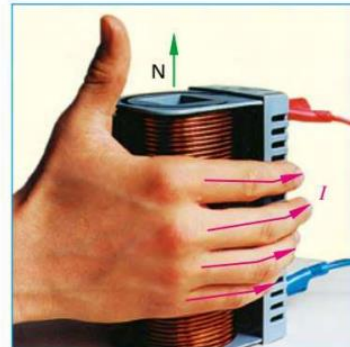


Bild 3: Spulen-Regel

### Wiederholungsfragen

- 1 Welche Kraftwirkung üben a) gleichnamige Magnetpole und b) ungleichnamige Magnetpole aufeinander aus?
- 2 Was versteht man unter einem magnetischen Feld, und was sind magnetische Feldlinien?
- 3 Wie ist die Richtung der magnetischen Feldlinien festgelegt?
- 4 Warum wird Eisen beim Magnetisieren, z.B. mit einem Dauermagneten, selbst zum Magneten?
- 5 Welche Form haben die magnetischen Feldlinien um einen vom Strom durchflossenen Leiter?
- 6 Welcher Zusammenhang besteht zwischen Stromrichtung und magnetischer Feldlinienrichtung?
- 7 Bestimmen Sie die Magnetpole der stromdurchflossenen Spule im Bild 4.

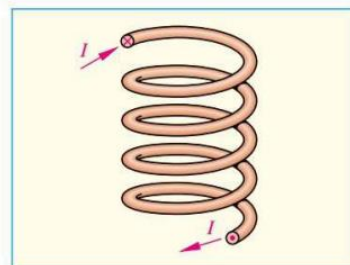


Bild 4: Stromdurchflossene Spule

## 5.3 Magnetische Größen

### 5.3.1 Magnetischer Fluss $\Phi$

Die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien eines Dauermagneten oder einer stromdurchflossenen Spule nennt man **magnetischen Fluss** oder **Magnetfluss  $\Phi$**  (Bild 1). Der Begriff magnetischer Fluss entstand durch den Vergleich mit dem elektrischen Stromfluss  $I$ .

Der magnetische Fluss  $\Phi$  kann nur über seine Wirkungen gemessen werden. Er hat die Einheit Voltsekunde (Vs) mit dem besonderen Einheitennamen **Weber**<sup>2</sup> (Wb).

**Versuch:** Hängen Sie ein Eisenstück so an einen Kraftmesser, dass es in den Hohlraum einer Spule mit 600 Windungen hineinragt. Schließen Sie die Spule und einen Strommesser an eine einstellbare Gleichspannungsquelle an. Stellen Sie die Stromstärke 2 A ein. Lesen Sie die Anzeige des Kraftmessers ab. Wiederholen Sie den Versuch mit einer Spule gleicher Form und Größe mit 1200 Windungen bei einer Stromstärke von 1 A.

*Die Anzeigen des Kraftmessers sind in beiden Fällen etwa gleich groß.*

Da beide Kräfte gleich groß sind, ist auch der Magnetfluss in beiden Spulen gleich groß. Folglich lässt sich der Magnetfluss einer Spule entweder über die Stromstärke oder die Windungszahl beeinflussen.

Je stärker der Strom  $I$  durch die Spule und je höher die Windungszahl  $N$ , umso größer ist der magnetische Fluss  $\Phi$ .

### 5.3.2 Elektrische Durchflutung $\Theta$

Eine stromdurchflossene Spule ist folglich ein Energiewandler, der elektrische Energie in magnetische Energie umwandelt. Diesen Prozess beschreibt die **elektrischen Durchflutung  $\Theta$** <sup>3</sup>, die durch die Windungszahl der Spule  $N$  und des in ihr fließenden Stromes  $I$  bestimmt wird. Sie ist die Quelle für den magnetischen Fluss.

Zur Veranschaulichung dient die von einer Feldlinie umschlossene magnetische Fläche, die vom Strom „durchflutet“ wird, der in den Windungen der Spule fließt (Bild 2).

### 5.3.3 Magnetische Feldstärke $H$

Die Konzentration der magnetischen Energie ist maßgebend für die magnetische Wirkung. Sie wird umso größer, je größer die Durchflutung und je kleiner die Spulenlänge ist, die der mittleren Feldlinienlänge entspricht (Bild 3). Dieses Verhältnis von Durchflutung  $\Theta$  und mittlerer Feldlinienlänge  $l_m$  nennt man **magnetische Feldstärke  $H$** . Folglich stellt die magnetische Feldstärke den Anteil der Durchflutung bezogen auf eine bestimmte Teillänge der Feldlinien dar.

#### Beispiel:

Ein Strom von 100 mA durchfließt eine Ringspule mit 500 Windungen und 20 cm mittleren Feldlinienlänge. Wie groß ist die magnetische Feldstärke?

#### Lösung:

$$H = \frac{I \cdot N}{l_m} = \frac{0,1 \text{ A} \cdot 5000}{0,2 \text{ m}} = 2500 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

<sup>1</sup> griech. Großbuchstabe Phi

<sup>2</sup> Wilhelm Eduard Weber, deutscher Physiker, 1804 bis 1891

<sup>3</sup> griech. Großbuchstabe Theta

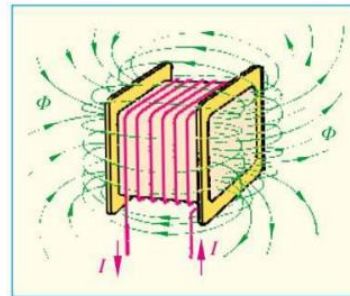


Bild 1: Gesamtzahl aller Feldlinien einer Spule



#### Magnetischer Fluss

$$\Phi \quad [\Phi] = \text{Vs} = \text{Wb}$$

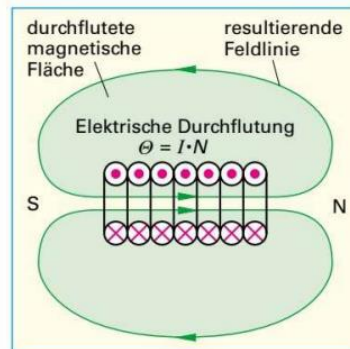


Bild 2: Elektrische Durchflutung einer Spule

#### Elektr. Durchflutung einer Spule

$$\Theta = I \cdot N \quad [\Theta] = \text{A}$$

$\Theta$  elektrische Durchflutung  
 $N$  Windungszahl  
 $I$  Stromstärke

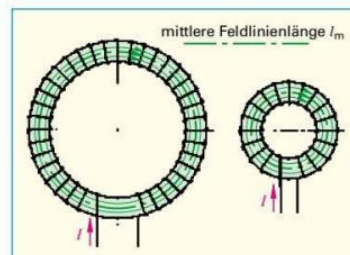


Bild 3: Ringspulen großer und kleiner mittlerer Feldlinienlänge

#### Magnetische Feldstärke

$$H = \frac{\Theta}{l_m} = \frac{I \cdot N}{l_m} \quad [H] = \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$H$  magnetische Feldstärke  
 $l_m$  mittlere Feldlinienlänge  
 $\Theta$  elektrische Durchflutung  
 $I$  Stromstärke  
 $N$  Windungszahl

