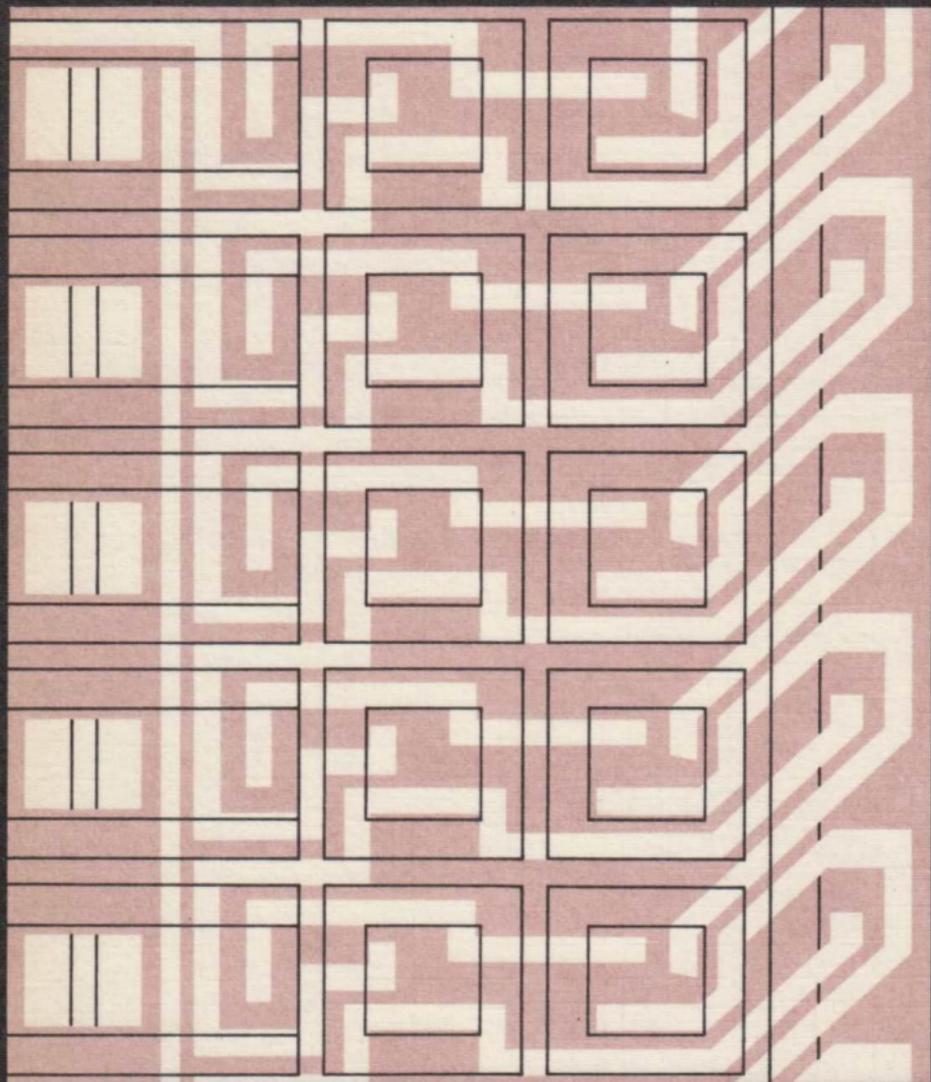


Elektronik



Elektronik



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1987

Autoren:

Dr. rer. nat. Rolf Burmeister

Franz Höppner

Gerhard Lott

Roland Müller

Redaktion:

Eberhard Zeuschner

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Lehrmaterial für den fakultativen Kurs „Elektronik“ in den Klassen 9 und 10 bestätigt.

Elektronik/[Autoren: Rolf Burmeister ...]

– 1. Aufl. – Berlin: Volk u. Wissen, 1987.

– 192 S.: Ill.

NE: Burmeister, Rolf [Mitarb.]

ISBN 3-06-061712-0

1. Auflage

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1987

Lizenz-Nr. 203 · 1000/87 (E 061712–1)

Printed in the German Democratic Republic

Schrift: 9/11 Maxima

Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden

Zeichnungen: Waltraud Schmidt

Einband: Manfred Behrendt

Typografische Gestaltung: Horst Albrecht

Redaktionsschluß: 27. Februar 1987

LSV 0681

Bestell-Nr. 709 185 1

00450

Inhalt

Zur Benutzung des Buches	6
1. Bauelemente und Grundschaltungen der Elektronik	7
1.1. Einführung in die Elektronik	7
1.1.1. Bedeutung und Entwicklung der Elektronik/Mikroelektronik	7
1.1.2. Baugruppen der Elektronik/Mikroelektronik	9
1.2. Passive elektrische und elektronische Bauelemente	10
1.2.1. Überblick	10
1.2.2. Messung elektrischer Größen	11
1.2.3. Grundstromkreis	13
1.2.4. Passive elektrische Bauelemente	17
1.2.5. Passive elektronische Bauelemente	23
1.3. Aktive Halbleiterbauelemente	31
1.3.1. Aufbau und Wirkungsweise des bipolaren Transistors	32
1.3.2. Kennlinien des Transistors	34
1.3.3. Transistor als Verstärker	37
1.3.4. RC-Verstärker	41
1.3.5. Transistor als Schalter	42
1.4. Grundlagen der Digitaltechnik	44
1.4.1. Einführung	44
1.4.2. Logische Verknüpfungen	46
1.4.3. Logische Verknüpfungen mit Transistoren	48
1.4.4. Logische Verknüpfungen mit integrierten Schaltkreisen	50
1.4.5. Anwendung von NAND-Gattern	53
2. Elektronik in der Meßtechnik	57
2.1. Einführung	57
2.1.1. Messen	57
2.1.2. Steuern und Regeln	58
2.2. Elektrische Meßwandler	59
2.2.1. Thermoelektrische Meßwandler	59
2.2.2. Optoelektronische Meßwandler	65
2.2.3. Überblick über weitere Meßwandler	68
2.3. Relais	69
2.3.1. Elektromechanisches Relais	69
2.3.2. Elektronische Relais	72
2.4. Elektronische Meßverstärker	82
2.4.1. Transistor als Meßverstärker	82

2.4.2.	Differenzverstärker	84
2.4.3.	Operationsverstärker als Meßverstärker	85
2.5.	Digitale Meßwertdarstellung	91
3.	Elektronik in der Nachrichtentechnik	94
3.1.	Signalverstärkung	94
3.1.1.	Signale und Signaldarstellung	94
3.1.2.	Signalwandlung und Signalspeicherung	95
3.1.3.	Verstärkertechnik	98
3.2.	Trägerfrequenzverfahren bei der drahtlosen Nachrichtenübermittlung	108
3.2.1.	Prinzip des Trägerfrequenzverfahrens	108
3.2.2.	Elektrischer Schwingkreis	110
3.2.3.	Erzeugung elektrischer Schwingungen mit elektronischen Schaltungen	111
3.2.4.	Modulation einer hochfrequenten Schwingung	113
3.3.	Empfangstechnik	115
3.3.1.	Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung	115
3.3.2.	Geradeusempfänger	116
3.3.3.	Überlagerungsempfänger	117
3.4.	Grundlagen der Fernsehtechnik	118
3.4.1.	Prinzip der Fernsehübertragung	118
3.4.2.	Grundaufbau eines Fernsehempfängers	120
3.5.	Optoelektronische Signalübertragung	122
3.5.1.	Prinzip der optoelektronischen Signalübertragung	122
3.5.2.	Lichtemitterdiode als Sender	124
3.5.3.	Fotowiderstand, Fotodiode und Fototransistor als Signalempfänger	126
3.5.4.	Überblick über optoelektronische Bauelemente	129
4.	Elektronik in der Digitaltechnik	130
4.1.	Einführung	130
4.1.1.	Elektronische Informationsverarbeitung	130
4.1.2.	Informationsverarbeitung mit dem Computer	130
4.2.	Kodierung, Dekodierung und Datenanzeige	132
4.2.1.	Binäres System	132
4.2.2.	Kodierung	133
4.2.3.	Dekodierung	135
4.2.4.	Datenanzeige	136
4.3.	Logische Verknüpfungsschaltungen	138
4.3.1.	Gatterfunktionen	139
4.3.2.	Elektronisches Rechnen mit Dualzahlen	141
4.3.3.	Praktische Schaltungen mit NAND-Gattern	144
4.4.	Bistabile Schaltungen	147
4.4.1.	RS-Flip-Flop	147
4.4.2.	D-Flip-Flop	150
4.4.3.	JK-MS-Flip-Flop	151
4.4.4.	Prellfreier Schalter	152
4.5.	Zähler und Speicher	154

4.5.1.	Zähler, Speicher, Register	154
4.5.2.	Anwendung von Zählerschaltungen	156
4.5.3.	Dekadischer Zähler mit Ziffernanzeige	158
5.	Anhang	163
5.1.	Hinweise zur Technologie der Leiterplattenherstellung	163
5.1.1.	Kopiervorlagen	163
5.1.2.	Fotomechanisches Negativverfahren	164
5.2.	Hinweise zur Montage elektronischer Bauelemente	166
5.3.	Hinweise zur Technologie des Weichlötens	167
5.4.	Schichtwiderstände	168
5.4.1.	Feste Schichtwiderstände	168
5.4.2.	Veränderbare Schichtwiderstände	172
5.5.	Kondensatoren	173
5.5.1.	Feste Kondensatoren	173
5.5.2.	Veränderbare Kondensatoren	175
5.6.	Kennzeichnung von Dioden und Transistoren	175
5.7.	Optoelektronische Bauelemente	177
5.7.1.	Lichtemitterdioden (LED)	177
5.7.2.	Infrarotemitterdioden (IRED)	178
5.7.3.	Lichtemitteranzeigen (LEA)	178
5.7.4.	Fotodioden und Fototransistoren	179
5.7.5.	Optoelektronische Koppler	179
5.8.	Kennzeichnung von integrierten Schaltkreisen	180
5.9.	SMD-Bauelemente	180
5.10.	Tafeln	181
	Tafel 1: Internationaler Farbkode	181
	Tafel 2: Stufungstabelle nach den internationalen E-Reihen	182
	Tafel 3: Zahlen-Buchstaben-Kode	183
	Tafel 4: Kennzeichnung von Kondensatoren	183
	Tafel 5: Miniatur-Elektrolyt-Kondensatoren	184
	Tafel 6: Grenzwerte ausgewählter Si-Halbleiterdioden	186
	Tafel 7: Grenzwerte ausgewählter Si-Transistoren	186
	Tafel 8: Bauformen und Anschlußbelegungen	187
	Tafel 9: Schaltzeichen der Elektronik (Auswahl)	189
Register		190

Zur Benutzung des Buches

Dieses Buch soll den Leser an ausgewählte Bauelemente, deren schaltungstechnisches Verhalten und Zusammenwirken in elektronischen Schaltungen heranzuführen.

Zur Erarbeitung der notwendigen Kenntnisse sind in den Text Experimente eingeordnet. Die Experimente sind so konzipiert, daß theoretische Erkenntnisse experimentell gewonnen bzw. bestätigt werden. Die Schaltungen dazu beziehen sich auf das in Vorbereitung befindliche Schülerexperimentiergerät (SEG) Elektronik/Mikroelektronik, Grundstufe A. Sie können aber auch mit anderen Bauelementen bzw. Bausteinen realisiert werden, wenn eine entsprechende Dimension erfolgt.

Durch die ständige Weiterentwicklung der elektronischen Bauelemente können in den Experimentierschaltungen des Schülerexperimentiergerätes Veränderungen auftreten. Deshalb sollten die Schaltungen mit den Anleitungen zum SEG verglichen werden.

Die im Buch enthaltenen Aufgaben dienen zur Überprüfung und Vertiefung der eigenen Kenntnisse.

Bauelementbezeichnungen stehen in gerader Schrift (z. B. R1) und physikalische Größen in schräger Schrift (z. B. R_1).

Symbole und Abkürzungen

▼ – Experiment

● – Aufgabe

■ – Beispiel

[1] – Hinweis auf Literatur

LB – Lehrbuch

Ph i Üb – Physik in Übersichten

1. Bauelemente und Grundschaltungen der Elektronik

1.1. Einführung in die Elektronik

1.1.1. Bedeutung und Entwicklung der Elektronik/Mikroelektronik

Die gegenwärtige Entwicklung der sozialistischen Volkswirtschaft und aller gesellschaftlichen Bereiche ist durch die verstärkte Anwendung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts gekennzeichnet. Dabei werden Schlüsseltechnologien zu einem wesentlichen Produktivitätsfaktor. Die umfangreichen Aufgaben bei der Intensivierung und Reproduktion der Volkswirtschaft sind ohne den Einsatz elektronischer und mikroelektronischer Mittel nicht lösbar. Die immer komplizierter werdenden gesellschaftlichen, technischen und ökonomischen Prozesse erfordern zunehmend die Informationsverarbeitung am Arbeitsplatz. Insbesondere bei der rechnergestützten Entwicklung (CAD, englisch: computer aided design) und rechnergestützten Produktion (CAM, englisch: computer aided manufacturing), der Rationalisierung von Maschinen und Anlagen, der Anwendung der Robotertechnik und der Erhöhung des Gebrauchswertes moderner Konsumgüter werden mikroelektronische Bauelemente und Geräte in großem Umfang eingesetzt.

Die Mikroelektronik trägt entscheidend bei zur Steigerung der Arbeitsproduktivität sowie zur Verbesserung des Material- und Energieeinsatzes und des Preis-Leistungs-Verhältnisses. Damit wird die Mikroelektronik als Schlüsseltechnologie zu einem Kernstück der wissenschaftlich-technischen Revolution. Sie ist mit allen Schwerpunkten der ökonomischen Strategie der SED bis zum Jahr 2000 verbunden.

In diesem Zusammenhang sind Jugendkollektiven in den Betrieben im Rahmen von Jugendobjekten bedeutsame Aufgaben übergeben worden, die sie erfolgreich lösen. Die Beschäftigung mit der Mikroelektronik und ihrer Anwendung ist – besonders für die Jugend – eine wichtige gesellschaftliche Aufgabe, um eine effektive Nutzung in allen Bereichen zu gewährleisten.

Einen Überblick über die große Anwendungsbreite der Elektronik/Mikroelektronik gibt die Übersicht 1.1.

Moderne elektronische Geräte und Anlagen sind mit integrierten Schaltkreisen aufgebaut. In ihnen laufen komplizierte Prozesse ab, die man nur mit umfangreichen Spezialkenntnissen verstehen kann. Für den Einsatz und die Bedienung solcher Geräte und Anlagen sind jedoch grundlegende Kenntnisse über Bauelemente, Baugruppen und Grundschaltungen von Bedeutung.

Die Mikroelektronik hat sich aus den wachsenden gesellschaftlichen und technischen Bedürfnissen heraus innerhalb weniger Jahrzehnte zu einem wissenschaftlich-technischen Höchststand entwickelt. Im folgenden sind ausgewählte Daten zur bisherigen Entwicklung der Elektronik/Mikroelektronik aufgeführt.

Übersicht 1.1 Ausgewählte Anwendungsgebiete der Elektronik/Mikroelektronik und Einsatzbeispiele

Anwendungsgebiet	Beispiele
Nachrichtentechnik	Rundfunk, Fernsehen, Telefon, Fernschreiber, Bildtelegrafie, Nachrichtensatelliten
Rechentchnik	Elektronische Datenverarbeitungsanlagen, Taschenrechner, Tischrechner
Produktion	Prozeßsteuerung mit Rechnern, numerische Steuerung von Maschinen, Industrieroboter, CAD/CAM-Arbeitsplätze, Meß- und Prüftechnik, Werkstoffprüfung
Verkehrs- und Raumfahrt-technik	Radarnavigation und Autopilotanlagen, Flugsicherung, Raketensteuerung
Büro- und Drucktechnik	Bürocomputer, elektronische Schreibmaschinen, optoelektronische Setz- und Druckmaschinen
Medizintechnik	Elektrokardiografie, Computerdiagnose, Kurzwellen- und Ultraschalltherapie, Intensivtherapie, Herzschrittmacher, Röntgentechnik
Kraftfahrzeugtechnik	Kfz-Diagnose, Kraftstoffdosierung- und zündung
Haushalts- und Klimatechnik	Automatische Waschmaschinen, Heizungssteuerung, Klima- und Kühlanlagen, Küchenmaschinen
Optik und Bildauswertung	Elektronische Kameras, Multispektralkameras, Infrarot-technik, automatische Luftbildauswertung
Militärtechnik	Moderne Waffen und Waffensysteme mit zunehmendem Automatisierungsgrad im Rahmen der sozialistischen Landesverteidigung

- 1948: J. BARDEEN und W. H. BRATTAIN (USA) entdecken den Transistoreffekt bei Untersuchungen an Halbleiteroberflächen
- 1949: W. SHOCKLEY (USA) entwickelt ein theoretisches Modell zur Wirkungsweise eines Flächentransistors
- 1952: serienmäßige Herstellung von Flächentransistoren, erste Transistorverstärker und Transistorradios
- 1953: erste Farbfernsehübertragung in den USA (ab 1967 in Europa, ab 1969 in der DDR)
- 1955: M. G. BASAROW und A. M. PROCHOROW (UdSSR) schaffen die theoretischen Grundlagen der Lasertechnik (Lichtverstärker) und damit die Grundlage der modernen Optoelektronik
- 1957: SPUTNIK I (UdSSR), erster künstlicher Raumflugkörper
- 1957: erste Digitalrechner mit Transistoren

- 1959: LUNIK II (UdSSR), erste Mondsonde
- 1962: erste integrierte Schaltkreise (10 bis 12 Transistorfunktionen je Chip)
- 1964: Oberflächen-Feldeffekttransistor produktionsreif entwickelt (MOSFET, später Grundlage für hochintegrierte Schaltkreise)
- 1965: Farbfernsehübertragung UdSSR–Frankreich über Nachrichtensatellit
- 1971: erster Mikroprozessor produktionsreif entwickelt – Beginn der Entwicklung von Mikrorechnern
- 1973: erste Taschenrechner auf dem Markt.

Die am Anfang stehenden diskreten elektronischen Bauelemente (Einzelbauelemente) wurden zunehmend durch integrierte Schaltungen abgelöst. Damit wurde der Übergang zur Mikroelektronik vollzogen. Integrierte Schaltkreise lassen sich trotz des komplizierten technologischen Prozesses wesentlich wirtschaftlicher herstellen als herkömmliche Schaltungen mit einer Vielzahl von diskreten Bauelementen. Sie sind kleiner, energiesparender und arbeiten weitaus zuverlässiger, da die vielen Lötstellen wegfallen. So enthält ein Schaltkreis, mit dem ein moderner Taschenrechner ausgestattet ist, etwa 10000 bis 12000 Transistorfunktionen auf einem Halbleiterchip von etwa 5 mm Seitenlänge. Moderne Mikrorechnerschaltkreise enthalten bis zu 100000 Transistorfunktionen.

Entscheidend in der Entwicklung der Mikroelektronik war der Einsatz von Mikroprozessoren und zugehöriger Speicherschaltkreise. Ein Mikroprozessor ist ein universell einsetzbares Funktionselement, das für unterschiedliche Informationsverarbeitungsprozesse programmiert werden kann und somit für viele Aufgaben einsetzbar ist. Mit ihm können heute leistungsfähige Mikrorechner im Kleinformat aufgebaut werden. Triebkraft für das schnelle Voranschreiten der Mikroelektronik in unserer Zeit sind Rechentchnik und Raumfahrt, weil hier die höchsten Anforderungen an Betriebszuverlässigkeit sowie geringsten Material- und Energieeinsatz gestellt werden.

1.1.2. Baugruppen der Elektronik/Mikroelektronik

Die Unterscheidung zwischen Elektronik und Mikroelektronik wird aus technischer Sicht im allgemeinen nach dem Integrationsgrad (Anzahl der Bauelemente bzw. Funktionen je Chip) und der Miniaturisierung der elektronischen Schaltungen vorgenommen.

Aus diskreten Bauelementen und integrierten Schaltkreisen werden nach Grundschalungen Baugruppen hergestellt. Diese Baugruppen lösen innerhalb eines Prozesses bestimmte Teilaufgaben. In der Übersicht 1.2 sind Beispiele für Baugruppen dargestellt.

Übersicht 1.2 Beispiele für Baugruppen der Elektronik/Mikroelektronik

Baugruppe	Aufgabe	Beispiel
Meßfühler (Sensor)	Wandlung einer (allgemein nichtelektrischen) Meßgröße in eine für die Anzeige oder Weiterverarbeitung günstige Größe (z. B. Stromstärke)	Fotowiderstand
Verstärker	Verstärkung von Spannung, Stromstärke oder Leistung	Niederfrequenzverstärker

Baugruppe	Aufgabe	Beispiel
Regler	Vergleichen der Werte von Eingangsgrößen mit Werten von vorgegebenen Führungsgrößen und Steuerung von Ausgangsgrößen abhängig vom Vergleich	Temperaturregelung
Speicher	Speicherung von Informationen (Daten, Signale)	Integrierter Speicherschaltkreis
Zähler	Addieren oder Subtrahieren von Impulsfolgen	Integrierter Zehlschaltkreis
Anzeige	Darstellung von Informationen in einer für den Menschen lesbaren Form	Flüssigkristallanzeige (LCD)

Eine vollständige elektronische Anlage setzt sich aus mehreren Baugruppen zusammen. Entsprechend der Aufgabe arbeiten dabei sowohl Baugruppen verschiedener Art, als auch mehrere Baugruppen gleicher Art zusammen.