### 5.3.4 Magnetische Flussdichte $B$

Ein Magnet hat eine um so größere Kraftwirkung, je dichter die magnetischen Feldlinien sind, also je größer der magnetische Fluss und je kleiner die Fläche ist, die von ihm durchsetzt wird. Das Verhältnis aus magnetischem Fluss  $\Phi$  und der von ihm durchsetzten Fläche  $A$  nennt man **magnetische Flussdichte  $B$** . Die Flussdichte hat die Einheit **Tesla<sup>1</sup> (T)**. Man misst die Flussdichte z. B. mit einem **Hallgenerator (Hallsonde, Seite 201)**.

Je größer die magnetische Flussdichte eines Magneten ist, umso größer ist die magnetische Wirkung.

Dauermagnete, z. B. Haftmagnete mit einer Flussdichte von etwa 0,5 T bis 1 T, erreichen eine Abreißkraft von etwa 1000 N. Abreißkraft ist die Kraft, die aufgebracht werden muss, um die Haftkraft zu überwinden. Das Magnetfeld der Erde beträgt ungefähr 40  $\mu\text{T}$ .

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen wurde für Deutschland in der Verordnung über elektromagnetische Felder für öffentliche Elektroanlagen mit 50-Hz-Wechselspannung ein Grenzwert von 100  $\mu\text{T}$  festgelegt.

So dürfen besonders Elektrogeräte für den Haushalt diesen Grenzwert nicht überschreiten (**Tabelle**).

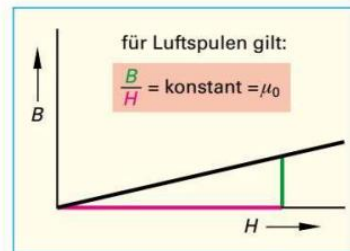
Elektrogerät	Magnetische Flussdichte	Elektrogerät	Magnetische Flussdichte
Wäschetrockner	0,45 $\mu\text{T}$ bis 1,0 $\mu\text{T}$	Handbohrmaschine	2,0 $\mu\text{T}$ bis 3,5 $\mu\text{T}$
Mikrowellengerät	4,0 $\mu\text{T}$ bis 8,0 $\mu\text{T}$	Elektroherd	0,15 $\mu\text{T}$ bis 0,5 $\mu\text{T}$
Wasserkocher (1 kW)	0,08 $\mu\text{T}$	Heizlüfter	4,0 $\mu\text{T}$ bis 8,0 $\mu\text{T}$

Für den Arbeitsschutz in Bereichen, in denen elektrische Felder (**Seite 71**) und elektromagnetische Felder auftreten, ist die DGUV Vorschrift 15 – Elektromagnetische Felder zu beachten.

## 5.4 Eisen im Magnetfeld einer Spule

### Spule ohne Eisenkern

Bei einer Spule ohne Eisenkern (Luftspule) nimmt die magnetische Flussdichte  $B$  (Wirkung) im gleichen Verhältnis zu wie die durch den Spulenstrom  $I$  hervorgerufene magnetische Feldstärke  $H$  (Ursache). Es ergibt sich ein direkt proportionaler Zusammenhang (**Bild**). Das Verhältnis aus magnetischer Flussdichte  $B$  und magnetischer Feldstärke  $H$  nennt man magnetische Feldkonstante  $\mu_0^2$ . Der Zahlenwert für  $\mu_0$  gilt exakt für Vakuum und annähernd für Luft.



**Bild: Kennlinie  $B = f(H)$  für Luftspulen**

**Beispiel:**  
Eine Luftspule hat eine magnetische Feldstärke von 2500 A/m. Wie groß ist die magnetische Flussdichte?

**Lösung:**  
 $B = \mu_0 \cdot H$   
 $B = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 2500 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 0,00314 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 0,00314 \text{ T} = \mathbf{3,14 \text{ mT}}$

**Magnetische Feldkonstante**

$$\mu_0 = \frac{B}{H} \quad [\mu_0] = \frac{\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}}{\frac{\text{A}}{\text{m}}} = \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

$\mu_0$  magnetische Feldkonstante  
 $B$  magnetische Flussdichte  
 $H$  magnetische Feldstärke

<sup>1</sup> Nikola Tesla, kroatischer Physiker, 1856 bis 1943  
<sup>2</sup>  $\mu$  griech. Kleinbuchstabe

## 5.5 Strom und Magnetfeld

### 5.5.1 Stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld

**Versuch 1:** Hängen Sie einen Leiter, z.B. ein Aluminiumrohr, an zwei beweglichen Metallbändern zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten (**Bild 1**). Schließen Sie die Leiterschaukel über einen Strommesser an eine einstellbare Gleichspannungsquelle an und steigern Sie langsam den Strom.

*Der Leiter wird aus dem Magnetfeld des Hufeisenmagneten herausbewegt.*

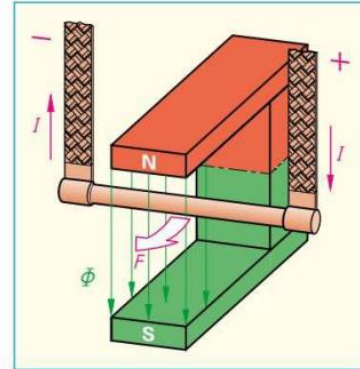
Auf den stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld wirkt eine Kraft senkrecht zum Magnetfeld und senkrecht zum Leiter.

**Versuch 2:** Vertauschen Sie die Anschlüsse der Zuleitungen und wiederholen Sie Versuch 1.

*Der Leiter bewegt sich in entgegengesetzter Richtung.*

**Versuch 3:** Vertauschen Sie die Pole des Hufeisenmagneten und wiederholen Sie Versuch 2.

*Der Leiter bewegt sich wieder aus dem Magnetfeld heraus.*

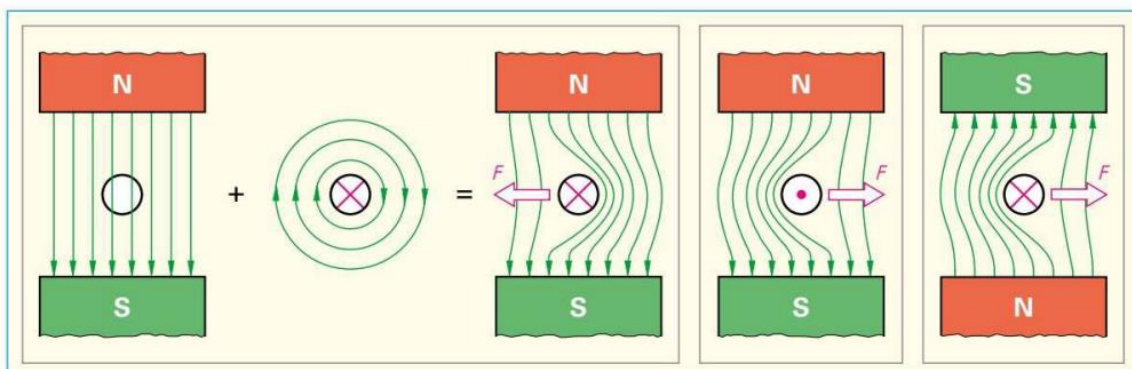


**Bild 1:** Ablenkung des vom Strom durchflossenen Leiters im Magnetfeld

Die Richtung der Ablenkkraft hängt von der Stromrichtung im Leiter und von der Richtung des Magnetfeldes (Polfeld) ab. Polfeld (**Bild 2a**) und Leiterfeld (**Bild 2b**) ergeben zusammen ein gemeinsames, ein resultierendes Feld (**Bild 2c**).

Auf der einen Seite des Leiters verlaufen die Feldlinien des Leiterfeldes entgegen den Feldlinien des Polfeldes (**Bild 2c**). Die Flussdichte nimmt auf dieser Seite des Leiters ab. Auf der anderen Seite des Leiters haben die Feldlinien beider Felder gleiche Richtung. Hier wird das Feld dichter. Die Feldlinien werden dort „gestaut“. Sie stoßen sich gegenseitig ab und haben das Bestreben, sich zu verkürzen. Der Leiter wird daher von der Stelle größerer Flussdichte abgedrängt. Bei umgekehrter Stromrichtung im Leiter wird das gemeinsame Feld auf der anderen Seite des Leiters dichter, und die Bewegungsrichtung wechselt (**Bild 2d**). Kehrt man dagegen gleichzeitig Polfeld und Leiterfeld um, so bleibt die Bewegungsrichtung des Leiters unverändert (**Bild 2e**).

Ein stromdurchflossener Leiter wird im Magnetfeld abgelenkt. Die Richtung der Ablenkkraft hängt von der Richtung des Magnetfeldes (Polfeld) und von der Stromrichtung im Leiter (Leiterfeld) ab.



**Bild 2:** a) Polfeld      b) Leiterfeld      c) Resultierendes Feld      d) Umgekehrte Stromrichtung      e) Pole und Stromrichtung vertauscht

Die Bewegungsrichtung des Leiters kann man auch mithilfe der **Motorregel** (linke Hand) bestimmen (**Bild 1**).

Hält man die linke Hand so, dass die Feldlinien vom Nordpol her auf die Innenfläche der Hand auftreffen und die ausgestreckten Finger in Stromrichtung zeigen, dann zeigt der abgespreizte Daumen in Richtung der Ablenkkraft.

Die ablenkende Kraft rührt von den Kräften des Magnetfelds auf die im Leiter wandernden Ladungsträger her. Die Kraft auf die im Magnetfeld bewegten Ladungsträger nennt man **Lorentzkraft**<sup>1</sup>.

**Versuch 4:** Wiederholen Sie Versuch 1, **Seite 90**, und steigern Sie dabei nochmals langsam den Strom.

*Die Ablenkung des Leiters wird größer.*

Die Kraft auf den Leiter vergrößert sich mit dem Leiterstrom.

**Versuch 5:** Wiederholen Sie Versuch 2, **Seite 90**, und beobachten Sie die Ablenkung des Leiters. Überbrücken Sie die Schenkel des Hufeisenmagneten mit einem dünnen Eisenblech.

*Die Ablenkung des Leiters wird kleiner.*

Ein Teil der Feldlinien des Magneten schließt sich über das Eisenstück (magnetischer Nebenschluss). Die Flussdichte zwischen den Polen nimmt dadurch ab. Je kleiner die Flussdichte ist, desto kleiner ist auch die Ablenkkraft auf den Leiter.

Die Kraft auf den Leiter wächst mit der magnetischen Flussdichte.

**Versuch 6:** Wiederholen Sie Versuch 1, **Seite 90**, und beobachten Sie die Ablenkung des Leiters. Stellen Sie einen zweiten, gleichen Magneten mit gleicher Feldrichtung neben den ersten Magneten (**Bild 2**).

*Die Ablenkung des Leiters wird größer.*

Durch den zweiten Magneten wird die Breite des Polfeldes größer. Damit vergrößert sich die Leiterlänge im Polfeld, die sogenannte **wirksame Leiterlänge**.

Die Kraft auf den Leiter nimmt mit der wirksamen Leiterlänge zu.

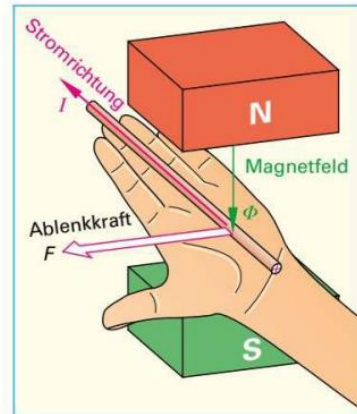
Befinden sich gleichzeitig mehrere Leiter im Magnetfeld, die alle vom gleichen Strom in gleicher Richtung durchflossen werden (z.B. Gleichstrommotor, **Seite 509**), so wird die Kraft umso größer, je größer die Anzahl dieser Leiter ist.

**Motorprinzip:** Stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld erzeugen Bewegung.

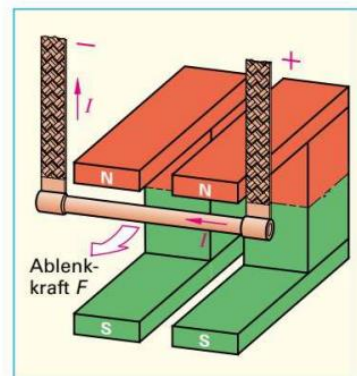
### Blasmagnete (Blaswirkung)

Beim Trennen von Schaltkontakten unter Spannung entsteht ein **Lichtbogen** (stromleitendes Plasma). Wirkt das Magnetfeld des Blasmagneten auf den Lichtbogen, so wird dieser durch Kraftwirkung schnell verlängert und reißt ab (Blaswirkung). Dadurch schützt man den Kontakt vor Abbrand. Blasmagnete verwendet man in Niederspannungs-Leistungsschaltern, z. B. in Gleichspannung-Schaltrelais.