1.2. Passive elektrische und elektronische Bauelemente

1.2.1. Überblick

Elektronische Schaltungen setzen sich aus elektrischen und elektronischen Bauelementen zusammen. Elektronische Bauelemente sind solche, in denen der elektrische Stromfluß durch äußere Einflüsse (Wärme, Licht, elektrische und magnetische Felder) steuerbar ist. In elektrischen Bauelementen läßt sich der Stromfluß hingegen nicht steuern, sondern im allgemeinen nur schalten oder begrenzen.

Nach einem weiteren Einteilungsprinzip unterscheidet man aktive und passive Bauelemente. In aktiven Bauelementen wird elektrische Energie erzeugt oder diese unter Zufuhr einer Versorgungsenergie verstärkt (z. B. Verstärker). In passiven Bauelementen hingegen kommt es zu einem Verlust an elektrischer Energie, da diese in andere Energiearten umgewandelt wird. Dieser Vorgang wird entweder gezielt genutzt (z. B. Wärme, Licht), oder er tritt als Nebeneffekt auf.

Bauelemente oder Baugruppen mit zwei Anschlüssen sind Zweipole, mit vier Anschlüssen Vierpole usw. Schaltet man einen aktiven und einen passiven Zweipol zusammen, so erhält man einen Grundstromkreis. Der Grundstromkreis ist die elementare Schaltung. Mit dem Modell des Grundstromkreises als Hilfsvorstellung kann man Vorgänge in elektronischen Schaltungen verstehen und auch mathematisch formulieren.

In nachfolgenden Abschnitten werden die Eigenschaften passiver Bauelemente durch Messungen von Stromstärke und Spannung untersucht und ihr Verhalten im Grundstromkreis dargestellt.

1.2.2. Messung elektrischer Größen

Beim Bau und beim Betrieb elektronischer Geräte und Anlagen müssen physikalische Größen wie Spannung und Stromstärke bestimmte Werte besitzen. Es ist deshalb notwendig, diese Größen zu messen, um sie auf vorgegebene Werte einzustellen oder gezielt zu verändern.

Ein häufig verwendetes Meßgerät ist der Vielfachmesser. Er besteht aus einem Drehspulmeßwerk und Widerständen zur Meßbereichserweiterung, die bei Spannungsmessungen in Reihe, bei Strommessungen parallel zum Meßwerk geschaltet werden (siehe Ph i Üb, S. 123, LB ESP Kl. 9, S. 60ff.). Durch Messung von Spannung und Stromstärke

kann der elektrische Widerstand eines Bauelements nach $R = \frac{U}{I}$ bestimmt werden.

- ▼ Bauen Sie zur Messung von Spannung und Stromstärke die Schaltungen nach Bild 1.3 auf! Führen Sie die Messungen exakt durch und protokollieren Sie die Meßwerte! Berechnen Sie den elektrischen Widerstand!

Warum erhalten Sie für beide Schaltungen unterschiedliche Meßwerte?

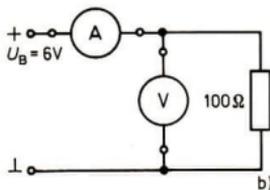
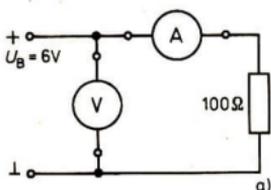


Bild 1.3
Schaltungen für die gleichzeitige Messung von Spannung und Stromstärke an einem Bauelement

Nach Bild 1.3a wird die Stromstärke richtig gemessen. Der Meßwert für die Spannung ist aber zu hoch, denn er setzt sich aus dem Spannungsabfall am Widerstand *und* dem am Strommesser zusammen. Damit wird der Widerstandswert zu groß bestimmt.

Man müßte also die Spannung messen, die direkt am Widerstand anliegt (Bild 1.3b). Dann wird zwar die Spannung richtig gemessen, aber die Stromstärke ist zu hoch. Das liegt daran, daß der durch den Spannungsmesser fließende Strom mitgemessen wird. Der so bestimmte Widerstandswert ist zu klein.

Bei der Messung gibt es demnach ein Problem: Die Meßgeräte selbst stellen elektrische Widerstände dar und verändern damit das Verhalten der Schaltung, sobald sie angeschlossen sind. Die Messungen werden durch den Innenwiderstand R_i des Meßgerätes „verfälscht“. Solche gerätebedingten Meßfehler bezeichnet man als systematische Fehler. Vom Beobachter hingegen verursachte Fehler (z. B. Ablesefehler) sind zufällige Fehler.

Die beschriebenen systematischen Fehler können eingeschränkt werden. Ist der zu erwartende Widerstandswert groß, so benutzt man die Meßschaltung nach Bild 1.3a. Ist er klein, wird die Meßschaltung nach Bild 1.3b angewendet.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung von Meßfehlern die Schaltung nach Bild 1.4a auf und messen Sie nacheinander mit einem Schülermeßgerät (Polytest) die Spannungen E , U_1 und U_2 ! Kontrollieren Sie, ob die Bedingung $E = U_1 + U_2$ erfüllt ist, und begründen Sie das Ergebnis anhand der Ersatzschaltung nach Bild 1.4b!

Wiederholen Sie das Experiment mit $R_1 = R_2 = 100 \Omega$ und vergleichen Sie beide Meßreihen! Halten Sie das Ergebnis in einem Meßprotokoll fest! Welche Schlußfolgerungen für die Einschränkung des systematischen Meßfehlers ziehen Sie daraus?

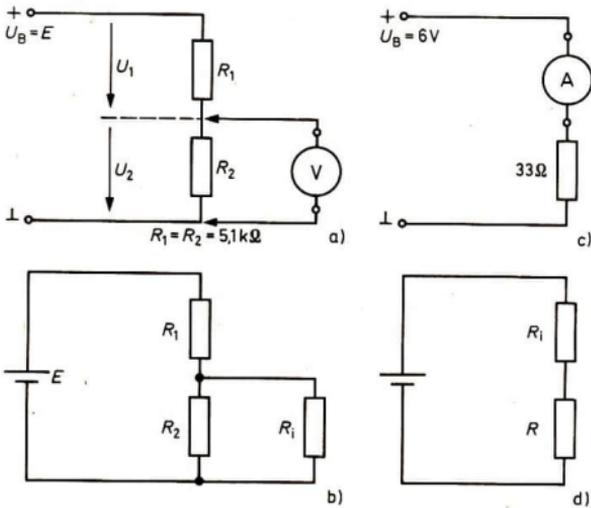


Bild 1.4
Schaltungen und Ersatzschaltbilder zum Innenwiderstand von Spannungsmesser und Strommesser

- ▼ Untersuchen Sie den Meßfehler einer Strommessung nach Bild 1.4c! Welche Veränderung der Stromstärke stellen Sie fest, wenn Sie zunächst eines und danach noch ein zweites Meßgerät dazu in Reihe schalten? Erklären Sie das Ergebnis mit der Ersatzschaltung nach Bild 1.4d!

Die festgestellten systematischen Meßfehler haben ihre Ursache in einem zu kleinen Innenwiderstand des Spannungsmessers bzw. in einem zu großen Innenwiderstand des Strommessers. Genauere Meßergebnisse erhält man mit Meßgeräten, die einen Meßverstärker enthalten. Zu diesen Meßgeräten zählt auch der Oszillograf.

- ▼ Führen Sie zum Vergleich Spannungsmessungen mit dem Oszillografen nach Bild 1.5 durch! Welche Vorteile hat dieses Meßverfahren?

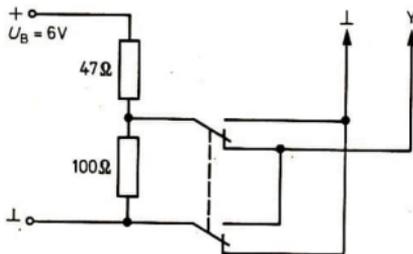


Bild 1.5
Oszillografische Spannungsmessung

Der Meßbereich eines Spannungsmessers kann durch einen Vorwiderstand R_V , der eines Strommessers durch einen Nebenwiderstand R_N erweitert werden (Bild 1.6).

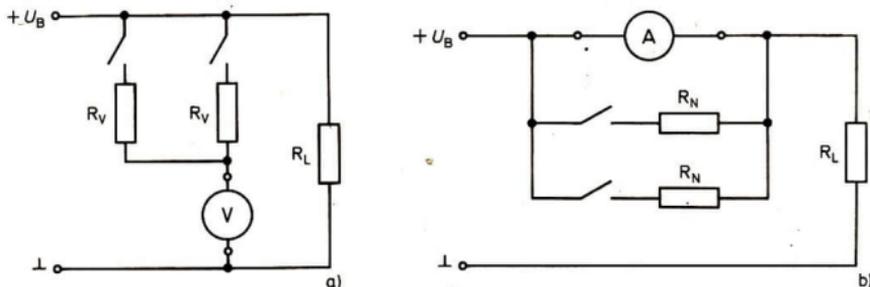


Bild 1.6
Meßbereichserweiterung eines Spannungsmessers und eines Strommessers

Der Innenwiderstand eines Spannungsmessers wird in Ω/V angegeben. Bei einer Angabe von $10 \text{ k}\Omega/V$ und einem Meßbereich von 10 V ist $R_V = 100 \text{ k}\Omega$. Der Innenwiderstand wird um so höher, je größer der eingeschaltete Spannungsmessbereich ist. Der Innenwiderstand eines Strommessers hingegen wird um so kleiner, je größer der eingeschaltete Stromstärkemeßbereich ist.

1.2.3. Grundstromkreis

Der elektrische Grundstromkreis besteht aus einer Zusammenschaltung eines aktiven und eines passiven Zweipols. Dabei wird elektrische Energie übertragen (Bild 1.7). Charakteristische Größen des aktiven Zweipols sind die Leerlaufspannung U_L und die Kurzschlußstromstärke I_k .

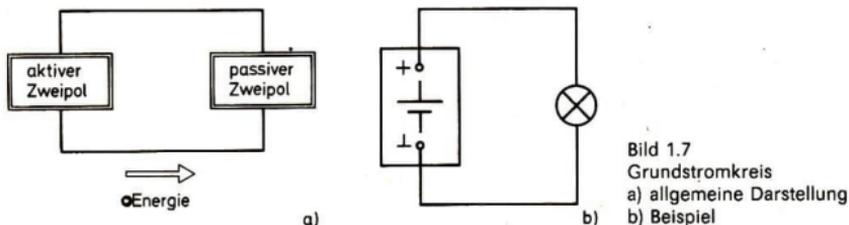


Bild 1.7
Grundstromkreis
a) allgemeine Darstellung
b) Beispiel

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Verhaltens eines aktiven Zweipols im Grundstromkreis die Experimentierschaltung nach Bild 1.8a auf! Messen Sie die Leerlaufspannung einer gebrauchten Flachbatterie!

Messen Sie nach Bild 1.8b die Kurzschlußstromstärke, indem Sie den Taster kurzzeitig schließen (Vorsicht, beim größten Strommeßbereich beginnen)!

Messen Sie Stromstärke und Spannung nach Bild 1.8c (Schleifer nicht auf den kleinsten Widerstandswert einstellen)!

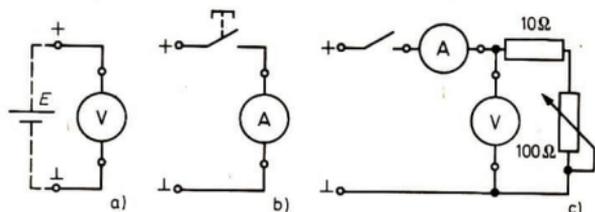


Bild 1.8
Experimentierschaltungen zur Bestimmung
a) der Leerlaufspannung,
b) der Kurzschlußstromstärke und
c) des Innenwiderstandes einer Spannungsquelle

Bei der Untersuchung der Spannungsquelle stellt man fest, daß die Spannung an den Anschlußklemmen mit wachsender Stromstärke geringer wird.

Diese Erscheinung hat ihre Ursachen in der bisher nicht beachteten Eigenschaft jeder Spannungsquelle, dem Strom einen elektrischen Widerstand entgegenzusetzen. Dieser Widerstand wird als Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle bezeichnet (Bild 1.9).

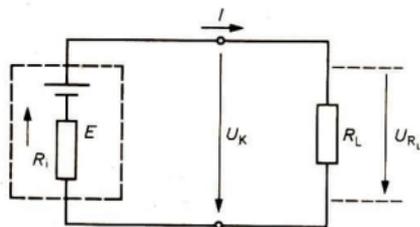


Bild 1.9
Grundstromkreis

Durch ihn enthält ein einfacher Stromkreis bereits zwei in Reihe geschaltete Widerstände R_i und R_L . Fließt durch einen Widerstand R_L ein Strom I , so tritt an den Anschlüssen des Widerstandes eine Spannung $U_{R_L} = I \cdot R_L$ auf. Diese Spannung heißt Spannungsabfall.

Die Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand R_i ist als aktiver Zweipol, der Lastwiderstand R_L als passiver Zweipol aufzufassen. Die Spannung E bezeichnet man als Urspannung (identisch mit der Leerlaufspannung), den Spannungsabfall über dem Lastwiderstand R_L als Klemmenspannung U_K . Die Urspannung wird durch Richtungspfeil von $-$ nach $+$ festgelegt, die Stromstärke im äußeren Kreis von $+$ nach $-$, die Klemmenspannung ebenfalls entsprechend der Stromrichtung.

Die Abnahme der Klemmenspannung einer Spannungsquelle bei Belastung ist auf den zusätzlichen Spannungsabfall am Innenwiderstand zurückzuführen. Mathematisch kann man das durch die Beziehungen

$$U = E - I \cdot R_i \quad \text{und} \quad U = \frac{E \cdot R_L}{R_L + R_i}$$

ausdrücken.

- Berechnen Sie den Innenwiderstand der Spannungsquelle mit den Meßwerten aus dem Experiment nach Bild 1.8!

In der Schaltung nach Bild 1.10 wird der Innenwiderstand R_i durch einen festen Widerstand und der äußere Belastungswiderstand R_a durch einen Einstellwiderstand gebildet.

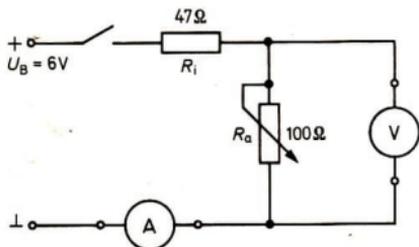


Bild 1.10
Experimentierschaltung zur Anpassung

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung nach Bild 1.10 auf! Verstellen Sie zur Untersuchung des elektrischen Verhaltens dieser Schaltung den Schleifer des Einstellwiderstandes von $R_a = 0 \Omega$ beginnend schrittweise um jeweils 10Ω ! Ermitteln Sie die zugehörigen Wertepaare für Spannung und Stromstärke! Bestimmen Sie nach $P = U \cdot I$ die für die jeweiligen Widerstandswerte aus der Spannungsquelle entnommene Leistung! Welche Schlußfolgerung ziehen Sie aus dem Ergebnis?

Von besonderem Interesse sind drei Werte von R_a :

1. $R_a \rightarrow \infty$ (Leerlauf der Spannungsquelle)

Die Stromstärke ist Null, damit ist der Spannungsabfall am Innenwiderstand ebenfalls Null, und die Klemmenspannung ist gleich der Ursprungung der Spannungsquelle.

2. $R_a \rightarrow 0$ (Kurzschluß der Spannungsquelle)

Die Klemmenspannung ist Null, und für die Stromstärke gilt $I = \frac{E}{R_i}$.

Bei Spannungsquellen mit kleinem Innenwiderstand wird die Stromstärke sehr groß.

3. $R_a = R_i$ (Leistungsanpassung)

Für die Klemmenspannung gilt $U_K = \frac{E}{2}$.

In diesem Falle wird die größte elektrische Leistung übertragen, nämlich $P = U \cdot I = (\frac{1}{2} E) \cdot I_K$.

Der *Anpassungsfall* ist in der Elektronik von besonderer Bedeutung, z. B. bei der Anpassung eines Lautsprechers an einen Verstärkerausgang (siehe Abschnitt 3.1.3.).

Zur Beschreibung der Vorgänge in einem Stromkreis kann man die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung $I = f(U)$ für jeden Zweipol untersuchen.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung dieser Abhängigkeit eine Experimentierschaltung nach Bild 1.11 auf! Erhöhen Sie die Spannung von $U = 0 \text{ V}$ an in gleichen Schritten und messen Sie dabei die Stromstärke! Schreiben Sie die Meßergebnisse in einer Tabelle auf und zeichnen Sie danach die Kennlinie $I = f(U)$! Verwenden Sie unterschiedliche Bauelemente (Widerstand $1 \text{ k}\Omega$, Glühlampe, Thermistor)!

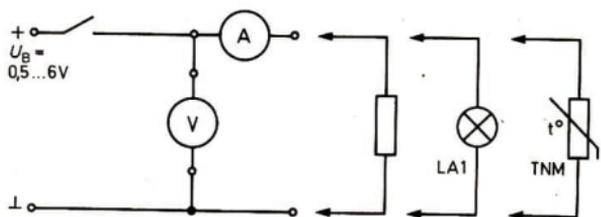


Bild 1.11
Experimentierschaltung zur
Kennlinienaufnahme passiver
Zweipole

Die Kennlinie $I = f(U)$ ist die Strom-Spannungs-Kennlinie des Bauelements. Hat diese Kennlinie einen geraden Verlauf, so handelt es sich um einen *linearen* Zweipol, bei gekrümmtem Verlauf um einen *nichtlinearen* Zweipol. Glühlampe und Thermistor sind nichtlineare Zweipole.

- Auf welche physikalischen Vorgänge ist die Nichtlinearität der Kennlinien von Glühlampe und Thermistor zurückzuführen?

Aus dem Experiment nach Bild 1.8 ergibt sich, daß ein aktiver Zweipol eine fallende Kennlinie besitzt. Mit steigender Stromstärke (Belastung) verringert sich die Spannung. Für den passiven Zweipol ergibt sich aus dem Experiment nach Bild 1.11 eine steigende Kennlinie.

Entsprechend der Zusammenschaltung von aktivem und passivem Zweipol zum Grundstromkreis bilden beide Kennlinien, in einem Diagramm dargestellt, einen Schnittpunkt (Bild 1.12). Dieser Schnittpunkt ist der Arbeitspunkt des Grundstromkreises. Die Koordinatenwerte des Arbeitspunktes geben die Spannung U_A und die Stromstärke I_A an, die sich beim Zusammenschalten beider Zweipole einstellt.

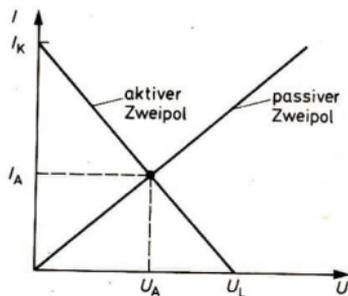
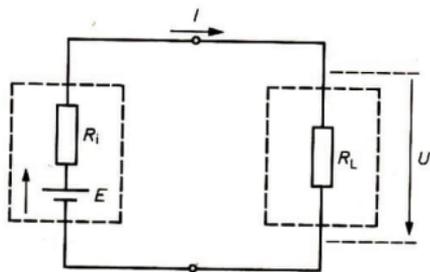


Bild 1.12 Kennlinien- und Arbeitspunktdarstellung

Die Methode der Kennlinien- und Arbeitspunktdarstellung ist in der Elektronik einer der wichtigsten Wege zur Schaltungsberechnung und zu Funktionsdarstellungen.

1.2.4. Passive elektrische Bauelemente

Ohmscher Widerstand im Stromkreis

An einem Ohmschen Widerstand wird durch den Stromfluß ein Spannungsabfall erzeugt. Wie dieses Verhalten praktisch genutzt werden kann, wird im folgenden dargestellt. In einer elektronischen Schaltung werden unterschiedliche Spannungen benötigt, die aus der vorhandenen Betriebsspannung durch Teilung gewonnen werden können. Dazu dient ein *Spannungsteiler*.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung eines unbelasteten Spannungsteilers eine Experimentierschaltung nach Bild 1.13 auf! Verstellen Sie den Schleifer des Einstellwiderstandes und beobachten Sie die angezeigte Spannung!