<sup>1</sup> Hendrik A. Lorentz, niederländischer Physiker, 1853 bis 1928



**Bild 1: Motor-Regel (linke Hand)**



**Bild 2: Vergrößerung der wirksamen Leiterlänge**

### Ablenkkraft (Lorentzkraft)

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot z$$

$$[F] = \frac{Vs}{m^2} \cdot A \cdot m = \frac{Ws}{m} = \frac{Nm}{m} = N$$

F	Ablenkkraft
B	magnetische Flussdichte
I	Stromstärke
l	wirksame Leiterlänge
z	Leiterzahl

### Beispiel:

Ein Gleichstrommotor hat im Luftspalt eine magnetische Flussdichte von 0,8 T. Unter den Polen befinden sich insgesamt  $z = 400$  Ankerdrähte mit einem Strom  $I = 10$  A. Die wirksame Leiterlänge ist  $l = 150$  mm. Berechnen Sie die Kraft  $F$  am Umfang des Ankers.

### Lösung:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot z$$

$$F = 0,8 \frac{Vs}{m^2} \cdot 10 A \cdot 0,15 m \cdot 400$$

$$= 480 \frac{Vs \cdot A}{m} = 480 \frac{Ws}{m} = 480 N$$

### 5.5.2 Stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

**Versuch 1:** Spannen Sie eine Spule mit 2 Metallbändern (**Bild 1**) senkrecht zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten und schließen Sie die Spule über einen Strommesser an eine einstellbare Gleichspannungsquelle an.

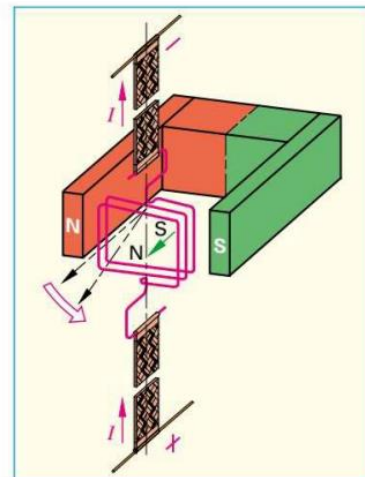
Die Spule dreht sich um 90°.

**Versuch 2:** Wiederholen Sie Versuch 1 mit entgegengesetzter Stromrichtung. Vertauschen Sie anschließend die Pole des Hufeisenmagneten.

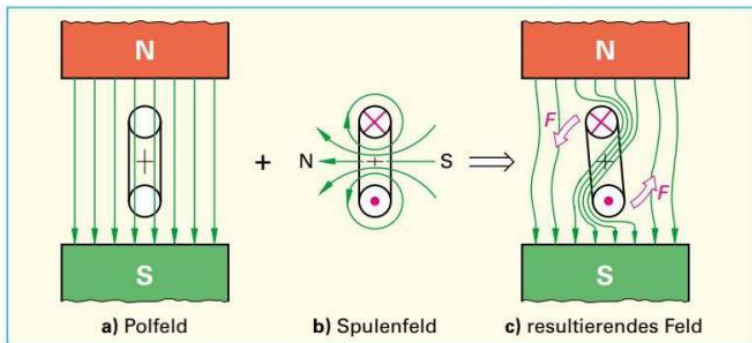
Die Drehrichtung der Spule kehrt sich in beiden Versuchen um.

Auf eine stromdurchflossene Spule im Magnetfeld wirkt eine drehende Kraft. Die Krafrichtung hängt von der Stromrichtung in der Spule und von der Richtung des Magnetfeldes ab.

Der Strom in den beiden Leitern einer Windung bildet ein Magnetfeld (Spulenfeld **Bild 2b**). Zusammen mit dem Polfeld des Dauermagneten (**Bild 2a**) ergibt sich ein gemeinsames (resultierendes) Feld (**Bild 2c**). Die beiden Leiter einer Windung werden abgelenkt. Bei mehreren Windungen vergrößert sich die Kraft entsprechend.



**Bild 1:** Drehung der stromdurchflossenen Spule im Magnetfeld



**Bild 2:** Stromdurchflossene Spule im Magnetfeld

#### **i** Stromwendung

Damit die Leiterschleife in waagerechter Lage nicht stehenbleibt, sondern eine fortlaufende Drehung entsteht, muss in diesem Zeitpunkt die Stromrichtung umgepolt werden. Ein Stromwender bewirkt, dass der Strom in den Leitern im Bereich eines bestimmten Poles immer dieselbe Richtung hat.

Stromwender: Seite 509

### 5.5.3 Stromdurchflossene parallele Leiter

**Versuch 3:** Befestigen Sie zwei Metallbänder (**Bild 3**) locker an isolierten Klemmen und schließen Sie diese über einen Stellwiderstand an eine Gleichspannungsquelle mit einem Ausgangsstrom von etwa 10 A an.

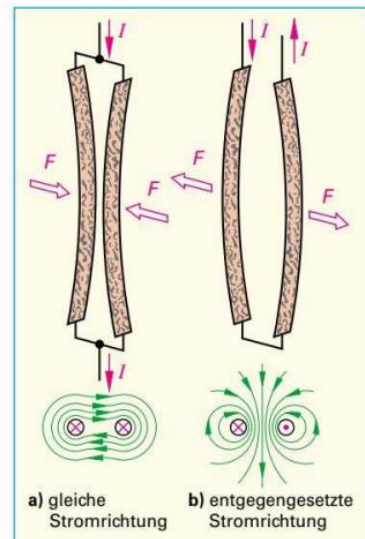
Bei gleicher Stromrichtung ziehen sich die Leiter an, bei entgegengesetzter Stromrichtung stoßen sie sich ab.

Fließt der Strom in beiden Leitern in gleicher Richtung, so umschlingt das gemeinsame Feld beide Leiter (**Bild 3a**). Zwischen den Leitern ist die magnetische Flussdichte geringer als außerhalb; die Feldlinien wollen sich verkürzen, und es entsteht eine Anziehungskraft.

Fließen die Ströme in entgegengesetzter Richtung, so verstärkt sich zwischen den Leitern das Magnetfeld, und es entsteht eine abstoßende Kraftwirkung (**Bild 3b**). Fließt Wechselstrom durch die Leiter, so wechselt ständig die Kraftwirkungsrichtung.

Gleiche Stromrichtung ⇒ Anziehung der Leiter  
 Entgegengesetzte Stromrichtung ⇒ Abstoßung der Leiter

Im Kurzschlussfall sind diese Kräfte sehr groß. Gefährdete Bauteile, z. B. Transformatorspulen oder Stromschienen, müssen durch besondere mechanische Befestigungen **kurzschlussfest** gemacht werden.



**Bild 3:** Kraftwirkungen zwischen stromdurchflossenen Leitern

## 13.2 Rotierende elektrische Maschinen

### 13.2.1 Grundlagen

#### 13.2.1.1 Leistung und Drehmoment

Motoren wandeln die aus dem Versorgungsnetz aufgenommene elektrische Energie in mechanische Arbeit um, Generatoren die mechanische Antriebsarbeit in elektrische Energie.

Die Leistungsabgabe  $P_2$  eines Motors wird durch die Messung von Drehmoment und Drehzahl ermittelt. Die aufgenommene Leistung  $P_1$  ist die dem Netz entnommene Wirkleistung.

In der Maschine entstehen dabei Verluste in Form von Wärme. Die durch Wirbelströme und Umagnetisierung im magnetischen Material verursachten Verluste nennt man **Eisenverluste**. Verluste, die der fließende Strom in den Wicklungswiderständen verursacht, werden als **Wicklungsverluste** bezeichnet. Ferner treten Lüfterverluste sowie Reibungsverluste in den Lagern und an Bürsten auf. Ein Maß für die Gesamtverluste (Bild 1) ist der **Wirkungsgrad**.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  gibt das Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Wirkleistung an.

Bei Motoren wird das Drehmoment  $M$  durch das Zusammenwirken von Ständermagnetfeld  $\Phi_E$  und Läuferstrom  $I_2$  gebildet (Seite 90). Der durch den Läuferstab fließende Strom erzeugt um sich ein Magnetfeld. Es entsteht am Läuferstab eine Kraft  $F$  (Bild 2a). Die Summe dieser Kräfte auf die einzelnen Läuferstäbe bewirkt das Drehmoment  $M$  (Motorprinzip).

Durch Messen der Kraft  $F$  am Umfang der Antriebsscheibe des Motors und der Drehzahl wird die abgegebene Leistung bestimmt (Bild 2b).

Moderne Verfahren der Drehmomentmessung benutzen frequenzumrichter-gesteuerte Servomaschinen (Seite 518) als Last. Sie sind über Schnittstellen mit dem PC verbunden (Bild 3). Diese Technik ermöglicht die Aufnahme der Motorkenngrößen wie Drehmoment, Drehzahl und Strom sowie die Untersuchung des Einschalt- und Lastverhaltens des Motors bei verschiedenartiger Last, z. B. Pumpen- oder Hubantrieb.

Bei Bemessungsleistung mit Bemessungsdrehzahl gibt ein Motor sein Bemessungsmoment ab.

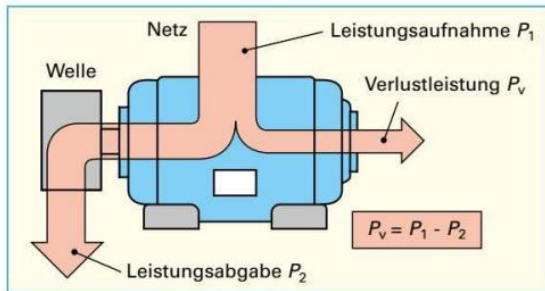


Bild 1: Einteilung der Betriebsarten

Wirkungsgrad	
$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	$\eta$ Wirkungsgrad
	$P_1^*$ Leistungsaufnahme
	$P_2^*$ Leistungsabgabe

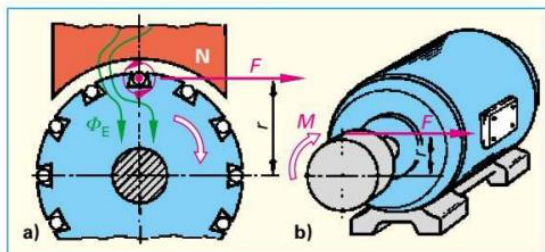


Bild 2: Entstehung der Drehmomente am Läuferstab und an der Antriebsscheibe des Motors

Drehmoment und Leistung		
$M = F \cdot r$	$P_2 = \omega \cdot M$	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$
$[M] = \text{Nm}$	$[P] = \text{W}$	$[\omega] = \text{s}^{-1}$
$M$ Drehmoment	$P_2$ Leistungsabgabe	
$F$ Kraft	$\omega$ Winkelgeschwindigkeit	
$r$ Radius	$n$ Drehzahl in $\text{s}^{-1}$	

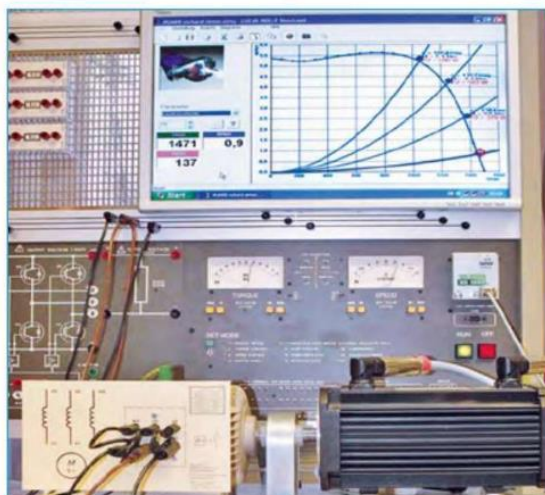


Bild 3: Computergestützter Motormessplatz mit Servomaschine 300 W als Last

\* Nach DIN EN 60027-4 auch:  $P_{in}$  für  $P_1$  und  $P_{out}$  für  $P_2$

### 13.2.1.2 Aufbau umlaufender Maschinen

Die elektrisch aktiven Teile (**Bild 1**) umlaufender elektrischer Maschinen sind der Ständer (Stator) und der Läufer (Rotor).

Der Ständer besteht aus dem Blechpaket, der Ständerwicklung, die entweder in Nuten am Ständerumfang eingelegt ist oder auf ausgeprägten Polen sitzt, und dem Gehäuse mit Klemmenkasten. An den Wicklungsanschlüssen am Klemmbrett erfolgt der Anschluss der Netzzuleitung (**Bild 1**).

Der Läufer besteht aus der Welle, den Lagern, dem Läuferblechpaket mit eingebrachten Wicklungen und dem Lüfter.