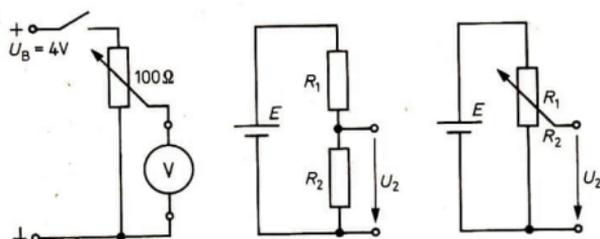


Bild 1.13
Experimentierschaltung
zum unbelasteten Spannungsteiler

Zur Herabsetzung einer gegebenen Spannung E benutzt man einen Spannungsteiler. Soll das Verhältnis der zu teilenden Spannungen nicht verändert werden, so wird die Spannungsteilerschaltung aus Festwiderständen aufgebaut. Die Teilspannung ist

$$U_2 = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Die Teilspannung wird im praktischen Betrieb einem Lastwiderstand R_L zugeführt.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung eines belasteten Spannungsteilers eine Experimentierschaltung nach Bild 1.14 auf! Stellen Sie im unbelasteten Zustand $U_2 = \frac{E}{2}$ ein! Schließen Sie da-

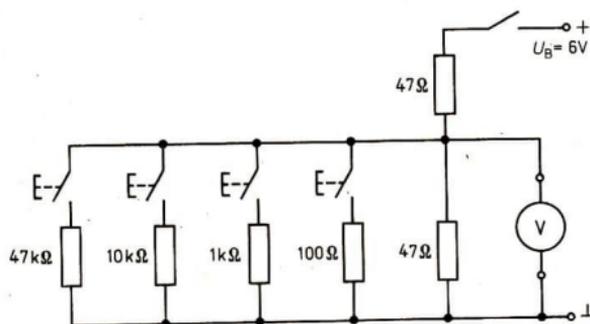


Bild 1.14
Experimentierschaltung
zum belasteten Spannungsteiler

nach an den Teiler Ausgang unterschiedliche Lastwiderstände (z. B. $R_L = 47 \text{ k}\Omega$; $10 \text{ k}\Omega$; $1 \text{ k}\Omega$ und 100Ω) an und messen Sie jeweils U_2' !

Welche Veränderungen ergeben sich im elektrischen Verhalten der Schaltung durch das Anschalten eines Lastwiderstandes? Welche Schlußfolgerungen ergeben sich über das Verhältnis von Teilerwiderstand und Lastwiderstand und der erreichten Teilspannung?

Durch die Parallelschaltung von R_2 und R_L verringert sich die Teilspannung nun auf

$$U_2' = E \frac{R_2 \vee R_L}{R_1 + (R_2 \vee R_L)}$$

$R_2 \vee R_L$ bedeutet „ R_2 parallel zu R_L “.

$$R_2 \vee R_L = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Kondensator und Spule im Gleichstromkreis

Kondensatoren und Spulen sind passive elektrische Bauelemente mit speziellen physikalischen Eigenschaften (siehe LB Physik Kl. 9).

- Informieren Sie sich über Bauformen und technische Daten von Kondensatoren und Spulen anhand der im Schülerexperimentiergerät vorhandenen Bauelemente und der Tabellen im Anhang dieses Buches!

Das Verhalten eines Kondensators bzw. einer Spule im Gleichstromkreis soll durch zwei Experimente untersucht werden.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Verhaltens eines Kondensators die Experimentierschaltung nach Bild 1.15 auf! Sie enthält einen Elektrolytkondensator (Polung beachten) mit einer relativ großen Kapazität, der zur Begrenzung der Ladestromstärke über einen Widerstand aufgeladen wird. Führen Sie nacheinander folgende Handlungen aus und beobachten Sie die Wirkungen:

- a) Taster S2 ist offen, schließen Sie Taster S1 (aufladen);
- b) Taster S1 ist offen, schließen Sie Taster S2 (entladen)!

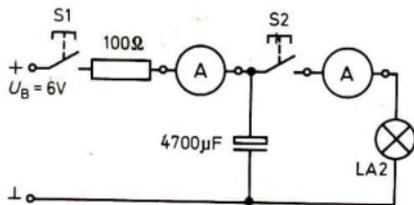


Bild 1.15
Experimentierschaltung zur Energiespeicherung in einem Kondensator

Aus dem Experiment wird deutlich: Der Kondensator speichert elektrische Energie in Form der elektrischen Ladung Q (Einheit: $1 \text{ A} \cdot \text{s}$). Das Speichervermögen wird durch die Kapazität C beschrieben. Je größer die Kapazität und je höher die Spannung zum Aufladen des Kondensators ist, um so größer ist die gespeicherte Ladung.

$$Q = C \cdot U; \quad C = \frac{Q}{U}$$

Die Einheit der Kapazität ist $[C] = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = 1 \text{ F (Farad)}$.

In der Technik kommen allgemein wesentlich kleinere Kapazitäten in den Größenordnungen Pikofarad (pF), Nanofarad (nF) und Mikrofarad (μF) vor. Die Umrechnung ist

$$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

$$1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$$

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$$

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Verhaltens einer Spule die Experimentierschaltung nach Bild 1.16 auf! Sie enthält eine Glimmlampe, deren Zündspannung wesentlich über der Betriebsspannung liegt. Schließen und öffnen Sie den Taster und beobachten Sie die Wirkung an der Glimmlampe!

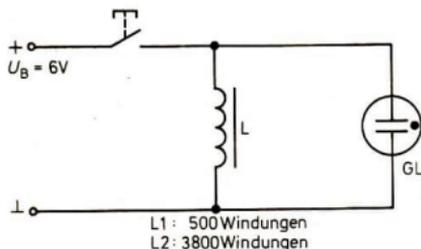


Bild 1.16
Experimentierschaltung zur Energiespeicherung
in einer Spule

Die im Experiment nachweisbaren überhöhten Spannungen beim Anschalten und Abschalten einer Spule sind auf die Selbstinduktion in der Spule zurückzuführen. Beim Anschalten wird eine Gegenspannung induziert, beim Abschalten eine Spannung gleicher Richtung, die das in der Spule aufgebaute Magnetfeld noch kurzzeitig aufrechterhält. In der Spule wird also magnetische Feldenergie gespeichert, die als selbstinduzierte Spannung auftritt. Das Speichervermögen der Spule wird durch die Induktivität L beschrieben. Der induzierte Spannungsstoß $U_{\text{ind}} \cdot \Delta t$ ist um so größer, je größer die Induktivität L und je größer auch die beim An- und Abschalten entstehende Stromstärkedifferenz (ΔI) ist:

$$U_{\text{ind}} \cdot \Delta t = L \cdot \Delta I; \quad L = \frac{U_{\text{ind}} \cdot \Delta t}{\Delta I}$$

Die Einheit der Induktivität ist $[L] = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \text{ H (Henry)}$.

Die Induktivität hängt außer von den Spulenabmessungen vornehmlich von der Windungszahl und von der Verwendung eines ferromagnetischen Spulenkerns ab. Die vorkommenden Induktivitäten liegen in den Größenordnungen von Mikrohenry (μH) bis Millihenry (mH).

Das Auf- und Entladen eines Kondensators erfolgt in elektronischen Schaltungen meist über einen vorgeschalteten Widerstand. Im folgenden Experiment soll der Einfluß des Widerstandes auf diesen Vorgang untersucht werden.

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung nach Bild 1.17 auf! Beobachten Sie für verschie-

dene Werte des Einstellwiderstandes den Verlauf der Spannung am Kondensator während des Ladevorganges! Bestimmen Sie mit Hilfe der Sekundenanzeige Ihrer Uhr grob den Zusammenhang $U_C = f(t)$ und stellen Sie diesen grafisch dar! Ersetzen Sie auch den Widerstand für die Entladung durch einen höheren Wert!

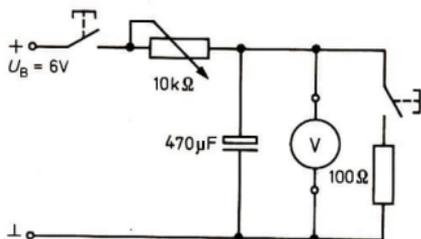


Bild 1.17
Experimentierschaltung zum Lade- und Entladevorgang am Kondensator

Je größer die Kapazität und der Widerstand sind, um so größer ist auch die Verzögerungszeit. Eine Größe für die Verzögerung ist die Zeitkonstante $T = R \cdot C$, die sich grafisch aus den Auf- und Entladekurven ermitteln läßt, aber auch einfach zu berechnen ist (Bild 1.18).

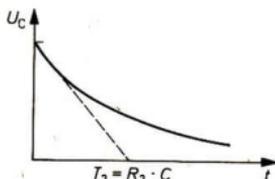
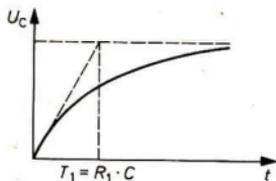


Bild 1.18
Auf- und Entladekurve eines Kondensators

■ Berechnungsbeispiele:

$$C = 500 \mu\text{F}; \quad R = 10 \text{ k}\Omega; \quad T = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 5 \text{ s}$$

$$C = 0,1 \mu\text{F}; \quad R = 50 \text{ k}\Omega; \quad T = 10^{-7} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} \cdot 5 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Die untersuchte Zeitverzögerung mit einer Schaltungskombination von Widerstand und Kondensator (RC-Netzwerk) findet in elektronischen Schaltungen vielseitige Anwendung.

Mit dem Oszillografen können die Strom- und Spannungsverhältnisse an Spule und Kondensator bei sprunghafter Veränderung der Eingangsspannung (Impuls) exakt untersucht werden (siehe Müller, R.: Demonstrationsoszillograf ED 2, Teil 2, S. 32ff.).

Kondensator und Spule im Wechselstromkreis

Ohmsche Widerstände verhalten sich im Wechselstromkreis grundsätzlich nicht anders als im Gleichstromkreis. Die Stromstärke ist stets der Spannung proportional. Bei Spulen und Kondensatoren tritt im Wechselstromkreis eine zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke auf (Bild 1.19).

Bei der Spule liegt das Spannungsmaximum zeitlich vor dem Stromstärkemaximum. Beim

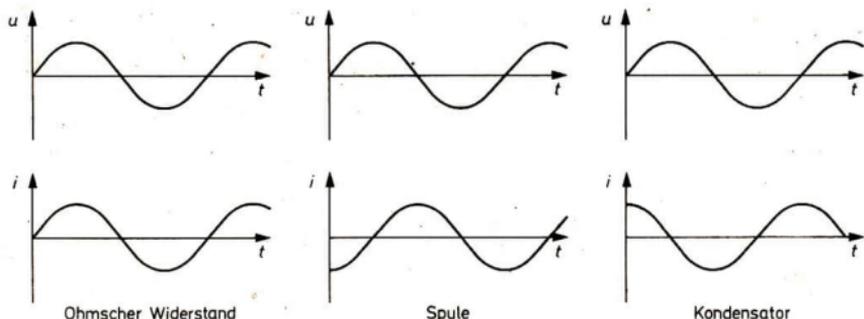


Bild 1.19 Zeitlicher Verlauf von Spannung und Stromstärke bei Ohmschem Widerstand, Spule und Kondensator im Wechselstromkreis

Kondensator liegt das Stromstärkemaximum zeitlich vor dem Spannungsmaximum. Mit den nachfolgenden Experimenten soll das Verhalten von Kondensator und Spule im Wechselstromkreis untersucht werden.

- ▼ Schließen Sie eine Spule mit 500 Windungen zunächst an eine Gleichspannung und danach an eine Wechselspannung von gleicher Höhe an (Bild 1.20)! Bestimmen Sie die Stromstärke in beiden Fällen! Wiederholen Sie das Experiment mit einer Spule mit 3800 Windungen! Welche Unterschiede stellen Sie fest?

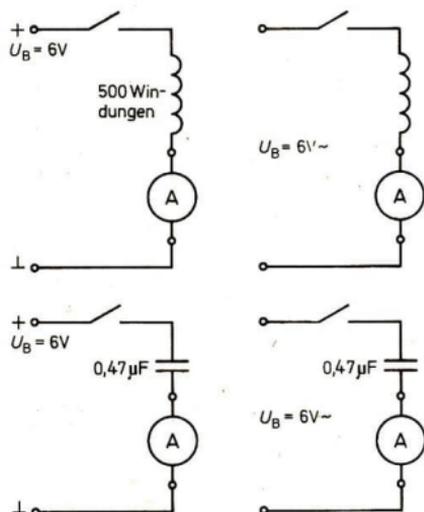


Bild 1.20 Spule und Kondensator im Gleich- und Wechselstromkreis

Im Gleichstromkreis setzt die Spule dem Stromfluß nur den Widerstand der Spulenwicklung entgegen. Legt man eine Wechselspannung an, so wird in der Spule durch Selbstinduktion eine Spannung induziert, die der angelegten Spannung entgegengerichtet ist. Als Antriebsspannung für den Strom wirkt nun die Differenz zwischen der angelegten Spannung und der induzierten Spannung, so daß die Stromstärke entsprechend geringer ist. Die Spule weist einen *induktiven Widerstand* auf.

- Berechnen Sie aus den Meßergebnissen des Experiments nach Bild 1.20 die Größe des Widerstandes der Spule im Gleich- und im Wechselstromkreis! Überlegen Sie, von welchen Größen der induktive Widerstand abhängig ist! Führen Sie die gleichen Untersuchungen wie im oben genannten Experiment mit einem Kondensator $C = 0,47 \mu\text{F}$ durch (Bild 1.20)!

Der Kondensator besitzt im Gleichstromkreis einen sehr hohen Widerstandswert, der durch den Isolationswiderstand des Dielektrikums bestimmt wird. Im Wechselstromkreis hingegen fließt über den Kondensator ein Strom. Aus der angelegten Spannung und der Stromstärke ergibt sich der *kapazitive Widerstand* des Kondensators.

- ▼ Schließen Sie zur Untersuchung der Wechselstromwiderstände an die Experimentierschaltung nach Bild 1.21 (mit Spule) den Universalgenerator und den Oszillografen an! Der am Ohmschen Widerstand auftretende Spannungsabfall ist der Stromstärke im Wechselstromkreis proportional. Bestimmen Sie für Frequenzen der Wechselspannung von 100 Hz bis 1 kHz aus dem Oszillogramm die Stromstärke! Wiederholen Sie das Experiment mit einem Kondensator!

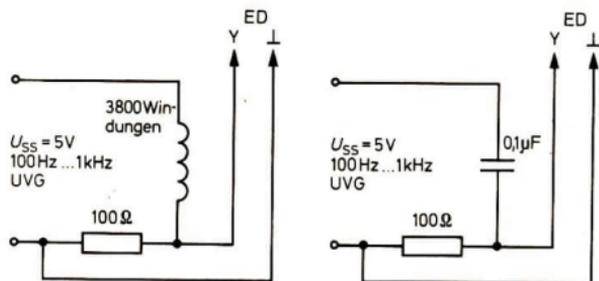


Bild 1.21
Wechselstromwiderstand
von Spule und Kondensator

Außer der Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung ist die Abhängigkeit der Stromstärke von der Frequenz zu erkennen. Aus dem Quotienten von Spannung und Stromstärke kann man, wie beim Ohmschen Widerstand, einen Wechselstromwiderstand der Spule und des Kondensators errechnen. Diesen Quotienten nennt man bei der Spule und beim Kondensator Blindwiderstand X , denn das Produkt aus Spannung und Stromstärke $P = U \cdot I$ ist auf Grund der zeitlichen Verschiebung der Größen gleich Null. Damit wird elektrische Energie nicht in andere Energiearten umgewandelt. Das kommt daher, daß Spulen und Kondensatoren aus dem Stromkreis elektrische Energie aufnehmen, speichern und danach an die Wechselspannungsquelle zurückgeben.

Aus dem Experiment nach Bild 1.21 ergibt sich für die Spule (Induktivität) im Wechselstromkreis, daß die Stromstärke mit zunehmender Frequenz abnimmt, obwohl die Span-

nung konstant bleibt. Der Wechselstromwiderstand X_L der Induktivität vergrößert sich demnach. Dieser Vorgang beruht auf der Selbstinduktion und ist frequenzabhängig. Für die Bestimmung des Wechselstromwiderstandes X_L gilt:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L.$$

Für den Kondensator (Kapazität) im Wechselstromkreis ergibt sich, daß die Stromstärke mit steigender Frequenz zunimmt, obwohl die Spannung konstant bleibt. Der Wechselstromwiderstand X_C der Kapazität verringert sich demnach. Für die Bestimmung des Wechselstromwiderstandes X_C gilt:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}.$$

Befinden sich in einem Stromkreis mindestens ein Blindwiderstand und ein Ohmscher Widerstand (RC-Glied bzw. RL-Glied) oder ein kapazitiver und ein induktiver Widerstand (Schwingkreis), so ergeben sich wieder neue Eigenschaften. RC-Glieder und Schwingkreise werden in Verstärkerschaltungen und in Wechselspannungsgeneratoren eingesetzt.

1.2.5. Passive elektronische Bauelemente

Halbleiterwiderstände

Alle Festkörper lassen sich hinsichtlich ihrer Eigenschaft, dem elektrischen Strom einen Widerstand entgegenzusetzen, in drei Gruppen einteilen: Leiter, Halbleiter, Isolatoren. Ein Kriterium für diese Einteilung ist der spezifische elektrische Widerstand ρ (Bild 1.22).

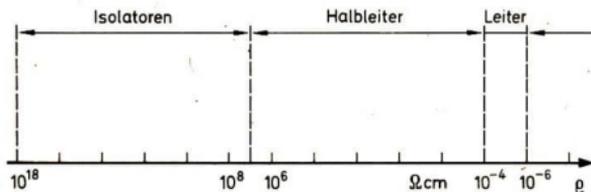


Bild 1.22
Spezifische elektrische Widerstände von Leitern, Halbleitern und Isolatoren

Außer dem spezifischen elektrischen Widerstand gibt es weitere unterschiedliche Eigenschaften, die diese Einteilung sinnvoll erscheinen lassen. Eine davon ist die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur.

- ▼ Untersuchen Sie den elektrischen Widerstand eines Metalls (Glühfaden einer Glühlampe) und eines Halbleiters (Thermistor) im kalten und im heißen Zustand!
Überlegen Sie, welche physikalischen Größen gemessen werden müssen, damit man den Widerstand errechnen kann!
Entwerfen Sie einen Schaltplan!
Arbeiten Sie zunächst mit einer so niedrigen Spannung, daß keine spürbare Erwärmung der Bauelemente auftritt!

Erhöhen Sie danach die Spannung so weit, daß der Glühfaden der Glühlampe hell aufleuchtet und sich der Thermistor spürbar erwärmt!
 Protokollieren Sie die Meßwerte!

Aus dem Experiment ergibt sich: Mit steigender Temperatur wird der elektrische Widerstand eines metallischen Leiters größer, der eines Halbleiters (Heißleiter) kleiner (Bild 1.23).

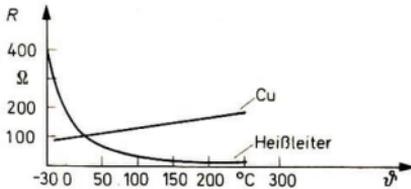


Bild 1.23
 Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur

- Begründen Sie die Tatsache, daß der Zusammenhang von Spannung und Stromstärke bei den untersuchten Widerständen nicht linear ist!
 Geben Sie eine Erklärung für die Begriffe „Kaltleiter“ und „Heißleiter“!

In Metallen und Halbleitern sind Atome bzw. Ionen regelmäßig angeordnet: Diese Anordnung nennt man Kristallgitter. Das Kristallgitter eines Metalls (Bild 1.24a) ist durch die Metallbindung gekennzeichnet. Beim Anlegen einer Spannung bewegen sich die freibeweglichen Elektronen vom Minuspol zum Pluspol der Spannungsquelle. Der elektrische Widerstand hat seine Ursache in einer Behinderung der Elektronenbewegung durch die Metallionen, die mit der Temperatur zunimmt.

Im Halbleiter liegt Atombindung vor, alle Außenelektronen der Halbleiteratome bilden

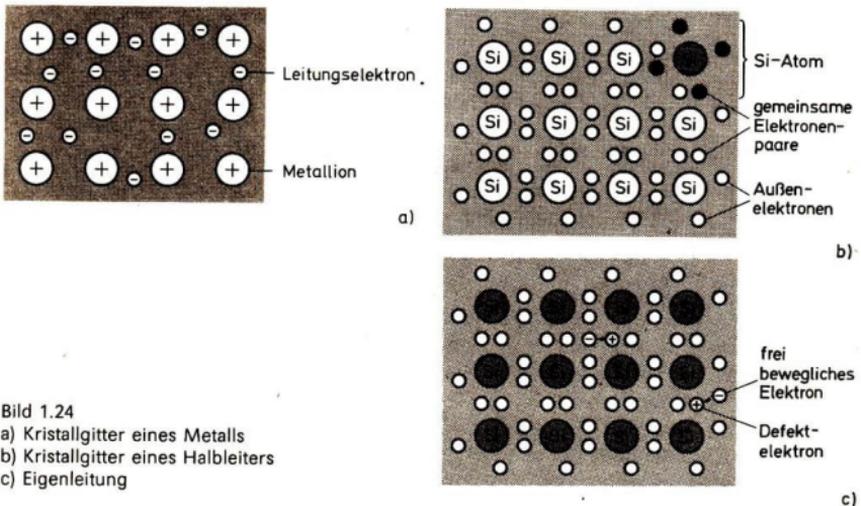


Bild 1.24
 a) Kristallgitter eines Metalls
 b) Kristallgitter eines Halbleiters
 c) Eigenleitung

Elektronenpaare, die am Kristallaufbau beteiligt sind (Bild 1.24b). Durch Energiezufuhr können einzelne Elektronen ihren Platz im Gitter verlassen, sie sind damit wanderungsfähig.

An der Stelle, die ein Elektron verlassen hat, ist das Ladungsgleichgewicht zwischen positiven und negativen Ladungen gestört. Dort überwiegt eine positive Ladung. Diese positive Ladung nennt man Defektelektron oder Loch. Dieses Loch kann durch ein Elektron, das an anderer Stelle im Kristall ein Loch hinterlassen hat, wieder aufgefüllt werden. Modellhaft kann man sich das so vorstellen, daß sich das erste Loch entgegen der Elektronenbewegung ebenfalls bewegt hat, daß die Löcher also ebenfalls wanderungsfähige Ladungsträger sind.

Beim Anlegen einer Spannung fließt ein Elektronenstrom von Minus nach Plus und ein Löcherstrom von Plus nach Minus. Im ungestörten Halbleiterkristall ist die Zahl der Löcher und der Elektronen gleich groß, der Vorgang heißt Eigenleitung (Bild 1.24c).

Halbleiterwiderstände, deren Funktion vorwiegend auf der Eigenleitung basiert, sind *Thermistor* und *Fotowiderstand*.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Verhaltens eines Thermistors eine Experimentierschaltung nach Bild 1.25a auf! Beobachten Sie das Verhalten der Schaltung bei Erwärmung des Thermistors!

Wiederholen Sie das Experiment mit einer Schaltung nach Bild 1.25b!

Worin bestehen die Unterschiede?

Überlegen Sie, wofür derartige Schaltungen praktisch genutzt werden können!

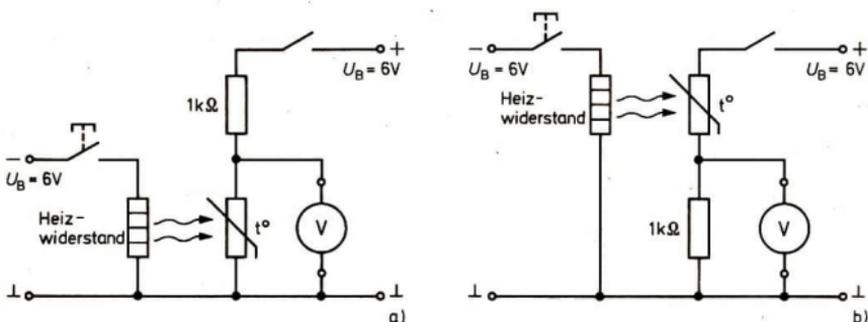


Bild 1.25 Experimentierschaltungen zum Verhalten eines Thermistors

Bei bestimmten Halbleiterwerkstoffen (z. B. Cadmiumsulfid) werden die zunächst örtlich gebundenen Elektronen durch Strahlung (Licht) wanderungsfähig. Aus solchen Werkstoffen werden lichtempfindliche Bauelemente, wie Fotowiderstände, hergestellt.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Verhaltens eines Fotowiderstandes eine Experimentierschaltung nach Bild 1.26 auf! Verdunkeln Sie den Fotowiderstand mit der Hand und legen Sie die Betriebsspannung an! Beobachten Sie am Meßgerät das elektrische Verhalten der Schaltung bei unterschiedlicher Belichtung des Fotowiderstandes (mit Taschenlampe)!

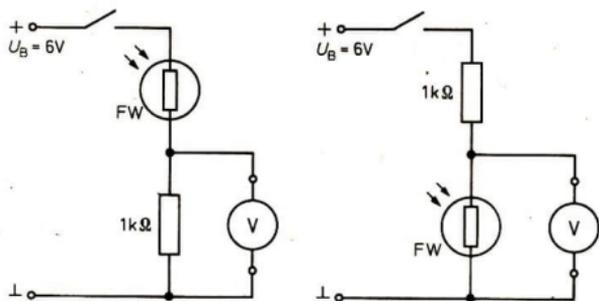


Bild 1.26
Grundsaltungen des Fotowiderstandes

Polen Sie die Betriebsspannung und das Meßgerät um und wiederholen Sie das Experiment!

Aus dem Experiment läßt sich ableiten, daß die Leitfähigkeit des Fotowiderstandes von der Beleuchtungsstärke abhängt. Der Fotowiderstand verhält sich wie ein Ohmscher Widerstand, er kann aber durch Veränderung seines Widerstandswertes entsprechend der Lichteinwirkung die Stromstärke steuern. Er ist in Gleich- und Wechselstromkreisen einsetzbar.

Halbleiterdioden

Im Gegensatz zu den Halbleiterwiderständen, deren Verhalten von der Polarität der anliegenden Spannung unabhängig ist, haben Halbleiterdioden eine unterschiedliche Charakteristik.

- Bauen Sie zur Untersuchung des Verhaltens einer Halbleiterdiode die Experimentierschaltung nach Bild 1.27a auf! Die Glühlampe dient zum Nachweis des Stromflusses und zur Begrenzung der Stromstärke. Legen Sie die Betriebsspannung mit unterschiedlicher Polarität an und beobachten Sie die Auswirkungen! Messen Sie in der Schaltung nach Bild 1.27b die Stromstärke vor und nach der Umpolung der Betriebsspannung!

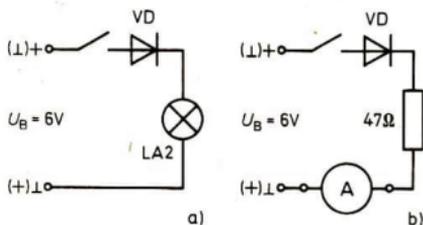


Bild 1.27
Experimentierschaltung zum Verhalten einer Halbleiterdiode

Das Experiment zeigt die Ventilwirkung der Diode. Sie hat eine Durchlaßrichtung mit einem verhältnismäßig kleinen und eine Sperrichtung mit einem sehr großen Widerstandswert.

Das Verhalten von Halbleiterwerkstoffen kann durch Einfügen von Fremdatomen (Dotierung) unterschiedlich beeinflusst werden.

Im n-leitenden Halbleiter sind überwiegend Elektronen, im p-leitenden Halbleiter sind überwiegend Defektelektronen (Löcher) als Ladungsträger vorhanden. Wird ein Halbleiter-Kristallplättchen verschieden dotiert, so ergibt sich an der Grenze beider Gebiete ein pn-Übergang. In dieser Grenzschicht sind zwischen den freibeweglichen Ladungsträgern auch ohne äußere Spannung Kräfte vorhanden, die bewirken, daß Elektronen in das p-Gebiet und Löcher in das n-Gebiet eindringen (Ladungsträgerdiffusion, Bild 1.28). Dadurch bildet sich am pn-Übergang ein elektrisches Feld aus, das einer weiteren Diffusion entgegenwirkt. Mit der Ausbildung dieses elektrischen Feldes ist die Entstehung einer Diffusionsspannung unmittelbar am pn-Übergang verbunden.

Legt man an eine Halbleiterdiode eine Spannung in Durchlaßrichtung an, so fließt der Durchlaßstrom (Bild 1.28b). Der Durchlaßstrom steigt erst dann stark an, wenn die angelegte Spannung den Betrag der Diffusionsspannung erreicht hat. Erst dann können weitere Ladungsträger in den pn-Übergang eindringen. Jede in den pn-Übergang eingedrungene positive Ladung (Loch) wird von einem Elektron ausgeglichen (Rekombination).

Polt man die Halbleiterdiode um, so fließt (abgesehen von dem sehr kleinen Sperrstrom) kein Strom. Durch das von der angelegten Spannung erzeugte elektrische Feld werden vom pn-Übergang alle Ladungsträger abgezogen (Bild 1.28c). Es bildet sich ein ladungsträgerfreies Gebiet, das einen Isolator darstellt. Der sehr kleine Sperrstrom hat seine Ursache in der Eigenleitung.

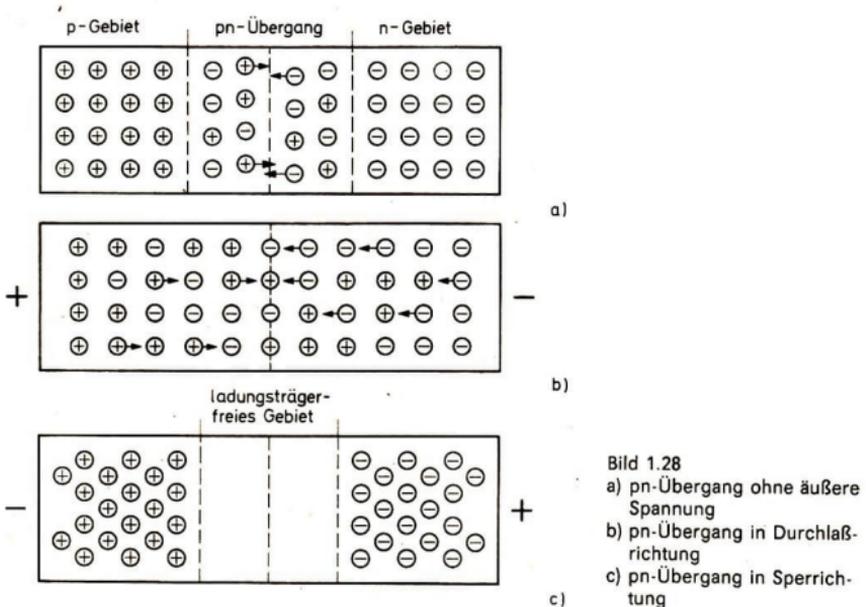


Bild 1.28

- a) pn-Übergang ohne äußere Spannung
- b) pn-Übergang in Durchlaßrichtung
- c) pn-Übergang in Sperrrichtung

Für den Einsatz in elektronischen Schaltungen ergibt sich: Durch eine Halbleiterdiode fließt nur dann ein Strom, wenn an der Anode (p-Gebiet) der positive und an der Katode (n-Gebiet) der negative Pol der Spannungsquelle anliegt (Durchlaßrichtung). Wird die

Diode umgepolt, fließt kein Strom (Sperrichtung). Einen vollständigen Überblick über den Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke bei einer Halbleiterdiode erhält man durch die Kennlinie.

- ▼ Bauen Sie zur Aufnahme der Kennlinie die Experimentierschaltungen nach Bild 1.29 auf und messen Sie die Stromstärke in Abhängigkeit von der Spannung! Notieren Sie die Wertepaare und stellen Sie die Kennlinie $I = f(U)$ grafisch dar! Führen Sie die Messungen mit Germanium- und Siliciumdioden durch!

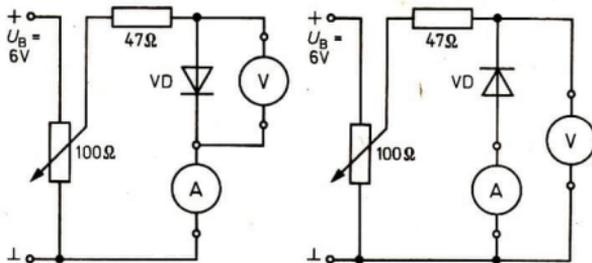


Bild 1.29
Experimentierschaltung zur Aufnahme der Kennlinie einer Halbleiterdiode

Die Kennlinien zeigen im Durchlaßbereich eine Krümmung, die durch die Diffusionsspannung verursacht wird. Diese Diffusionsspannung beträgt bei Germanium 0,4 V, bei Silicium etwa 0,7 V (Bild 1.30).

Die Kennlinie einer Halbleiterdiode kann man auch mit dem Oszillografen darstellen. Eine dazu geeignete Schaltung zeigt Bild 1.31.

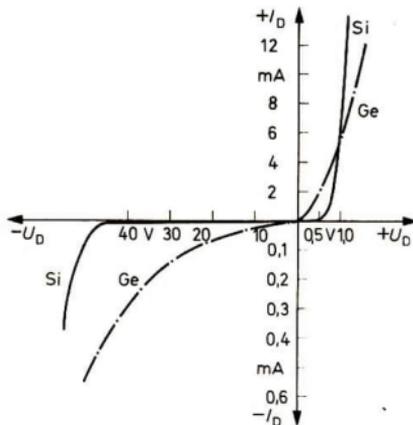
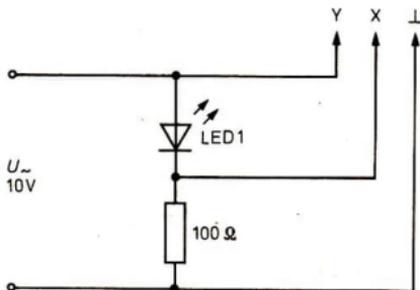


Bild 1.30
Kennlinie einer Germanium-Diode und einer Silicium-Diode

Bild 1.31
Schaltung zur Aufnahme einer Diodenkennlinie mit dem Oszillografen



Halbleiterdioden eignen sich besonders zur Gleichrichtung von Wechselspannungen. Fast alle elektronischen Geräte benötigen zu ihrem Betrieb Gleichspannungen. Diese Gleichspannungen werden durch Gleichrichtung und anschließende Glättung aus der

Netzwechselfspannung gewonnen. Eine einfache Schaltung zur Gleichrichtung einer Wechselfspannung ist in Bild 1.32 dargestellt (Einweggleichrichtung).

- Ermitteln Sie aus der Durchlaß-Sperr-Kennlinie der Diode den zeitlichen Verlauf der Stromstärke, wenn an die Schaltung nach Bild 1.32 eine Wechselfspannung angelegt wird! Wodurch unterscheidet sich der Stromfluß von einem „echten“ Gleichstrom?

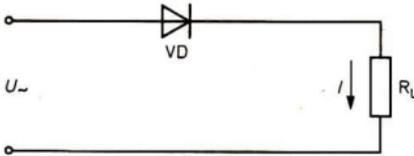
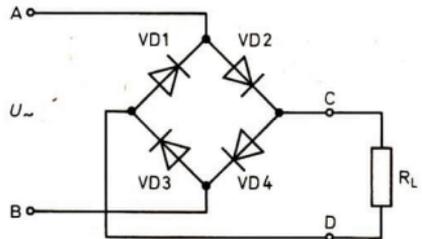


Bild 1.32
Einweggleichrichtung mit Halbleiterdiode

Bild 1.33
Zweiweggleichrichtung mit Halbleiterdioden



Der Nachteil dieser Schaltung ist, daß in der Zeit, in der die Diode in Sperrrichtung wirkt, auch durch den Lastwiderstand kein Strom fließt. Diesen Nachteil kann man mit der Schaltung nach Bild 1.33 vermeiden.

- Überlegen Sie, wie in einer Gleichrichterschaltung nach Bild 1.33 der Strom fließt, wenn am Punkt A der positive Pol bzw. der negative Pol der Spannungsquelle anliegt! Worin unterscheiden sich die gleichgerichteten Spannungen bzw. Ströme bei der „Einweggleichrichtung“ nach Bild 1.32 und bei der „Zweiweggleichrichtung“ nach Bild 1.33?

Für den Betrieb elektronischer Geräte wirkt es sich nachteilig aus, daß die gleichgerichtete Spannung zwischen Null und einem Maximalwert schwankt (pulsierende Gleichspannung). Mit einem Experiment soll eine Möglichkeit zur Glättung dieser Schwankungen untersucht werden.

- Bauen Sie zur Glättung einer gleichgerichteten Wechselfspannung eine Experimentierschaltung nach Bild 1.34 auf! Schließen Sie den Oszillografen an und bilden Sie bei geöffneten Tastern S1 und S2 den Spannungsabfall, der dem Stromfluß proportional ist, am Belastungswiderstand ab! Schließen Sie zuerst einen, dann gleichzeitig beide Taster und beobachten Sie die Auswirkungen im Oszillogramm!

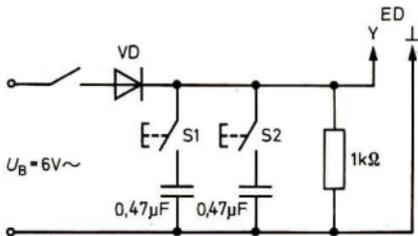


Bild 1.34
Experimentierschaltung zur Glättung

Die Schwankungen der pulsierenden Gleichspannung lassen sich mit einem Ladekondensator verringern (Bild 1.35). Dabei wird die Eigenschaft eines Kondensators, Energie zu speichern, angewendet. Während der Zeit t_a wird der Kondensator aufgeladen, die Entladung erfolgt in der Zeit t_e .

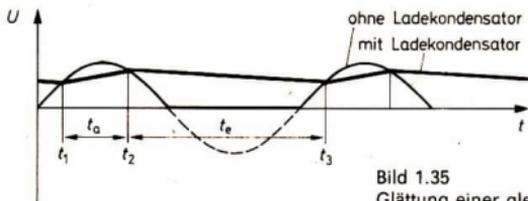


Bild 1.35
Glättung einer gleichgerichteten Wechselspannung

Eine lichtempfindliche Halbleiterdiode ist die *Fotodiode*. Sie hat ein lichtdurchlässiges Gehäuse. Die Sperrschicht ist so ausgebildet, daß auf sie Licht fallen kann. Fotodioden werden stets in Sperrichtung betrieben. Deshalb fließt ohne Belichtung auch kein Strom, denn die Grenzschicht ist ladungsträgerfrei.

Bei Belichtung der Grenzschicht werden wanderungsfähige Ladungsträger erzeugt. Dadurch kann ein von der Beleuchtungsstärke der Grenzschicht abhängiger Fotostrom fließen. Der Fotostrom I_R (Sperrstrom) steigt linear mit der Beleuchtungsstärke E_v an (Bild 1.36).

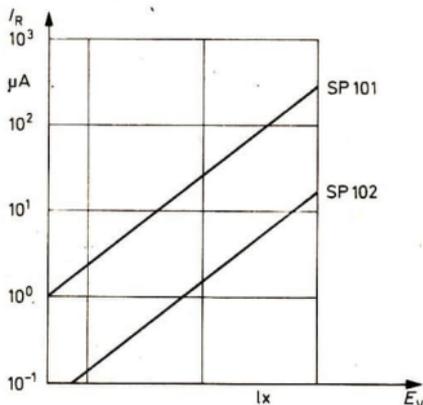
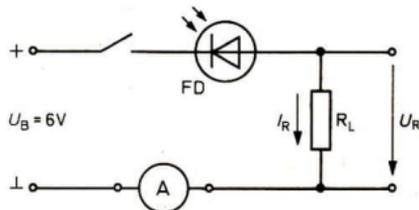


Bild 1.36
Sperrstrom in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

Bild 1.37
Grundschiung einer Fotodiode



Durch die Anordnung verschiedenfarbiger Filter zwischen der Lichtquelle und der Fotodiode kann man die Abhängigkeit des Fotostromes von der Lichtfarbe untersuchen. Das Maximum der Strahlungsempfindlichkeit von Silicium-Fotodioden liegt im infraroten Bereich des Lichtes.

Halbleiterbauelemente, die sichtbares oder infrarotes Licht erzeugen, werden als *Lumineszenzdioden* bezeichnet.

- ▼ Bauen Sie die Grundschiung einer Lumineszenzdioden nach Bild 1.38 auf! Beobachten

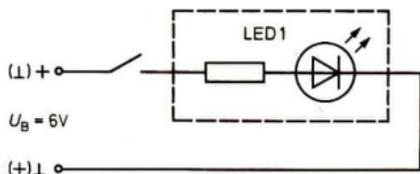


Bild 1.38
Grundschialtung einer Lumineszenzdiode

Sie das Verhalten der Diode beim Anlegen der Spannung! Polen Sie die Spannung um und beobachten Sie das Ergebnis!

Die im Experiment eingesetzte „leuchtende“ Diode ist eine Lichtemitterdiode (LED; englisch: light emitting diode), die bei Betrieb in Durchlaßrichtung eine sichtbare Lichtstrahlung abgibt.

Bei bestimmten Halbleiterwerkstoffen, z. B. Galliumarsenid, wird sichtbares Licht abgestrahlt. Durch Verwendung anderer Halbleiterwerkstoffe, z. B. Silicium, kann die Strahlung im infraroten Bereich des Lichtes liegen (Infrarotdioden, IRED; englisch: infrared emitting diode).

Lichtemitterdioden müssen immer mit einem Vorwiderstand betrieben werden, damit die maximal zulässige Stromstärke nicht überschritten wird. Die Größe des Vorwiderstandes wird mit folgender Gleichung ermittelt:

$$R_v = \frac{U - U_F}{I_{\max}}$$

U : Spannung der Spannungsquelle
 U_F : Flußspannung in Durchlaßrichtung der LED
 I_{\max} : maximal zulässiger Diodenstrom.

- Berechnen Sie die Größe des Vorwiderstandes für $U = 6 \text{ V}$, $U_F = 1,8 \text{ V}$ und $I_{\max} = 10 \text{ mA}$!

Bei den Lichtemitterdioden-Bausteinen des Schülerexperimentiergerätes SEG Elektronik/Mikroelektronik ist der Vorwiderstand bereits auf dem Bauelementträger fest mit der Lichtemitterdiode verbunden.

1.3. Aktive Halbleiterbauelemente

Die bisher vorgestellten elektrischen und elektronischen Bauelemente dienen der Umformung elektrischer Signale. Bedingt durch den Ohmschen Widerstand dieser Bauelemente wird ein Teil der Signalenergie in Wärme umgewandelt. Dadurch verringert sich die Signalenergie.