### 13.2.1.3 Leistungsschild

Die wichtigsten Kennwerte einer Maschine sind auf ihrem Leistungsschild angegeben (**Bild 2**). Dazu gehören die Angabe des Herstellers, die Maschinenart sowie die Bemessungswerte, z. B. von Spannung  $U_N$  und Strom  $I_N$  sowie der abgegebenen Leistung  $P_{2N}$  für die angegebene Betriebsart. Ist keine Betriebsart angegeben, ist die Maschine für Dauerbetrieb (S1, **Seite 483**) bemessen.

Die Bemessungsleistung  $P_{2N}$  eines Motors ist die an der Welle verfügbare mechanische Leistung bei Bemessungsdrehzahl  $n_N$ .

Weitere Angaben sind z. B. die Thermische Klasse Th. Cl.<sup>1</sup> (Wärmeklasse) und die Schutzart (**Seite 349**). Bei Drehstromasynchronmotoren ist die Wirkungsgradklasse IE<sup>2</sup> (**Seite 489**) anzugeben.

#### Beispiel:

Ermitteln Sie für den Motor mit dem Leistungsschild (**Bild 2**) a) Leistungsaufnahme  $P_1$  und b) Drehmoment  $M$  bei der Bemessungsleistung  $P_{2N}$  (50 Hz).

#### Lösung:

$P_2 = 5,5 \text{ kW}$  (Leistungsschildangabe)

a)  $P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 10,4 \text{ A} \cdot 0,85 = 6,12 \text{ kW}$

b)  $M = \frac{P_{2N}}{\omega} = \frac{P_{2N}}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{5500 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 1450 \cdot 1/60 \text{ s}} = 36,2 \text{ Nm}$

### 13.2.1.4 Drehsinn

Der Drehsinn ist die Drehrichtung einer Maschine mit Blick auf das Wellenende der Antriebsseite (**Bild 3**).

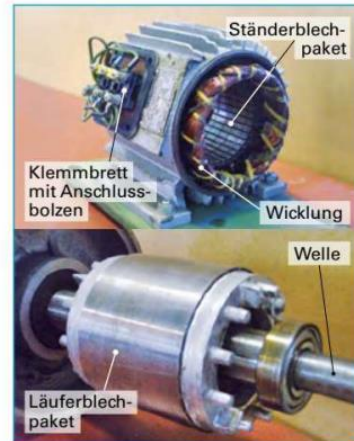
Drehrichtung im Uhrzeigersinn gilt als Rechtslauf, Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn als Linkslauf.

Bei zwei ausgeführten Wellenenden ermittelt man die Drehrichtung durch Betrachtung der Hauptwelle (D-Seite<sup>3</sup>). Hauptwelle ist die Welle mit dem dickeren Wellenende. Bei Wellen gleicher Dicke gilt als Hauptwelle die Welle, die sich gegenüber Lüfter, Kollektor oder Schleifringen (N-Seite<sup>4</sup>) befindet.

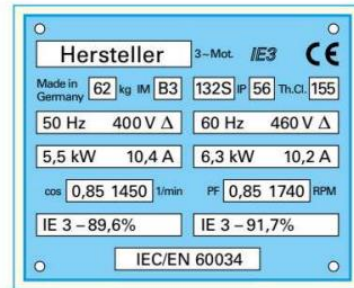
Die Drehrichtung eines Motors wird durch Schaltung seiner Wicklungen und dem Netzanschluss am Klemmbrett festgelegt.

Drehstrommotoren haben Rechtslauf, wenn die Außenleiter L1, L2 und L3 auf die Klemmen U1, V1 und W1 des Klemmbrettes geführt werden (Drehrichtungsumkehr von Drehstrommotoren: **Seite 494**).

<sup>1</sup> Th. Cl., Abk. für: Thermal Class (engl.) = Thermische Klasse  
<sup>2</sup> IE, Abk. für: International Efficiency (engl.) = Internationale Wirkungsgradklasse  
<sup>3</sup> drive end (engl.) = Antriebsseite  
<sup>4</sup> non-drive end (engl.) = Nichtantriebsseite

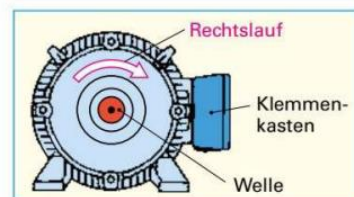


**Bild 1: Aufbau eines Drehstrommotors**



**Bild 2: Leistungsschild eines Drehstrommotors für 50 Hz und 60 Hz**

Leistungen bei Drehstrommotoren	
$P_1$	Leistungsaufnahme
$P_2$	Leistungsabgabe
$U$	Leiterspannung
$I$	Leiterstrom
$\cos \varphi$	Wirkfaktor
$\eta$	Wirkungsgrad



**Bild 3: Bestimmung der Drehrichtung mit Blick auf die Antriebsseite**

- Prüfen der Drehfeldrichtung: **Seite 375**
- Drehrichtung von Gleichstrommotoren: **Seite 512**

### 13.2.75 Arten von Gleichstrommotoren

Gleichstrommotoren unterscheiden sich durch die Schaltung der Erregerwicklung zum Anker (**Tabelle**). Hergestellt werden hauptsächlich fremderregte Motoren und Reihenschlussmotoren.

Tabelle: Arten von Gleichstrommotoren		
Fremderregter Motor	Nebenschlussmotor	Reihenschlussmotor
<p>oder: </p>		
<p><math>U</math> Klemmenspannung, <math>U_N</math> Bemessungsspannung, <math>U_e</math> Erregerspannung</p>		

#### Fremderregter Motor

Bei fremderregten Motoren werden Ankerstromkreis und Erregerwicklung aus unabhängigen Spannungsquellen versorgt (**Bild 1**). Bei Motorleistungen bis etwa 20 kW kann die Erregung auch durch Dauermagnete (**Permanenterregung**) erfolgen.

**Betriebsverhalten.** Die Stärke des Erregerfeldes  $\Phi_e$  ist bei Fremderregung konstant. Für das Drehmoment gilt folgender Zusammenhang:

$$M \sim \Phi_e \cdot I_A; \text{ mit } \Phi_e = \text{konstant} \text{ gilt: } M \sim I_A$$

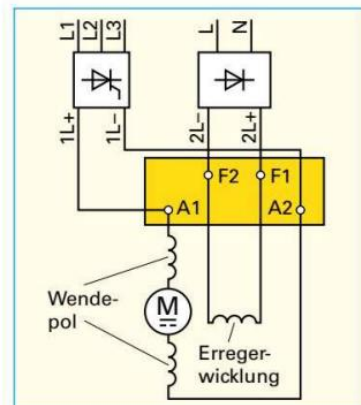
Das Drehmoment verhält sich proportional zum Ankerstrom. Bei Leerlauf (Betrieb ohne Belastung) nimmt der Motor nur einen sehr kleinen Strom auf. Mit zunehmender Belastung steigt der Ankerstrom linear an (**Bild 3, Seite 514**).