Signale sehr kleiner Energie lassen sich nicht unmittelbar verarbeiten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Signalenergie zu verstärken.

Die Verstärkung ist definiert als Quotient aus der Ausgangsgröße und der Eingangsgröße.

Man unterscheidet die Spannungsverstärkung v_u , die Stromverstärkung v_i und die Leistungsverstärkung v_p .

Zur Vergrößerung der Signalenergie sind ein aktives elektronisches Bauelement und eine

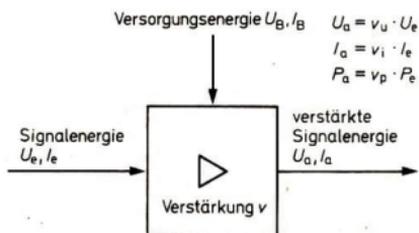


Bild 1.39
Aktives elektronisches Bauelement als Verstärker

Versorgungsenergie notwendig (Bild 1.39). Ein typisches aktives elektronisches Bauelement ist der bipolare Transistor...

1.3.1. Aufbau und Wirkungsweise des bipolaren Transistors

Bipolare Transistoren sind Halbleiterbauelemente mit zwei pn-Übergängen. Je nach Dotierung liegt die Zonenfolge pnp oder npn vor (Bild 1.40).

Die meisten der heute hergestellten Transistoren sind Si-Typen. In den folgenden Experimenten soll die Wirkungsweise solcher Transistoren untersucht werden.

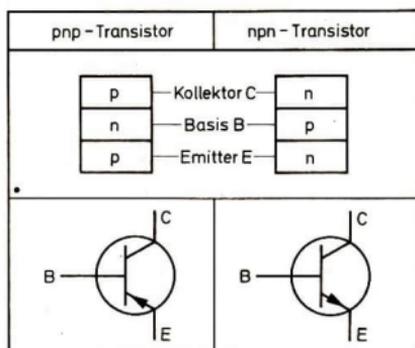


Bild 1.40
Aufbau und Schaltzeichen des Transistors

- ▼ Überlegen Sie zunächst, ob bei offener Basis (Basis nicht angeschlossen) ein Strom vom Emitter zum Kollektor oder umgekehrt fließen kann! Gehen Sie von Ihren Kenntnissen über Durchlaß- und Sperrichtung von Halbleiterdioden aus! Bestätigen Sie das Ergebnis Ihrer Überlegung durch ein Experiment nach Bild 1.41a! Führen Sie anschließend das Experiment nach Bild 1.41b durch und begründen Sie die Ergebnisse!

Die pn-Übergänge eines Transistors haben Eigenschaften einer Halbleiterdiode. Die besonderen Eigenschaften eines Transistors treten erst im Zusammenwirken der Vorgänge in den drei Zonen und den dazwischenliegenden Grenzschichten auf.

Transistoren werden so betrieben, daß die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung geschaltet ist (Bild 1.42).

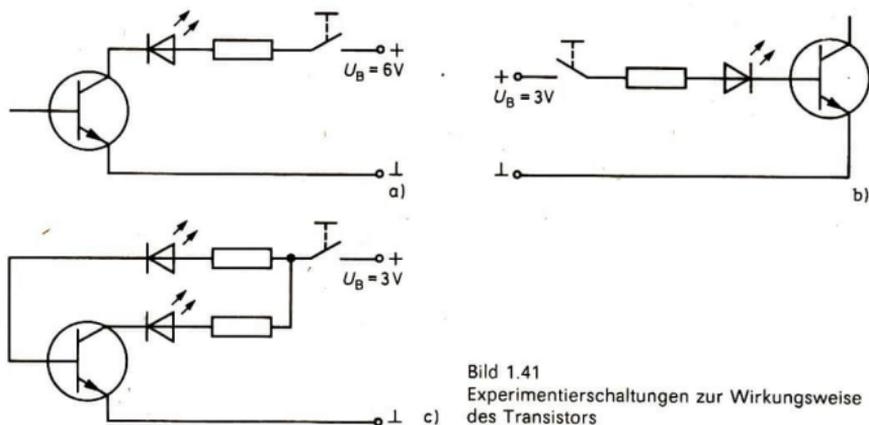


Bild 1.41
Experimentierschaltungen zur Wirkungsweise
des Transistors

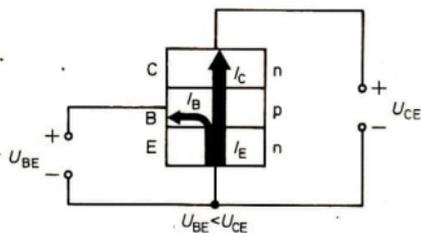


Bild 1.42
Spannungen und Ströme am Transistor

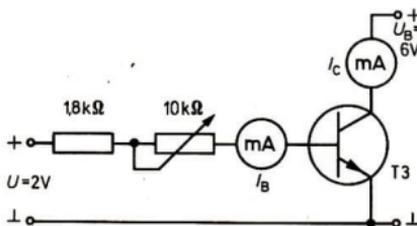


Bild 1.43
Steuerung des Kollektorstromes durch den Bas-
sstrom

- Überprüfen Sie das Zusammenwirken der Vorgänge in den drei Zonen des Transistors mit einer Experimentierschaltung nach Bild 1.41c!

Wird die Basis-Emitter-Strecke eines Transistors in Durchlaßrichtung und die Basis-Kollektor-Strecke in Sperrichtung geschaltet und fließt ein Basisstrom I_B , so fließt auch ein Kollektorstrom I_C .

- Bauen Sie zur Untersuchung des Kollektorstromes eine Experimentierschaltung nach Bild 1.43 auf! Verändern Sie mit dem Einstellwiderstand die Größe des Basisstromes I_B ! Stellen Sie die Auswirkung auf den Kollektorstrom I_C fest!

Eine Veränderung des Basisstromes führt zu einer Veränderung des Kollektorstromes – der Kollektorstrom wird durch den Basisstrom gesteuert. Das Verhältnis der Kollektorstromstärke I_C zur Basisstromstärke I_B bezeichnet man als Stromverstärkungsfaktor B des Transistors.

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

Die Tatsache, daß trotz der in Sperrichtung geschalteten Basis-Kollektor-Diode ein Kollektorstrom fließen kann, soll mit folgender, stark vereinfachter Darstellung erklärt werden.

Werden die in Bild 1.42 dargestellten Spannungen an den Transistor angelegt, so ist die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung gepolt. Es fließt ein Elektronenstrom vom Emitter in die Basis. Gleichzeitig fließt ein Löcherstrom von der Basis in den Emitter. In der Grenzschicht kommt es zur Vereinigung von Elektronen und Löchern. Durch die Herstellung bedingt, ist die Zahl der Löcher in der Basis aber viel kleiner als die Zahl der Elektronen. Deshalb wird die Basis gewissermaßen mit Elektronen überschwemmt. Diese Elektronen gelangen auch bis zur Basis-Kollektor-Grenzschicht, werden dort von der positiven Kollektorspannung beschleunigt und gelangen schließlich in das Kollektorgebiet.

- Bestimmen Sie den Stromverstärkungsfaktor eines Transistors! Entwerfen Sie, ausgehend von den zu messenden Größen, eine Meßschaltung!

Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Stromverstärkung vom Kollektorstrom! Verändern Sie dazu den Basisstrom! Stellen Sie die Abhängigkeit des Kollektorstromes vom Basisstrom grafisch dar!

1.3.2. Kennlinien des Transistors

Um die Wirkungsweise eines Transistors zu verstehen, sind Kennlinien notwendig. Erst die umfassende Kenntnis von Zusammenhängen und Eigenschaften ermöglicht den Bau eines Verstärkers oder eines elektronischen Schalters mit Transistoren. Wichtige Zusammenhänge lassen sich aus den *Grundsaltungen des Transistors* ableiten (Bild 1.44).

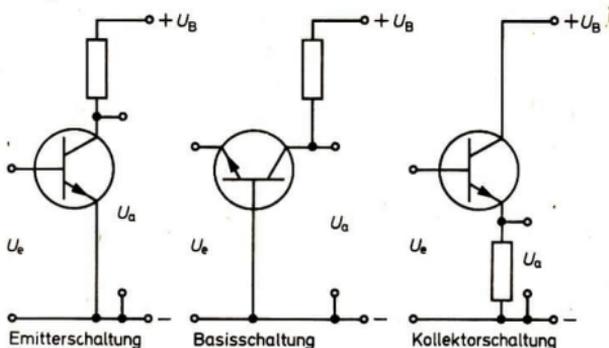


Bild 1.44
Grundsaltungen des Transistors

Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf die Emitterschaltung, die wichtigste Grundsaltung des Transistors. Bei der Emitterschaltung sind die Eingangsgrößen die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} und die Basisstromstärke I_B . Die Ausgangsgrößen sind die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} und die Kollektorstromstärke I_C .

Zu untersuchen ist die Abhängigkeit dieser Größen voneinander, die sich alle mehr oder

weniger gegenseitig beeinflussen. In der Praxis geht man dabei so vor, daß man die Abhängigkeit einer Größe von einer zweiten untersucht und eine dritte Größe dabei konstant hält. Danach ergeben sich die folgenden vier Funktionen bzw. Kennlinien:

1. $I_C = f(U_{CE})$ für $I_B = \text{konst.}$ – Ausgangskennlinie
2. $I_C = f(I_B)$ für $U_{CE} = \text{konst.}$ – Stromübertragungskennlinie
3. $I_B = f(U_{BE})$ für $U_{CE} = \text{konst.}$ – Eingangskennlinie
4. $U_{BE} = f(U_{CE})$ für $I_B = \text{konst.}$ – Rückwirkungskennlinie

Die wichtigste Kennlinie ist die Ausgangskennlinie.

- ▼ Bauen Sie zur Aufnahme der Ausgangskennlinie eine Experimentierschaltung nach Bild 1.45 auf! Stellen Sie am Einstellwiderstand eine konstante Basisstromstärke $I_B = 2 \text{ mA}$ ein! Verändern Sie die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} schrittweise von 1,5 V bis 5 V und bestimmen Sie die zugehörigen Werte der Stromstärke I_C ! Verändern Sie den Basisstrom und nehmen Sie weitere Werte auf! Stellen Sie abschließend die Kennlinien grafisch dar!

Hinweis

Bei den Messungen ist zu beachten, daß sich der Transistor nicht unzulässig erwärmt. Ein Maß für die Erwärmung des Transistors ist die in ihm umgesetzte elektrische Leistung $P_V = U_{CE} \cdot I_C$, die Kollektor-Verlustleistung, deren maximaler Wert für jeden Transistor festgelegt ist und nicht überschritten werden darf.

Für jede gewählte Spannung U_{CE} ist vor dem Experiment der Maximalwert für I_C zu berechnen, der ebenfalls einen typabhängigen Grenzwert $I_{C \text{ max}}$ nicht überschreiten darf.

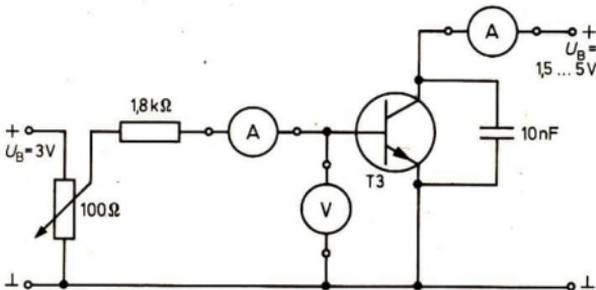


Bild 1.45
Schaltung zur Aufnahme
von Transistorkennlinien

In ähnlicher Weise können auch die anderen Kennlinien des Transistors aufgenommen werden. Es ist üblich, alle Transistorkennlinien in *einem* Koordinatensystem anzuordnen. Dabei entspricht die Numerierung der Funktionen (siehe oben) den Quadranten des Koordinatensystems, in denen die Kurven dargestellt sind. Im Unterschied zu den Darstellungen in der Mathematik gehen die Koordinatenachsen nur bis zum Ursprung des Koordinatensystems, es gibt also keine negativ gerichteten Achsen (Bild 1.46).

Wesentlich rationeller als die punktweise Aufnahme der Wertepaare ist die Darstellung von Transistorkennlinien mit dem Oszillografen (Bild 1.47).

Die Aufnahme der Eingangskennlinie entspricht der Aufnahme einer Diodenkennlinie. Da nur die Durchlaßkennlinie von Interesse ist, verhindert die in der Meßschaltung angeordnete Diode ein Betreiben des Transistoreingangs in Sperrichtung.

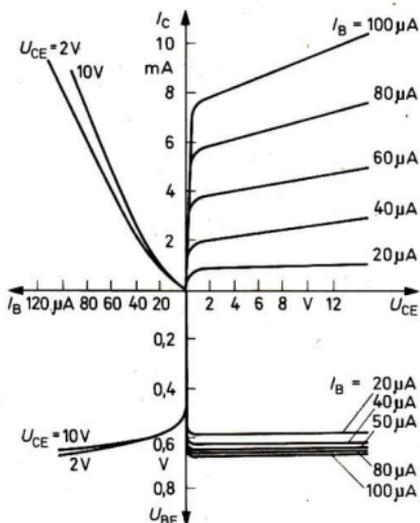


Bild 1.46
Kennlinienfeld eines
Si-npn-Transistors

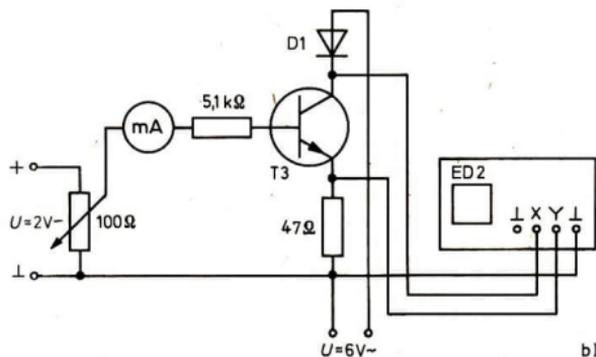
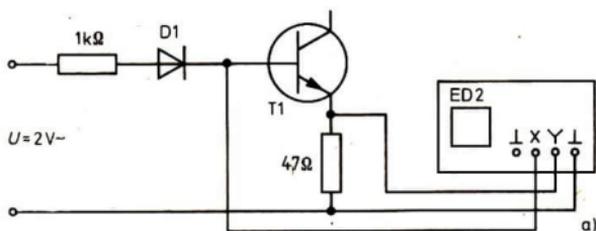


Bild 1.47
Schaltungen zur Aufnahme
von Transistorkennlinien
mit dem Oszillografen
a) für die Eingangskenn-
linie
b) für die Ausgangskenn-
linie

Bei der Aufnahme von Ausgangskennlinien müssen zwei Spannungen an den Transistor angelegt werden. Mit dem Einstellwiderstand wird die Basis-Emitter-Spannung eingestellt, die Diode im Kollektorkreis ist notwendig, damit die Kollektor-Basis-Strecke immer

in Sperrichtung betrieben wird. Der Spannungsabfall am Widerstand 47Ω ist der Kollektorstromstärke I_C proportional und dient zur Vertikalauslenkung.

- Nehmen Sie Transistorkennlinien mit dem Oszillografen auf! Entwickeln Sie selbständig eine Schaltung zur Aufnahme der Stromübertragungskennlinie mit dem Oszillografen!

1.3.3. Transistor als Verstärker

Bei den Messungen zur Aufnahme der Transistorkennlinien treten z. T. kleine Ströme auf, die sich mit dem Schülermeßgerät Polytest I nicht oder nur sehr ungenau messen lassen. In der Elektronik sind vielfach noch viel kleinere Ströme zu messen. Dazu ist ein Meßgerät mit eingebautem Verstärker erforderlich. Das Prinzip dieser Meßgeräte beruht darauf, daß man den zu messenden Strom einem Verstärker zuführt und den verstärkten Strom mißt. Der Stromverstärkungsfaktor muß aber genau bekannt sein. Um die ursprüngliche Stromstärke zu erhalten, muß man die gemessene Stromstärke durch den Stromverstärkungsfaktor des Verstärkers dividieren. Ein solcher Verstärker läßt sich mit einem Transistor aufbauen. Den zu messenden Strom führt man der Basis zu, im Kollektorkreis fließt der verstärkte Strom.

- Entwerfen Sie eine Schaltung, mit der kleine Ströme gemessen werden können! Vergleichen Sie Ihre Schaltung mit Bild 1.48! Überlegen Sie, welche Kenngröße des Transistors bekannt sein muß, beziehungsweise wie Sie diese ermitteln können!

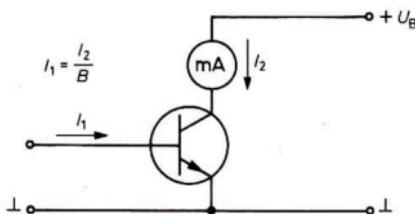


Bild 1.48
Schaltung zur Messung kleiner Ströme

Die einfache Schaltung nach Bild 1.48 ist aus verschiedenen Gründen für genaue Messungen nicht geeignet. Man verwendet sie trotzdem, da es vielfach gar nicht darauf ankommt, den genauen Wert des zu messenden Stromes zu kennen. Man interessiert sich z. B. für die Änderung, wie das bei einer Kennlinienaufnahme der Fall ist. Die Meßfehler wirken sich bei allen Messungen aus, und die erhaltene Kurve ist dann trotz dieser Fehler prinzipiell richtig.

- ▼ Bauen Sie zur Meßverstärkung die Experimentierschaltungen nach Bild 1.49 auf! Führen Sie zunächst das Experiment nach Bild 1.49a durch! Beobachten Sie das Verhalten der Glühlampe bei allmählicher Veränderung der Belichtung des Fotowiderstandes! Erklären Sie das Ergebnis!
- Die Stromstärke in der Reihenschaltung von Fotowiderstand und Glühlampe ist aufgrund des zu hohen Gesamtwiderstandes zu gering, um die Lampe zum Leuchten zu bringen.

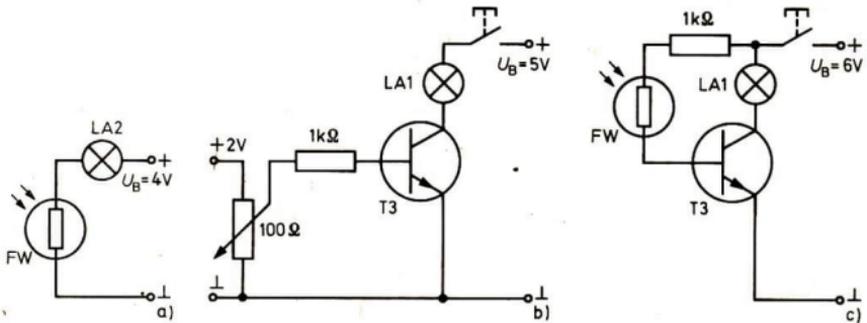


Bild 1.49 Helligkeitssteuerung einer Glühlampe

- ▼ In der Schaltung nach Bild 1.49b wird die Glühlampe in den Kollektorstromkreis des Transistors geschaltet. Untersuchen Sie den Einfluß der Basis-Emitter-Spannung auf das Verhalten der Glühlampe!

Der Basisstrom I_B steuert den Kollektorstrom I_C und damit auch die Helligkeit der Glühlampe.

- ▼ Wiederholen Sie das Experiment nach Variante a mit der Schaltung nach Variante c! Vergleichen und erklären Sie die Ergebnisse!

Fällt in der Schaltung nach Variante c auf den Fotowiderstand Licht, so fließt im Basiskreis der Basisstrom I_B . Dieser Strom erzeugt an der Basis-Emitter-Strecke des Transistors eine Spannung U_{BE} , deren Betrag an der Eingangskennlinie des Transistors abgelesen werden kann. Umgekehrt würde diese Spannung, legt man sie zwischen Basis und Emitter an, genau den Basisstrom I_B fließen lassen. Daraus folgt, daß es prinzipiell gleichgültig ist, ob man der Basis den Strom I_B zuführt oder zwischen Basis und Emitter die Spannung U_{BE} anlegt. In beiden Fällen fließt im Kollektorkreis der Kollektorstrom I_C . Der Kollektorstrom I_C fließt auch durch die Glühlampe und bringt diese zum Leuchten, da er um den Stromverstärkungsfaktor größer als der Basisstrom ist.

Im Experiment nach Bild 1.49c wurde die Basis-Emitter-Spannung mit einem Vorwider-

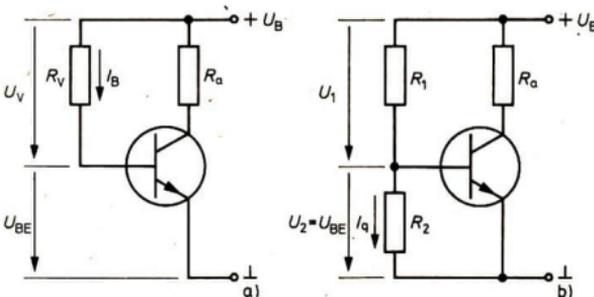


Bild 1.50
Erzeugung der Basis-Emitter-Spannung
a) mit Basisvorwiderstand
b) mit Basisspannteiler

stand (Fotowiderstand) erzeugt. Sie kann auch mit einem Spannungsteiler erzeugt werden (Bild 1.50).

Ersetzt man einen der beiden Spannungsteiler-Widerstände durch den Fotowiderstand, so ändert sich in Abhängigkeit von der Belichtung des Fotowiderstandes die Basis-Emitter-Spannung, damit auch der Basisstrom und schließlich auch der Kollektorstrom.

Da die Transistor-Verstärkerstufe eine wesentliche elektronische Grundschaltung ist, sollen die elektrischen Verhältnisse noch näher untersucht werden (Bild 1.51).

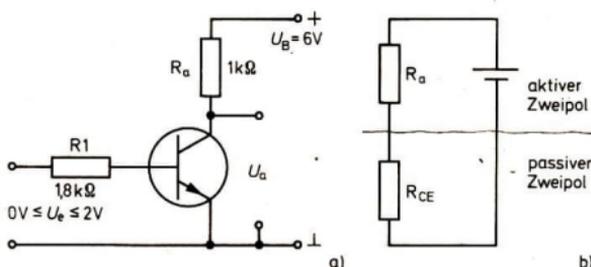


Bild 1.51
Einfache Verstärkerstufe
a) Schaltung
b) Ersatzschaltung des Kollektorkreises

Der Widerstand R_1 schützt den Transistor vor zu großen Basisströmen und damit vor zu großen Kollektorströmen. Der Widerstand R_a heißt Außenwiderstand des Transistors. Er hat die Aufgabe, eine dem Kollektorstrom proportionale Spannung zu erzeugen.

Die Ausgangsspannung U_a wird zwischen Kollektor und Emitter abgegriffen, sie ist also gleich der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} . Der Kollektorstrom fließt vom Minuspol der Spannungsquelle in den Emitter, durch die Basis zum Kollektor und durch den Widerstand R_a zum Pluspol der Spannungsquelle. Diesen Stromkreis kann man als Grundstromkreis betrachten.

Da die Ausgangsspannung zwischen Kollektor und Emitter abgegriffen wird, ist der Widerstand R_{CE} der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors der passive Zweipol im Grundstromkreis.

Der aktive Zweipol wird von der Betriebsspannungsquelle und dem Widerstand R_a gebildet. Der Außenwiderstand R_a der Verstärkerstufe wird also als Innenwiderstand der Betriebsspannungsquelle betrachtet (Bild 1.51b).

Das Spannungs-Strom-Verhalten der Kollektor-Emitter-Strecke wird im Ausgangskennlinienfeld des Transistors dargestellt. Um das Zusammenwirken des Transistors mit U_B und R_a zu erkennen, muß man die Kennlinie des aktiven Zweipols aus U_B und R_a in das Ausgangskennlinienfeld des Transistors eintragen. Diese Gerade heißt *Außenwiderstandsgerade*. Der Schnittpunkt zwischen der Außenwiderstandsgeraden und der Ausgangskennlinie zum eingestellten Basisstrom I_B ist der sich einstellende Arbeitspunkt A (Bild 1.52).

Aus Bild 1.52 geht hervor, daß bei dem verwendeten Transistor (T3 des SEG Elektronik/Mikroelektronik) bei einem Basisstrom $I_B = 4$ mA, einer Betriebsspannung $U_B = 6$ V und einem Außenwiderstand $R_a = 50 \Omega$ ein Kollektorstrom $I_C = 230$ mA fließt und die Kollektor-Emitter-Spannung $U_{CE} = 2,75$ V beträgt.

- Wie groß sind U_{CE} und I_C , wenn $I_B = 2$ mA bzw. 6 mA beträgt? Tragen Sie die sich einstellenden Arbeitspunkte in das Kennlinienfeld ein und lesen Sie die gesuchten Größen ab!

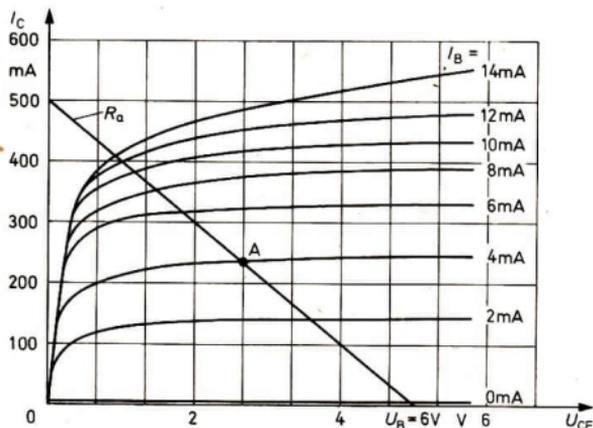


Bild 1.52
Ausgangskennlinienfeld
mit eingetragener Außen-
widerstandsgeraden für
den Transistor T 3 des
SEG

Die Bedeutung der grafischen Darstellung nach Bild 1.52 liegt darin, daß man damit Verstärkerstufen auf einfache Weise dimensionieren kann, denn die dazu notwendigen Größen sind im Diagramm enthalten bzw. können daraus ermittelt werden. In Verstärkerstufen legt man den Arbeitspunkt oft so, daß die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} etwa halb so groß wie die Betriebsspannung U_B ist. Dazu muß nach Wahl von U_B , I_C und R_a der Basisstrom eingestellt werden. Das geschieht mit einem Widerstand zwischen der Basis und dem positiven Pol der Betriebsspannungsquelle oder einem Basis-Spannungsteiler (Bild 1.50).

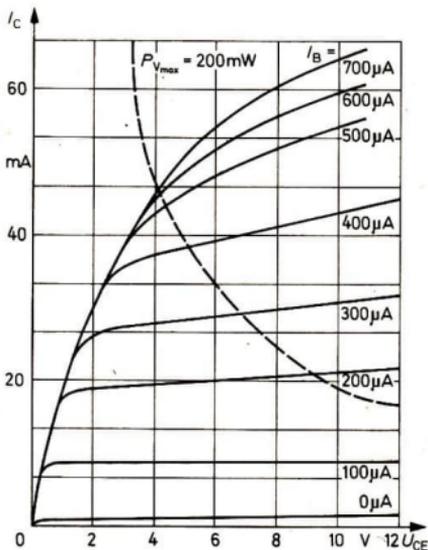


Bild 1.53
Verlustleistungshyperbel

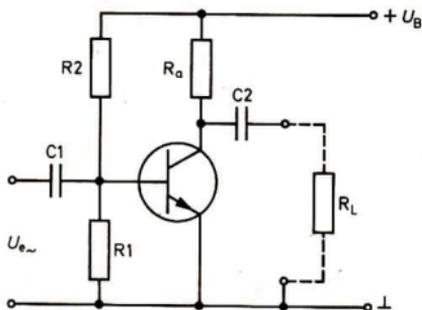


Bild 1.54
RC-Kopplung

Das Produkt aus der Kollektorstromstärke I_C und der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} darf die maximale Verlustleistung $P_{V\max}$ des Transistors nicht übersteigen, da dieser sonst thermisch zerstört würde. Aus der für den jeweiligen Transistortyp festgelegten maximalen Verlustleistung $P_{V\max}$ läßt sich demzufolge für eine bestimmte Spannung U_{CE} der maximal zulässige Kollektorstrom I_C ermitteln. Überträgt man die zugehörigen Wertepaare in das Ausgangskennlinienfeld, so erhält man die Verlustleistungshyperbel (Bild 1.53).

- Tragen Sie in das Ausgangskennlinienfeld des Transistors nach Bild 1.52 den Verlauf der Verlustleistungshyperbel ein, wenn $P_{V\max} = 600 \text{ mW}$ ist!

1.3.4. RC-Verstärker

Bei einer Verstärkerstufe darf nur die zu verstärkende Signalenergie zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes führen. Damit Gleichspannungen und Ohmsche Widerstände keine Arbeitspunktverschiebung hervorrufen, arbeitet man bei Wechselspannungsverstärkern mit der *RC-Kopplung* (Bilder 1.54 und 1.55).

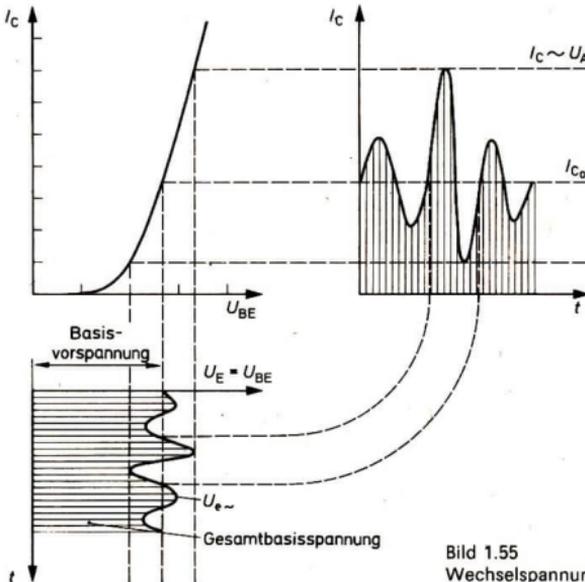


Bild 1.55
Wechselspannungsverstärkung

Am Eingang kann über den Kondensator C_1 nur eine Wechselspannung $U_{e\sim}$ zur Basis gelangen, die vom Transistor verstärkt wird. Mit Hilfe der Basisvorspannung wird der Arbeitspunkt so eingestellt, daß beide Halbwellen der Wechselspannung übertragen werden. Über den Kondensator C_2 wird nach der Verstärkung nur der Wechselspannungsanteil ausgekoppelt, der der Gleichspannung U_{CE} überlagert ist.

Die Kondensatoren bilden mit dem Eingangswiderstand bzw. dem Ausgangswiderstand der Verstärkerstufe einen frequenzabhängigen Spannungsteiler. Dadurch bedingt ist die Verstärkung bei niedrigen Frequenzen kleiner als bei hohen.

- ▼ Bauen Sie einen Verstärker mit der Experimentierschaltung nach Bild 1.56 auf! Legen Sie an den Eingang eine Wechsellspannungsquelle an (Universalgenerator, Kassettenrecorder, Plattenspieler)! Verändern Sie mit Hilfe des Einstellwiderstandes die Einstellung des Arbeitspunktes für den Kollektorruhestrom und kontrollieren Sie am Kopfhörer die Auswirkungen auf die Wiedergabe! Erklären Sie die Vorgänge mit Hilfe des Ausgangskennlinienfeldes!

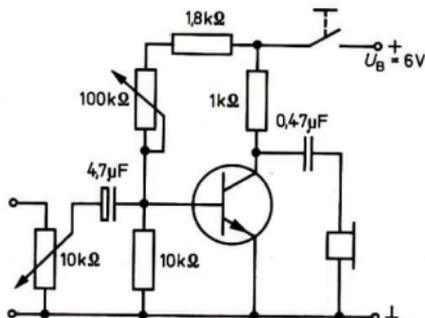


Bild 1.56
RC-Verstärkerschaltung

Der eingestellte günstigste Arbeitspunkt einer RC-Verstärkerstufe muß „festgehalten“ werden und darf sich auch bei thermischen Einflüssen nicht verändern.

1.3.5. Transistor als Schalter

Während bei der Verstärkung der Kollektorstrom in Abhängigkeit von der steuernden Größe proportional geändert wird, soll bei einem elektronischen Schalter eine schlagartige Veränderung zwischen zwei Schaltzuständen erfolgen.

- ▼ Bauen Sie einen elektronischen Schalter mit der Experimentierschaltung nach Bild 1.57 auf! Belichten Sie den Fotowiderstand ständig mit einer Taschenlampe! Unterbrechen Sie den Lichtstrahl mit Gegenständen oder mit der Hand! Messen Sie für die beiden Zustände – Fotowiderstand belichtet/nicht belichtet – die Kollektor-Emitter-Spannung! Erklären Sie daraus das Verhalten der Lichtemitterdiode bei Veränderung des Schaltzustandes!

Bei diesem Experiment gibt es nur zwei Zustände: die Lichtemitterdiode leuchtet oder sie leuchtet nicht. Im Ausgangskennlinienfeld nimmt der Arbeitspunkt entsprechend dem Schaltzustand zwei Lagen ein (Bild 1.58).

Im Punkt 1 (entspricht einem offenen Schalter) ist die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} annähernd gleich der Betriebsspannung und die Kollektorstromstärke I_C fast Null. Im Punkt 2 (entspricht einem geschlossenen Schalter) ist die Kollektor-Emitter-Spannung fast

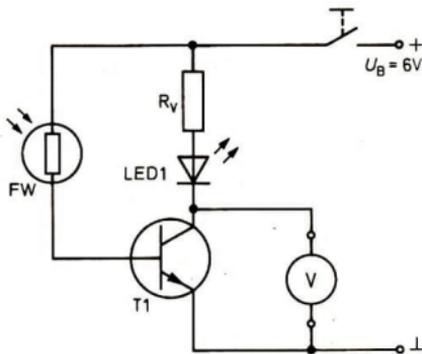
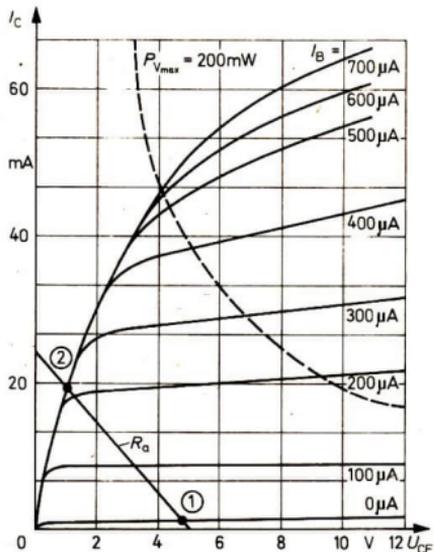


Bild 1.57
Experimentierschaltung zum lichtabhängigen elektronischen Schalter

Bild 1.58
Lage der Arbeitspunkte bei einem Transistor als Schalter



Null, die Kollektorstromstärke wird von der Betriebsspannung und dem Außenwiderstand bestimmt.

- ▼ Bauen Sie zum Vergleich von mechanischem und elektronischem Schalter die Experimentierschaltungen nach Bild 1.59 auf! Ermitteln Sie die Arbeitspunktdaten (U , I) für den offenen und den geschlossenen Schalter und vergleichen Sie diese!

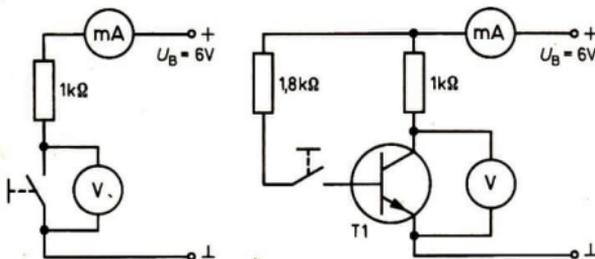


Bild 1.59
Vergleich von mechanischem und elektronischem Schalter

Der Schalter im Basiskreis des Transistors muß kein mechanischer Schalter sein. Die Kontaktgabe kann auf ganz unterschiedliche Weise realisiert werden.

In der chemischen Industrie besteht häufig die Aufgabe, Pumpen in Abhängigkeit des Füllstandes eines Flüssigkeitsbehälters zu steuern.

- Entwerfen Sie eine Schaltung, bei der beim Erreichen eines bestimmten Flüssigkeitsstandes über einen elektronischen Schalter ein Pumpenmotor in Betrieb gesetzt wird! Vergleichen Sie Ihre Schaltung mit Bild 1.60!

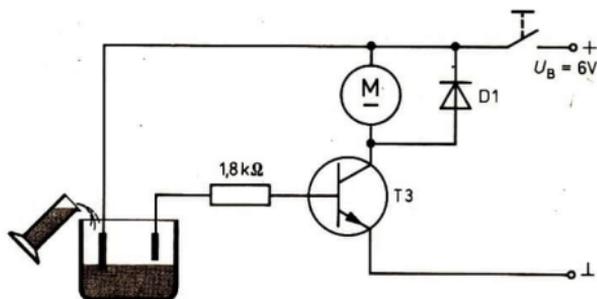


Bild 1.60
Elektronischer Niveau-
standsschalter

- ▼ Bauen Sie einen Niveaustandsschalter experimentell nach Bild 1.60 auf und überprüfen Sie die Funktion! Verwenden Sie als Flüssigkeit Salzwasser! Die Diode schützt den Transistor vor vom Motor ausgehenden hohen Selbstinduktionsspannungen.

1.4. Grundlagen der Digitaltechnik

1.4.1. Einführung

In nahezu allen Bereichen der Gesellschaft werden technische Systeme zur Gewinnung, Übertragung, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung von Informationen eingesetzt. Eine *Information* ist die zielgerichtete Mitteilung über das Eintreten oder die Veränderung eines Zustandes. Informationen sind in Form von Signalen an einen materiellen Träger gebunden. Man unterscheidet die analoge und die digitale Informationsverarbeitung. Bei der *analogen Informationsverarbeitung* kann sich ein Signal zwischen zwei Grenzwerten kontinuierlich ändern. So kann man mit einem Einstellwiderstand als Spannungsteiler beliebige Spannungen zwischen Null und der Betriebsspannung einstellen (Bild 1.61a). Diese Spannung kann mit einem Meßgerät gemessen werden. Der Zeigerausschlag ist der Spannung proportional – es erfolgt eine analoge Signalanzeige.

Der Vorteil der analogen Informationsverarbeitung besteht darin, daß vergleichsweise nur wenige, einfache elektronische Bauelemente benötigt werden. Deshalb arbeiten viele in der Vergangenheit entwickelte Verfahren der Signalverarbeitung und -übertragung (z. B. bei Rundfunk, Fernsehen) analog.

Der Nachteil analoger Verfahren ist die Störanfälligkeit. Bekannt sind die Auswirkungen elektrischer Funken auf den Rundfunk- und Fernsehempfang. Analoge Meßverfahren haben oft keine ausreichende Meßgenauigkeit. Diese Nachteile lassen sich mit der digitalen Informationsverarbeitung nahezu ausschließen. Dazu sind umfangreiche und komplizierte Schaltungen erforderlich. Das ist heute jedoch von geringem Belang, da es möglich ist, solche Schaltungen als integrierte Schaltkreise effektiv herzustellen.

Die dominierenden Bauelemente der analogen Informationsverarbeitung sind Transistoren als Verstärker bzw. Transistoranordnungen in Form integrierter Verstärker. In der digitalen Informationsverarbeitung dominieren Transistoren bzw. Transistoranordnungen als Schalter.

Bei der *digitalen Informationsverarbeitung* kann das Signal nur ganz bestimmte, fest vorgegebene Werte annehmen, Zwischenwerte existieren nicht (Bild 1.61b). Beispiele für die Anwendung der digitalen Informationsverarbeitung sind Taschenrechner, Digitaluhren, Computer und elektronische Steuerungen von Werkzeugmaschinen und Industrierobotern.

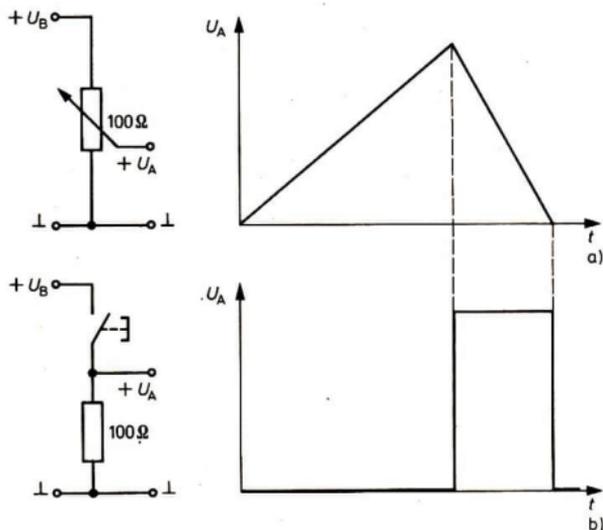


Bild 1.61
Analoges und digitales Signal

In der digitalen Informationsverarbeitung sind binäre Signale am geeignetsten. Das sind solche Signale, die nur zwei Zustände einnehmen können (Stromfluß – kein Stromfluß; Spannung liegt an – Spannung liegt nicht an; Lichtemitterdiode leuchtet – Lichtemitterdiode leuchtet nicht). Systeme dieser Art der Informationsverarbeitung sind die Grundlage der Digitaltechnik. Dabei spielt es keine Rolle, ob die binären Signale durch mechanische Schalter oder durch Halbleiterbauelemente erzeugt werden.

Die beiden Signalzustände (Signalpegel), die ein binäres Signal einnehmen kann, sind

Nullsignal – L (englisch: low – niedrig) und
Einnsignal – H (englisch: high – hoch).

Beide Zustände werden unter dem Begriff Bit (aus englisch: binary digit) zusammengefaßt. Ein Bit kann demzufolge zwei Signalzustände darstellen, entweder L und damit nicht H oder H und damit nicht L. Bei zwei Bit ergeben sich die Kombinationsmöglichkeiten LL, LH, HL und HH, also vier unterschiedliche Informationen. Mit n Bit sind 2^n Kombinationen möglich.