Bei Belastungszunahme verringert sich die Drehzahl (**Bild 2**) nur geringfügig (hartes Betriebsverhalten). Im gleichen Maße verkleinert sich die Ankergegenspannung (**Seite 509**). Wegen des kleinen Ankerwiderstandes steigt der Ankerstrom und bewirkt, dass das Motormoment das Widerstandsmoment deckt.

Der Betrieb an Wechselspannung erfolgt mit Stromrichtern (**Bild 1**). Ein gesteuerter Stromrichter, z. B. zur Versorgung des Ankerkreises, ermöglicht das Anlassen und eine Drehzahlsteuerung unterhalb der Bemessungsdrehzahl (**Ankersteuerung**). Durch Feldschwächung werden Drehzahlen erreicht, die größer als die Bemessungsdrehzahl sind (**Feldsteuerung** mittels gesteuerter Stromrichter).

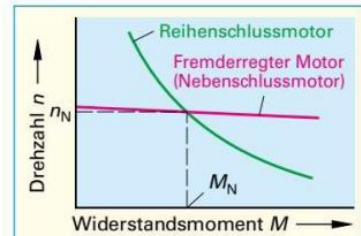
Bei fremderregten Motoren sinkt die Drehzahl bei Belastung nur geringfügig.

**Anwendungsbereiche.** Antriebe mit großem Drehzahlsteuerbereich, z. B. Werkzeugmaschinen oder Fräsmaschinen.



**Bild 1: Fremderregter Motor**

**i** Wird der Motor mit Bemessungsmoment unterhalb der Bemessungsdrehzahl betrieben, ist eine Fremdkühlung erforderlich.



**Bild 2: Drehzahlverhalten von Gleichstrommotoren**

### Nebenschlussmotor

Ankerkreis und Erregerwicklung sind parallel geschaltet (**Bild 1**). Aufbau und Betriebsverhalten entsprechen dem fremderregten Gleichstrommotor. Der Drehzahlrückgang bei Lastzunahme ist jedoch etwas größer, da das Erregerfeld von Laständerungen beeinflusst wird. Wegen der Zusammenschaltung der Wicklungen am Klemmbrett ist eine Stromversorgung über steuerbare Gleichrichter nicht sinnvoll. Ist das erwünscht werden fremderregte Motoren verwendet.

Bei Nebenschluss- oder fremderregten Motoren darf die Erregung allein nicht abschaltbar sein, sonst kann der Anker im schwachen Restmagnetfeld der Erregerpole unzulässig hohe Drehzahlen erreichen (Zerstörungsgefahr).

### Reihenschlussmotor

Bei Reihenschlussmotoren sind Anker- und Erregerwicklung in Reihe geschaltet (**Bild 2**). Der Ankerstrom ist zugleich Erregerstrom.

**Betriebsverhalten.** Bei Hochlauf und Belastung bewirkt die hohe Stromaufnahme ein starkes Ankerfeld und ein starkes Erregerfeld.

Daher ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Drehmoment  $M$  und Ankerstrom  $I_A$ :

$$M \sim \Phi_e \cdot I_A; \quad \Phi_e \sim I_e \text{ und mit } I_e = I_A \text{ gilt: } M \sim I_A^2$$

Das bedeutet, der Ankerstrom beeinflusst das Drehmoment quadratisch.

Ein Reihenschlussmotor entwickelt gegenüber anderen Gleichstrommotoren schon bei relativ kleinen Strömen sehr große Drehmomente (**Bild 3**).

Daher eignen sich Reihenschlussmotoren für Antriebsaufgaben, die hohe Anlaufmomente erfordern.

Sie werden vor allem für Elektrofahrzeuge verwendet, z. B. für Straßenbahnen, Elektrokarren und Gelstapler.

Mit zunehmender Belastung erhöht sich die Stromaufnahme und damit auch die Stärke des Erregerfeldes. Bei ansteigendem Widerstandsmoment fällt die Drehzahl stark ab (**Bild 2, Seite 513**). Bei abnehmender Last verringert sich die Stromaufnahme, die Drehzahl steigt. Das bei Leerlauf immer schwächer werdende Erregerfeld lässt die Drehzahl bis zur Motorzerstörung zunehmen.

Reihenschlussmotoren haben eine stark lastabhängige Drehzahl, sie gehen im Leerlauf durch und dürfen deshalb nicht über Riementriebe mit der Last verbunden werden.

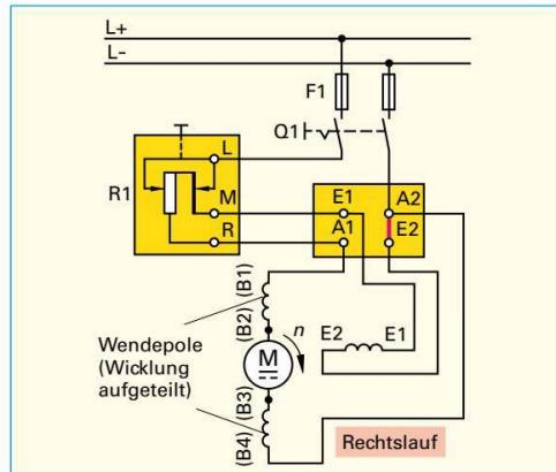


Bild 1: Nebenschlussmotor mit Anlasswiderstand

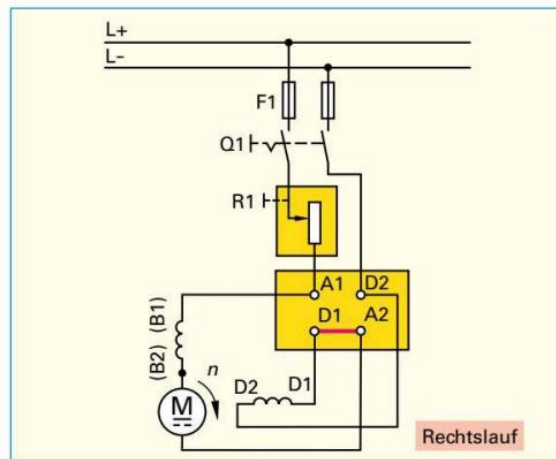


Bild 2: Reihenschlussmotor mit Anlasswiderstand

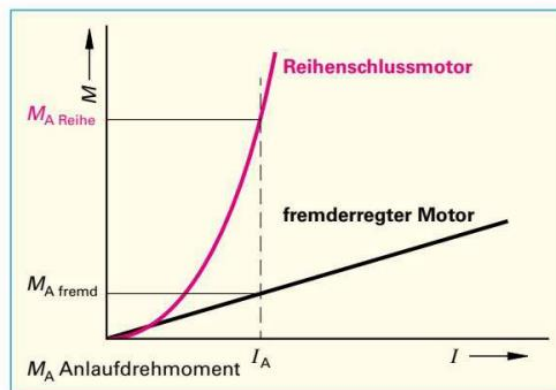


Bild 3: Drehmoment-Strom-Kennlinien



- [www.menzel-motors.com/de/gleichstrommotor](http://www.menzel-motors.com/de/gleichstrommotor)
- [www.faurndau.de/de/produkte/motoren/gleichstrom-motoren-efg-ef](http://www.faurndau.de/de/produkte/motoren/gleichstrom-motoren-efg-ef)
- [www.baumueller.com/de/produkte/motoren/hauptantriebe/gn](http://www.baumueller.com/de/produkte/motoren/hauptantriebe/gn)