1.4.2. Logische Verknüpfungen

Binäre Signale können nach bestimmten Regeln (logische Funktionen) miteinander verknüpft werden. Dazu dienen Verknüpfungsschaltungen. Zunächst wird die Signalgewinnung und -verknüpfung mit mechanischen Schaltern betrachtet.

Mit einem Schalter kann man einen Stromkreis öffnen oder schließen. Je nach Schalterstellung kann damit an einem im Stromkreis vorhandenen Widerstand eine Spannung anliegen oder nicht. Durch den Widerstand kann ein Strom fließen oder es fließt kein Strom. Mit einem Schalter kann man also in einem Stromkreis zwei Zustände realisieren (binäres System).

- ▼ Bauen Sie zur Realisierung der Schaltzustände die Experimentierschaltungen nach Bild 1.62 auf!

Betätigen Sie in der Schaltung nach Variante a den Taster 1 und beobachten Sie die Lichtemitterdiode!

Führen Sie die gleichen Beobachtungen in der Schaltung nach Variante b bei Betätigung des Tasters 2 durch!

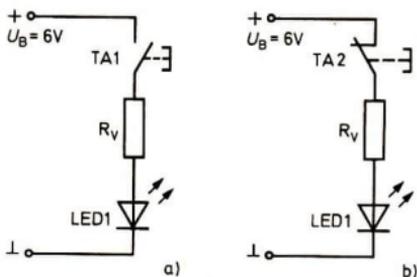


Bild 1.62
Stromkreis mit Schließer (Identität) und Öffner (Negation)

Der Taster stellt den Signaleingang A, die Glühlampe den Signalausgang Q dar. Die beiden möglichen Signalzustände des Schalters und der Lichtemitterdiode (LED) bezeichnet man mit H (Schalter betätigt bzw. LED leuchtet) oder mit L (Schalter nicht betätigt bzw. LED leuchtet nicht). Die möglichen Zustände der Schaltung werden in einer Schaltbelegungstabelle dargestellt (Bild 1.63).

Bei der Schaltung mit dem Schließer besteht Übereinstimmung (Identität). Wenn der Schalter nicht betätigt wird (L), leuchtet die LED nicht (L), wenn der Schalter betätigt wird (H), leuchtet die LED (H). In der Schaltung mit dem Öffner hat der Ausgang den entgegengesetzten Zustand des Eingangs (Negation). Unabhängig von der technischen Realisierung verwendet man einheitliche Symbole (Bild 1.63).

Interessant werden die Verhältnisse, wenn mehrere Schalter miteinander kombiniert werden zu *kombinatorischen Schaltungen*.

- Entwerfen Sie eine Schaltung, bei der nur dann ein H-Signal am Ausgang Q abgegeben wird, wenn an ihren beiden Eingängen A und B gleichzeitig ein H-Signal eingegeben wird!

Führen Sie dazu ein Experiment durch und tragen Sie das Ergebnis in eine Schaltbelegungstabelle ein!

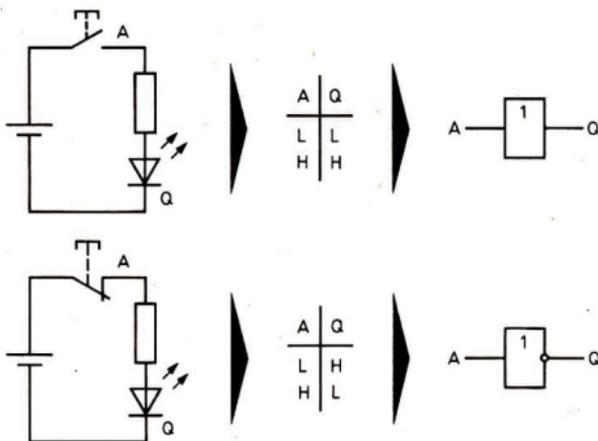


Bild 1.63
Identität und Negation;
Schaltbelegungstabellen
und Symbole

Überlegen Sie, wie die Schaltung verändert werden müßte, damit das Ausgangssignal H immer dann auftritt, wenn am Signaleingang A *oder* B *oder* gleichzeitig an beiden Eingängen als Eingangssignal H auftritt!
Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Bildern 1.64 und 1.65!

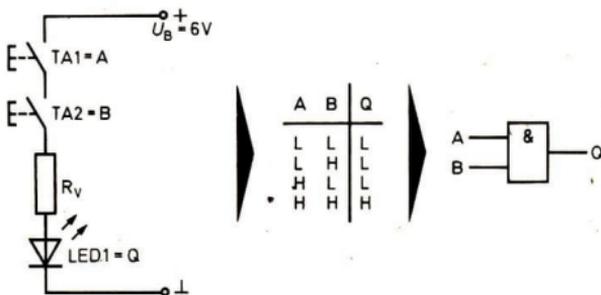


Bild 1.64
UND-Schaltung, Schaltbe-
legungstabelle und Symbol

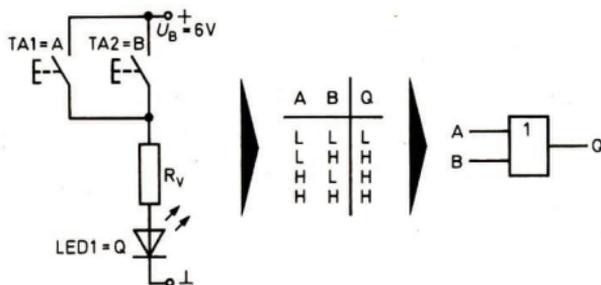


Bild 1.65
ODER-Schaltung, Schaltbe-
legungstabelle und Symbol

In der Schaltung nach Bild 1.64 tritt am Ausgang Q nur dann das Signal H auf, wenn an den Eingängen A und B das Signal H anliegt. Dieses Verhalten entspricht der logischen Funktion *UND* (englisch: AND).

In der Schaltung nach Bild 1.65 tritt am Ausgang Q dann H auf, wenn am Eingang A oder am Eingang B bzw. an beiden Eingängen gleichzeitig H anliegt. Das entspricht der logischen Funktion *ODER* (englisch: OR).

Das Ausgangssignal der UND- und der ODER-Schaltung kann man zusätzlich noch negieren. Dadurch erhält man die *NAND*-Schaltung (NICHT-UND, englisch: NOT-AND) bzw. die *NOR*-Schaltung (NICHT-ODER, englisch: NOT-OR); (Bild 1.66).

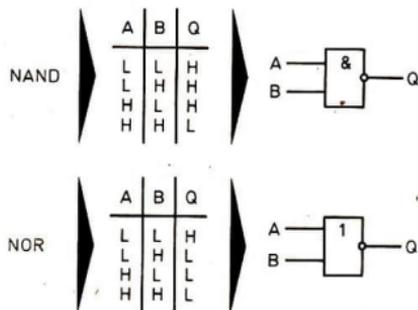


Bild 1.66
Schaltbelegungstabellen und Symbole der NAND- und der NOR-Schaltung

1.4.3. Logische Verknüpfungen mit Transistoren

Die untersuchten logischen Verknüpfungsschaltungen sind die Grundbausteine von Digitalschaltungen. Für die Realisierung der logischen Verknüpfungen in der Mikroelektronik treten an die Stelle der mechanischen Schalter elektronische Schalter (siehe Abschnitt 1.3.5.).

- ▼ Bauen Sie eine elektronische Verknüpfungsschaltung nach Bild 1.67 auf! Verbinden Sie den Eingang A mit dem positiven Pol bzw. mit dem Masseanschluß der Betriebsspan-

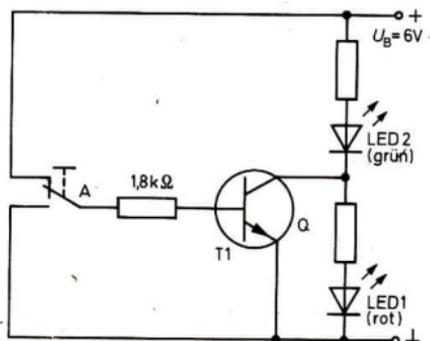


Bild 1.67
Experimentierschaltung zum Negator

nungsquelle! Beobachten Sie das Verhalten der Lichtemitterdioden am Ausgang Q! Tragen Sie die Beobachtungsergebnisse in eine Schaltbelegungstabelle ein und vergleichen Sie diese mit den Tabellen der Experimente mit mechanischen Schaltern!
Dem Leuchten der roten LED wird das Signal H zugeordnet, der grünen das Signal L.

Wird der Eingang A mit dem Pluspol verbunden (H-Pegel), tritt am Ausgang Q ein L-Pegel auf, die rote LED leuchtet nicht. Durch die Verbindung der Basis des Transistors mit dem H-Potential fließt ein Basisstrom, und der Transistor wird geöffnet. Der Spannungsabfall U_{CE} am Transistor ist gering, der Ausgang Q führt gegenüber dem Masseanschluß ein niedriges (low-) Potential (L-Pegel).

Verbindet man den Eingang A mit dem Massepotential (L-Pegel), wird der Transistor gesperrt. Der Spannungsabfall U_{CE} ist hoch, am Ausgang Q tritt H-Pegel auf, die rote LED leuchtet.

Aus der Schaltbelegungstabelle ergibt sich, daß die einfache Transistor-Schaltstufe als Negator arbeitet. Durch Zusammenschalten mehrerer Transistoren lassen sich ebenso wie mit Schaltern kombinatorische Verknüpfungen realisieren.

- ▼ Bauen Sie weitere elektronische Verknüpfungsschaltungen nach den Bildern 1.68 und 1.69 auf! Verbinden Sie die Eingänge entsprechend den möglichen logischen Kombinationen mit dem H- bzw. L-Potential! Fertigen Sie Schaltbelegungstabellen an!

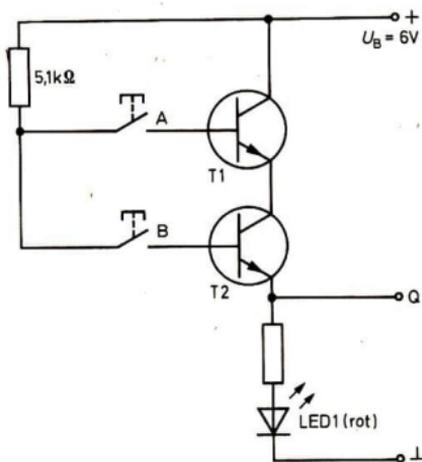


Bild 1.68
UND-Schaltung mit Transistoren

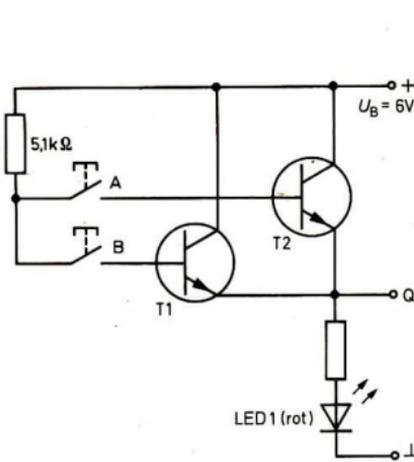


Bild 1.69
ODER-Schaltung mit Transistoren

Das Experiment zeigt, daß sich die UND- bzw. ODER-Schaltung mit zwei Transistoren verwirklichen läßt.

- Überlegen Sie, wie mit Transistoren eine NAND-Schaltung realisiert werden kann! Gehen Sie davon aus, daß eine einfache Transistorschaltstufe wie ein Negator arbeitet! Vergleichen Sie das Ergebnis Ihrer Überlegungen mit der Schaltung in Bild 1.70!

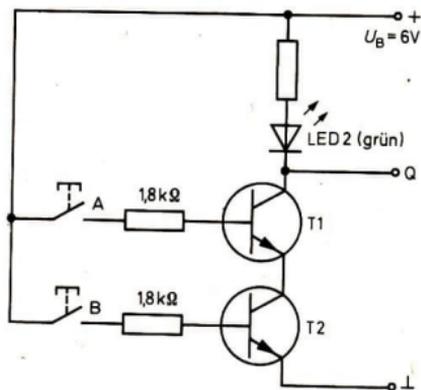


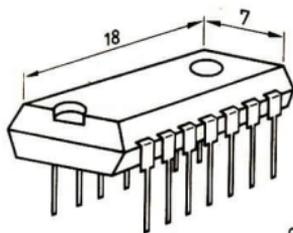
Bild 1.70
NAND-Schaltung mit Transistoren

Elektronische Schaltungen, die die logischen Funktionen UND, ODER, Negation, NAND und NOR realisieren, nennt man *Gatter*. Werden die logischen Funktionen von untereinander kombinierten Transistoren ausgeführt, spricht man von *Transistor-Transistor-Logik*, abgekürzt TTL. Es gibt aber auch andere Logiksysteme, die sich aus der Kombination mit anderen Bauelementen ergeben, wie z. B. die Dioden-Transistor-Logik (DTL) oder die integrierte Injektionslogik (I²L).

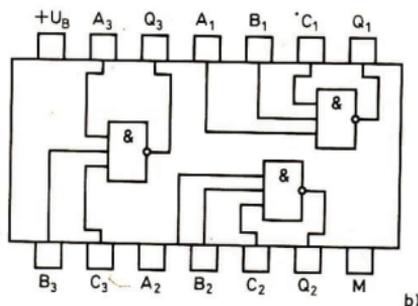
1.4.4. Logische Verknüpfungen mit integrierten Schaltkreisen

Die durchgeführten Experimente zu logischen Verknüpfungen mit Transistoren lassen erkennen, daß die Verwirklichung umfangreicher Schaltungen mit diskreten Bauelementen unzuweckmäßig und materialaufwendig ist.

Allerdings kann man alle logischen Funktionen durch Kombination nur einer Art von Gattern, z. B. von NAND-Gattern, aufbauen. Davon macht man in der Praxis bei *TTL-Schaltkreisen* Gebrauch. Diese integrierten Schaltkreise (IS) enthalten ein Si-Plättchen (Chip),



a)



b)

Bild 1.71
Integrierter Schaltkreis
a) Bauform
b) Anschlußbelegung

das eine Vielzahl von Transistoren, Dioden und Widerständen enthält, die in geeigneter Weise miteinander verbunden sind. Der Chip ist fest in ein Plastgehäuse eingebettet. Die herausgeführten Anschlüsse (Pins oder Stifte) sind den Ein- und Ausgängen der Gatter bzw. der Zuführung von Betriebsspannungen zugeordnet. Die linke Seite des IS ist durch eine Kerbe oder Vertiefung im Gehäuse markiert, um die Zuordnung der Pins zu ermöglichen, wenn man von oben auf das Gehäuse sieht (Bild 1.71).

In Abhängigkeit von dem physikalischen Aufbau der integrierten elektronischen Bauelemente werden auch andere Schaltkreisarten eingesetzt. Dazu gehören insbesondere die MOS-Schaltkreise (englisch: metal oxide semiconductor field effect transistor) und die hochintegrierten CMOS-Schaltkreise (englisch: complementary MOS). In der praktischen Anwendung ergeben sich dabei gegenüber den TTL-Schaltkreisen Unterschiede in den Betriebsspannungen und -strömen und den logischen Pegeln der Signalspannungen. Die nachfolgend betrachteten Schaltungen werden mit TTL-Schaltkreisen ausgeführt. TTL-Schaltkreise benötigen eine Betriebsspannung von $5\text{ V} \pm 5\%$.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung eines IS eine Experimentierschaltung nach Bild 1.72a auf! Messen Sie bei angelegter Betriebsspannung die Spannung an den Gattereingängen und am Ausgang! Bezugspunkt der Spannungsmessungen ist der Masseanschluß der Spannungsquelle.

Messen Sie die Ausgangsspannung eines Gatters, wenn an einem Eingang, am anderen Eingang und an beiden Eingängen gleichzeitig eine Spannung von 5 V anliegt!

Wiederholen Sie das Experiment, wenn die Spannung an den Eingängen 0 V beträgt (Bild 1.72b)!

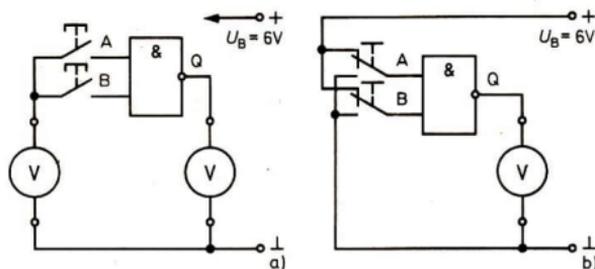


Bild 1.72
Experimentierschaltung
zum integrierten Schalt-
kreis
a) Eingangs- und Aus-
gangsspannungen
b) Pegel offener Eingänge

Die Messungen ergeben folgendes:

1. Sind die Eingänge des TTL-Gatters unbeschaltet, so liegt an den Eingängen eine Spannung $U_e > 2,2\text{ V}$, die Ausgangsspannung beträgt in diesem Fall $U_a < 0,5\text{ V}$ (L-Pegel).
 2. Wird an einen oder an beide Eingänge eine Spannung $2,2\text{ V} < U_e < 5\text{ V}$ angelegt, so ändert sich die Ausgangsspannung nicht.
 3. Wird an einen oder an beide Eingänge eine Spannung $U_e < 0,7\text{ V}$ angelegt, schaltet das Gatter um. Am Ausgang liegt dann eine Spannung von $U_a > 2,4\text{ V}$ (H-Pegel).
- Wie bei den Experimenten mit den Schaltern kann man die Zustände der Ein- und Ausgänge der Gatter in einer Schaltbelegungstabelle darstellen. Nehmen Sie die Schaltbelegungstabelle eines NAND-Gatters auf! Verwenden Sie dazu die Experimentierschaltung nach Bild 1.73!

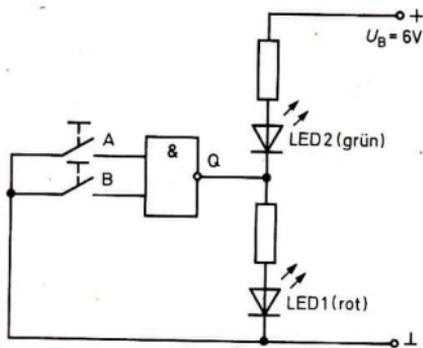


Bild 1.73
Experimentierschaltung zum NAND-Gatter

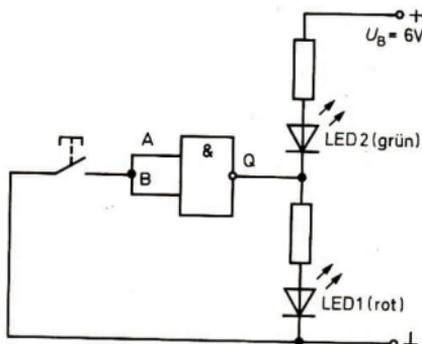


Bild 1.74
Experimentierschaltung zur NICHT-Schaltung
(Negator) mit NAND-Gatter

Verwendet man bei einem NAND-Gatter nur einen Eingang oder schaltet man beide Eingänge parallel, so verhält sich das Gatter wie ein Negator, bei getrennter Beschaltung beider Eingänge erhält man die NAND-Funktion.

- Überprüfen Sie dieses Verhalten mit einer Experimentierschaltung nach Bild 1.74!

In Bild 1.75 ist dargestellt, wie man mit NAND-Gattern die anderen beschriebenen logischen Funktionen aufbauen kann.

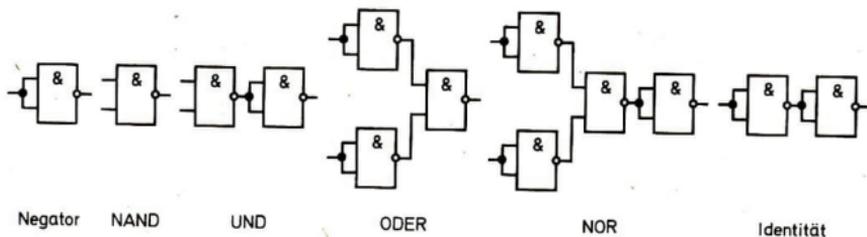


Bild 1.75
Realisierung verschiedener logischer Funktionen mit NAND-Gattern

- ▼ Bauen Sie die verschiedenen Schaltungen nach Bild 1.75 auf und stellen Sie die Schaltbelegungstabellen auf! Die Anzeige des Pegels am Ausgang der Schaltung erfolgt durch Lichtemitterdioden.

Mit einer *Übertragungskennlinie* stellt man den funktionalen Zusammenhang zwischen der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung dar (Bild 1.76).

Aus der Übertragungskennlinie geht hervor, daß das Gatter bei einer Spannung von etwa 1,4 V umschaltet. Da bei dieser Spannung kleinste Schwankungen zu einem unerwünsch-

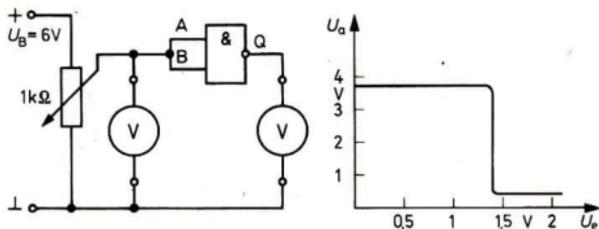


Bild 1.76
Meßschaltung und Übertragungskennlinie eines NAND-Gatters in TTL-Technik

ten Umschalten führen können, muß dafür gesorgt werden, daß diese Spannung mit Sicherheit nicht am Gattereingang anliegt. Um bei TTL-Schaltkreisen eine sichere Unterscheidung und Übertragung der logischen Signale vornehmen zu können, müssen die in Bild 1.77 dargestellten Spannungswerte eingehalten werden.