### 13.2.78 Universalmotor

Der Aufbau entspricht dem des Reihenschlussmotors. Die Erregerwicklung ist symmetrisch zum Anker aufgeteilt (**Bild 1 und Bild 3**). Für Wechselstrombetrieb sind Läufer und Ständer geblecht, um Wirbelstromverluste gering zu halten (**Bild 2**).

Der Universalmotor kann an Gleichspannung oder an Wechselspannung betrieben werden.

**Wirkungsweise.** Tauscht man die Polarität des Anschlusses beim Reihenschlussmotor, so ändern Erregerfeld und Ankerstrom gleichzeitig ihre Richtung. Folglich wirkt das Drehmoment in gleicher Richtung weiter. Der Motor kann also auch an Wechselspannung betrieben werden. Der bei Wechselspannung wirksam werdende Blindwiderstand der Wicklung begrenzt jedoch den Strom stärker. Das Drehmoment wird herabgesetzt. Soll das Drehmoment für beide Spannungsarten gleich sein, wird die Windungszahl der Erregerwicklung für Wechselspannung entsprechend verkleinert (**Bild 3**).

Universalmotoren (**Bild 1**) werden überwiegend für den Betrieb an Wechselspannung hergestellt. Ständer und Läufer sind geblecht. Wegen der Kohlebürsten ist er nicht wartungsfrei.

**Betriebsverhalten.** Der Universalmotor verhält sich wie ein Gleichstrom-Reihenschlussmotor. Die Motordrehzahl ist frequenzunabhängig. Durch eine feste Verbindung mit einem Getriebe oder Lüfterrad besteht keine Durchgehgefahr.

Universalmotoren haben bei kleiner Baugröße eine große Leistung. Ihre Drehzahl ist stark lastabhängig, das Anlaufdrehmoment hoch.

**Drehzahlsteuerung (Bild 4).** Wie bei Gleichstrom-Reihenschlussmotoren ist die Drehzahl bei Universalmotoren von der Motorspannung abhängig. Zur Drehzahlsteuerung wird die Phasenanschnittsteuerung (**Seite 260**) angewendet.

**Anwendung.** Universalmotoren haben Leistungen von ca. 50 W bis etwa 2 kW. Sie werden z. B. für Elektrowerkzeuge, Haushalts- und Gartengeräte verwendet (Bohrmaschinen, Staubsauger und Waschmaschinen).

**Entstörmaßnahmen.** An den Bürsten entstehen hochfrequente Störimpulse. Die unterteilte Erregerwicklung (**Bild 3**) wirkt als Drosselspule und begrenzt die Funkstörung. Zusätzlich sind Entstörkondensatoren (**Seite 413**) erforderlich.

**Weitere Anwendungen.** Wechselstrom-Reihenschlussmotoren werden auch für große Leistungen mit Wendepol- und Kompensationswicklungen gebaut. Als Wechselstrom-Bahnmotoren haben sie Leistungen von mehreren hundert Kilowatt.

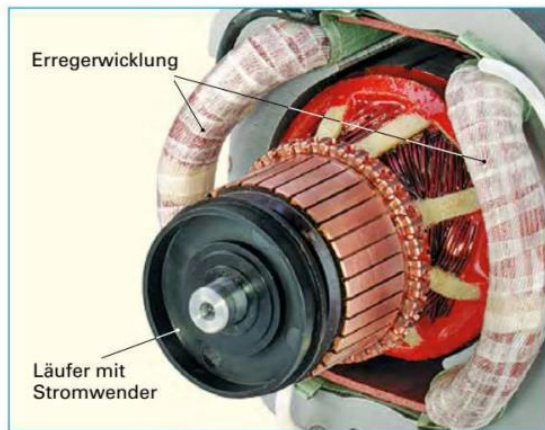


Bild 1: Universalmotor

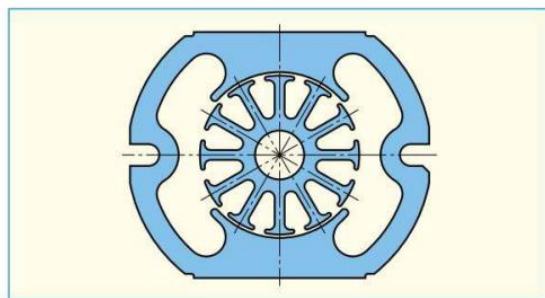


Bild 2: Ständer- und Läuferblechschnitt

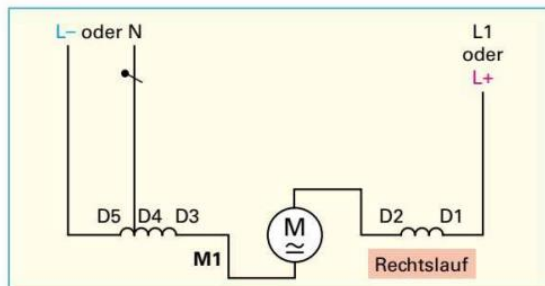


Bild 3: Schaltung der Wicklungen des Universalmotors

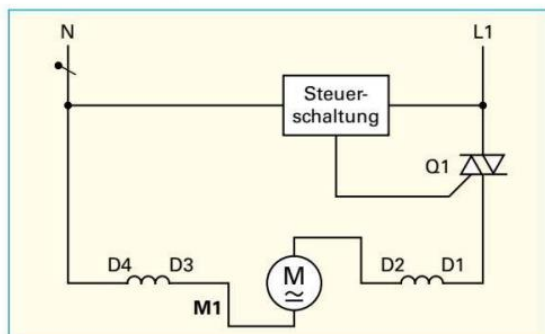


Bild 4: Drehzahlsteuerung eines Universalmotors