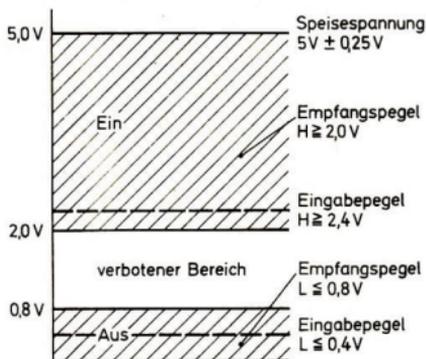


Bild 1.77
Pegel in der TTL-Technik

Die Spannung zwischen 0 V und etwa +0,4 V entspricht dem L-Pegel. Die Spannung über dem Wert von +2,4 V (Betriebsspannung von +5 V) entspricht dem H-Pegel. Das gilt für die Pegel an den Ein- und Ausgängen der Gatter. Da alle Spannungen im positiven Bereich liegen, spricht man von *positiver Logik*.

Bei anderen Logiksystemen, (z. B. in CMOS-Technik) betragen diese Spannungen für H-Pegel 0 bis -2 V und für L-Pegel ab -9 V, also *negative Logik*. Liegen die Spannungswerte der Eingangssignale im „verbotenen Bereich“, muß durch Schaltungsmaßnahmen dafür gesorgt werden, daß sie in einen entsprechenden definierten Signalpegel umgewandelt werden. Dazu wendet man die Triggerschaltung an (siehe Abschnitt 1.4.5.).

1.4.5. Anwendung von NAND-Gattern

Nachdem die Grundfunktionen und die Realisierung logischer Verknüpfungen mit NAND-Gattern bekannt sind, sollen einige Anwendungen untersucht werden.

Triggerschaltung

Mit der Triggerschaltung soll bei einer sich langsam ändernden Eingangsspannung eine sprunghafte Änderung der Ausgangsspannung (Pegel von L nach H bzw. umgekehrt) herbeigeführt werden. Mit dieser sprunghaften Änderung können TTL-Gattereingänge sicher angesteuert werden, so daß der „verbotene Bereich“ nicht berührt wird.

- ▼ Bauen Sie eine Triggerschaltung nach Bild 1.78 auf! Stellen Sie vor dem Anlegen der Betriebsspannung den Schleifer des Einstellwiderstandes so ein, daß der Schaltungseingang auf Massepotential liegt!

Verstellen Sie langsam den Schleifer und beobachten Sie das Meßgerät und die LED am Ausgang der Schaltung!

Bestimmen Sie den Wert der Eingangsspannung, bei dem die LED aufleuchtet bzw. bei dem sie wieder verlischt! Messen Sie die zugehörigen Werte der Ausgangsspannung!

Zwischen der Eingangsspannung, bei der die Triggerschaltung anspricht, und der Eingangsspannung, bei der der Ausgangszustand wieder eingenommen wird, besteht eine Differenz. Der Trigger ist ein elektronischer Schalter mit *Hysterese*, d. h. die Einschaltspannung ist größer als die Abschaltspannung.

- Stellen Sie den Zusammenhang zwischen der Eingangsspannung U_e und der Ausgangsspannung U_a grafisch dar!

Vergleichen Sie Ihr Funktionsbild mit dem Bild 1.79!

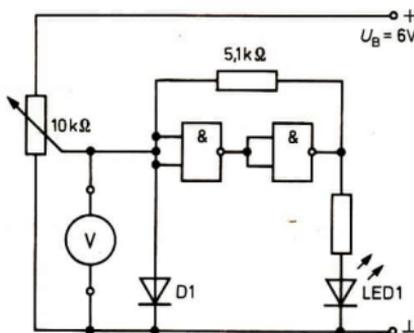


Bild 1.78
Triggerschaltung

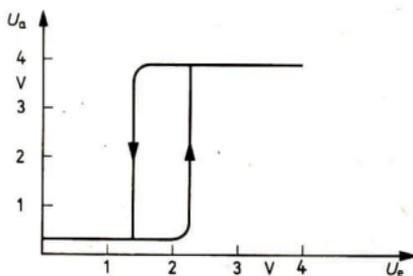
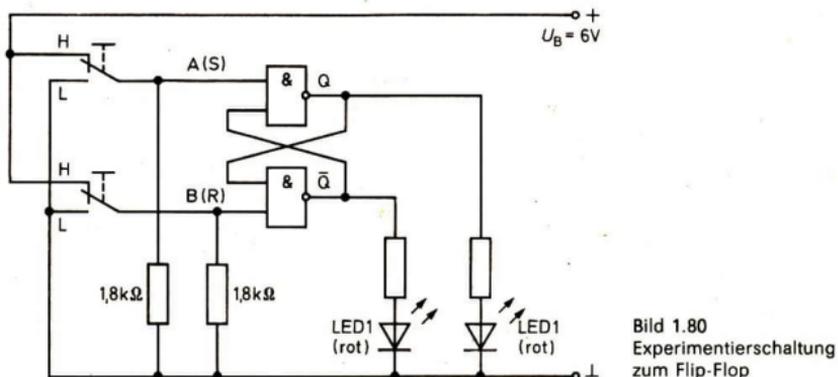


Bild 1.79
Schaltverhalten der Triggerschaltung

RS-Flip-Flop

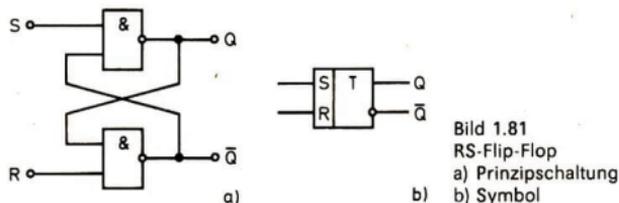
Die bisher untersuchten kombinatorischen Schaltungen haben die Eigenschaft, daß sie nur solange einen Schaltzustand einnehmen, wie auch die zugehörigen Eingangspegel anliegen. In der Digitaltechnik werden aber Schaltungen benötigt, die Eingangssignale speichern und mit nachfolgenden Eingangssignalen verknüpfen können. Ein einfacher elektronischer Speicher ist der *bistabile Multivibrator*, der auch als *Flip-Flop (FF)* bezeichnet wird.

- ▼ Bauen Sie ein Flip-Flop nach Bild 1.80 auf! Legen Sie an die Schaltungseingänge die Pegelkombinationen LL, LH, HL und HH an und beobachten Sie die Lichtemitterdioden! Fertigen Sie nach den Beobachtungsergebnissen eine Schaltbelegungstabelle an!



Bei einem Wechsel des Pegels von einem zum anderen Eingang erfolgt auch eine Veränderung des Zustandes am Ausgang. Ein mehrmaliges Anlegen des gleichen Eingangssignals an einen Eingang ändert jedoch den Schaltzustand nicht, das entsprechende Signal ist gespeichert. Das Flip-Flop kann am gleichen Eingang erst wieder geschaltet werden, wenn es vorher umgeschaltet, d. h. in den Ausgangszustand „zurückgesetzt“ wurde.

Die an den beiden Ausgängen anliegenden Ausgangssignale sind jeweils die Negation des anderen (Q bzw. \bar{Q}). Da die Signale an einem Eingang das Flip-Flop „setzen“ (englisch: set) und am anderen Eingang „zurücksetzen“ (englisch: reset), werden sie mit R und S bezeichnet. Daraus wurde auch die Bezeichnung RS-Flip-Flop für diese Schaltung abgeleitet. Die Prinzipschaltung und das Symbol sind in Bild 1.81 dargestellt.



Diese Schaltung stellt die Grundform eines 1-Bit-Speichers dar. Er hat zwei Eingänge, das Ausgangssignal ist von der zeitlichen Reihenfolge der Eingangssignale abhängig. Am Ausgang Q tritt ein H-Signal auf, wenn am Setzeingang S kurzzeitig ein L-Signal anliegt. Nach dem Aussetzen dieses Signals (Wechsel von L auf H) bleibt das Ausgangssignal solange gespeichert, bis am Rücksetzeingang R kurzzeitig ein L-Signal anliegt. Das Wiederholen des Eingangssignals L hat keine Änderung zur Folge. Das soll durch ein Experiment mit einer Schaltung nach Bild 1.82 nochmals untersucht werden.

- ▼ Bauen Sie ein RS-Flip-Flop nach Bild 1.82 auf! Verbinden Sie mit dem Umschalter die beiden Eingänge der Flip-Flop-Schaltung mit dem L-Potential (Masseanschluß)! Beobachten Sie das Verhalten des Ausgangs Q mit Hilfe der LED! Überlegen Sie, warum diese Schaltung als 1-Bit-Speicher funktioniert, obwohl von außen kein H-Signal zugeführt wird!

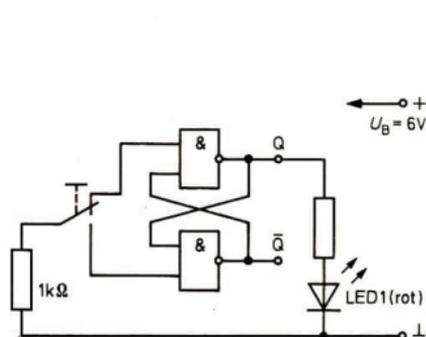


Bild 1.82
Experimentierschaltung zum RS-Flip-Flop mit Umschalter

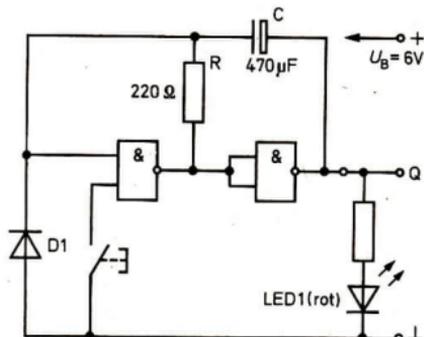


Bild 1.83
Experimentierschaltung zum Impulsgenerator

Impulsgenerator

Die Impulse für das Ansteuern von Schaltkreiseingängen können durch einen *astabilen Multivibrator* erzeugt werden. In Bild 1.83 ist eine Schaltung mit NAND-Gattern dargestellt.

- ▼ Bauen Sie einen Impulsgenerator nach Bild 1.83 auf! Betätigen Sie den Taster und beobachten Sie die LED! Tauschen Sie den Kondensator 470 µF gegen einen Kondensator 4700 µF aus und wiederholen Sie das Experiment!

Am Ausgang der Schaltung erfolgt ein ständiger Wechsel von H- und L-Pegel, solange der Taster geschlossen ist. Durch Veränderung der Kapazität kann die Frequenz dieses Wechsels (Impulsfolge) beeinflusst werden. Das Verhältnis der Zeitdauer von H- und L-Pegel beträgt etwa 1:1.

Die Generatorschaltung besteht aus einer Reihenschaltung von zwei NAND-Gattern, die über den Kondensator rückgekoppelt sind. Durch die Rückkopplung wird eine Selbsterregung der Schaltung ausgelöst. Der zeitliche Ablauf der Vorgänge wird durch das Auf- und Entladen des Kondensators bestimmt. Die Impulsfrequenz ist

$$f \approx \frac{1}{3 \cdot R \cdot C} \quad (f \text{ in kHz, } R \text{ in k}\Omega, C \text{ in } \mu\text{F}).$$

Mit den untersuchten Grundsaltungen Trigger, Multivibrator und Flip-Flop lassen sich viele praktische Anwendungen realisieren.

- Geben Sie je ein praktisches Anwendungsbeispiel für die untersuchten Grundsaltungen an!

2. Elektronik in der Meßtechnik

2.1. Einführung

2.1.1. Messen

Das Messen besitzt in der Produktion wie auch bei vielen Tätigkeiten im täglichen Leben eine große Bedeutung. Mit dem Thermometer mißt man z. B. die Lufttemperatur, mit der Uhr Zeitabstände, beim Fahren mit einem Kraftfahrzeug werden Geschwindigkeit und zurückgelegter Weg gemessen. Forschung und Entwicklung sind eng mit der Meßtechnik verbunden. Auch die Produktionsvorbereitung und Qualitätskontrolle ist ohne moderne Meßtechnik nicht denkbar. Beim Experimentieren mit elektronischen Schaltungen werden ebenfalls Meßgeräte eingesetzt.

Besondere Bedeutung erlangt das Messen im Produktionsprozeß. Hier werden Meßgeräte für die automatische Steuerung von Maschinen und Anlagen eingesetzt. Die MSR-Technik (Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik) ist ein fester Bestandteil der modernen Produktion.

Mit der Anwendung der Elektronik in der Meßtechnik erhöhen sich die Möglichkeiten der Gewinnung, Darstellung und Verarbeitung von Meßwerten beträchtlich. Elektrische und elektronische Meßeinrichtungen sind gegenüber mechanischen meist genauer, variabler im Meßbereich, kleiner und weniger stör anfällig und lassen die direkte Übertragung der Meßwerte an einen anderen Ort zu. Messungen haben das Ziel, Informationen über einen Zustand oder einen Vorgang zu erhalten. Dabei soll die zu erfassende *Meßgröße* eindeutig zahlenmäßig dargestellt werden. Mit Hilfe eines Meßgerätes wird die Meßgröße mit einer festliegenden Normalgröße verglichen. Dazu muß am Meßgerät der *Meßwert* abgelesen werden. Aus den Meßwerten wird das *Meßergebnis* abgeleitet, das eine Aussage über den Sachverhalt darstellt. Die Meßgröße ist im allgemeinen eine physikalische Größe, der Meßwert besteht aus dem Zahlenwert und der Einheit dieser physikalischen Größe.

Mit Hilfe elektronischer Bauelemente und Schaltungen können nichtelektrische Größen mit hoher Genauigkeit, ohne Zeitverzögerung und mit einem optimalen Aufwand gemessen werden. Die nichtelektrische Größe wird dabei durch einen *Meßfühler* in ein elektrisches Signal umgewandelt und durch einen *Meßwandler* so geformt, daß sie an einem Anzeigergerät abgelesen werden kann. In den nachfolgenden Experimenten werden dafür geeignete elektronische Bauelemente und Schaltungen untersucht.

Die beim Messen gewonnenen elektrischen Signale können sich in ihrer Form unterscheiden (Bild 2.1). Die zu gewinnende Information ist im Signal enthalten. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Informationsparameter. Bei einem elektrischen Signal ist der Informationsparameter z. B. die Amplitude, die Frequenz, die Impulsdauer oder die Frequenz der Aufeinanderfolge von Impulsen.

Signale, bei denen der Informationsparameter zwischen den Grenzwerten alle beliebigen Zwischenwerte einnehmen kann, werden als analoge (stetige) Signale bezeichnet. Si-

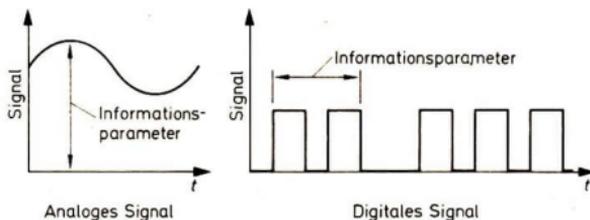


Bild 2.1
Analoges und digitales Signal

gnale, bei denen der Informationsparameter nur zwei diskrete (unstetige) Werte annehmen kann, sind binäre Signale (z. B. Zustand H oder L, siehe Abschnitt 1.4.). Sie ändern sich sprunghaft. Wird die Information erst durch eine Folge von binären Signalen wiedergegeben, so bezeichnet man diese als *digitale* Signale (von englisch: digit – Ziffer). Die digitale Messung hat große Vorteile:

- Möglichkeit der unmittelbaren Darstellung des Meßwertes als Zahlenwert
- höhere Genauigkeit gegenüber der analogen Messung (Bild 2.2)
- Möglichkeit der Verarbeitung der Meßwerte mit Computern.

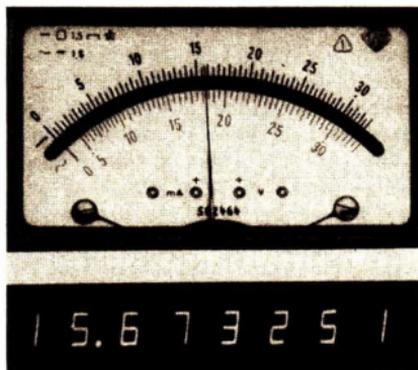


Bild 2.2
Vergleich von analoger und digitaler Anzeige eines Meßwertes

Ein zu messendes analoges Signal muß in eine Impulsfolge zerlegt (quantisiert) werden. Diesen Vorgang bezeichnet man als Analog-Digital-Umsetzung. Das Prinzip wird z. B. bei dem im Physikunterricht eingesetzten Meßgerät „Polydigit“ angewandt.

2.1.2. Steuern und Regeln

Viele Prozesse in der Produktion und in der Technik sind ihrem Ablauf nach automatische Steuerungen (siehe LB ESP, Kl. 10).

Bei einer offenen Steuerung besteht eine feste Beziehung zwischen der Eingangsgröße (steuernde Größe) und der durch sie beeinflussten Ausgangsgröße (gesteuerte Größe).

Veränderungen der Ausgangsgröße haben keine Rückwirkung auf die Eingangsgröße. Der Wirkungsweg ist offen und bildet eine *Steuerkette* (Bild 2.3a).

Die geschlossene Steuerung (Regelung) stellt eine gegenseitige Beziehung zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems her. Innerhalb dieses Systems wird durch ständiges Messen, Vergleichen und Stellen das gewünschte Verhältnis zwischen Ein- und Ausgangsgrößen aufrechterhalten. Der Wirkungsweg ist geschlossen und bildet einen *Regelkreis* (Bild 2.3b).

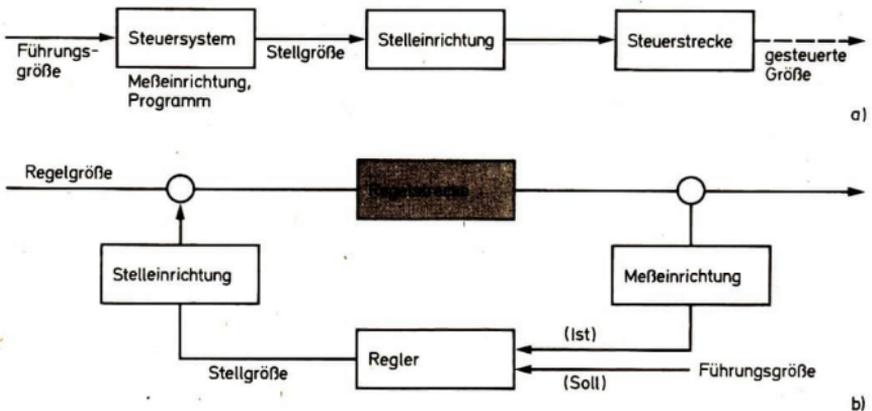


Bild 2.3

a) Steuerkette

b) Regelkreis

Auch der Ablauf in einer Vielzahl der nachfolgenden Experimentierschaltungen kann einer automatischen Steuerung zugeordnet werden. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei das Messen, Erfassen und Vergleichen von Eingangs- und Ausgangsgrößen.

2.2. Elektrische Meßwandler

2.2.1. Thermoelektrische Meßwandler

Die Temperaturmessung ist von großer Bedeutung, da viele physikalisch-technische oder chemisch-technische Prozesse temperaturabhängig sind. Mit Hilfe elektronischer Schaltungen (Meßwandler) können Messungen innerhalb eines großen Temperaturbereiches durchgeführt werden. Außerdem können die Meßstelle und der Ort der Anzeige oder Verarbeitung des Meßwertes räumlich auseinanderliegen, was für moderne Produktionsanlagen sehr wichtig ist. Grundlage jeder elektrischen Messung der Temperatur ist die Umwandlung der Temperatur in eine entsprechende elektrische Signalspannung durch Meßfühler. Einige Meßfühler sollen im folgenden untersucht werden.

Metalldrahtwiderstand als Meßfühler

- Messen Sie den elektrischen Widerstand R einer Kleinglühlampe (z. B. 6 V; 0,3 W) bei unterschiedlichen Stromstärken (z. B. 10 mA bis 50 mA in Schritten von 10 mA) und stellen Sie den elektrischen Widerstand R als Funktion der Stromstärke I grafisch dar! Erläutern Sie das Meßergebnis!

Ein Metalldraht von der Länge l und dem Querschnitt $A = \frac{\pi}{4} d^2$ (d : Drahtdurchmesser)

hat den elektrischen Widerstand $R = \rho \frac{l}{A}$. Eine Materialgröße ist der spezifische Widerstand ρ , bezogen auf $l = 1$ m und $A = 1$ m². Die Einheit ist $[\rho] = \Omega \cdot \text{m}$. Der Widerstand wird mit steigender Temperatur größer (Bild 2.4a). Dieses Verhalten kann man sich am folgenden Modell verdeutlichen (Bild 2.4b): Unter dem Einfluß einer äußeren elektrischen Spannung treiben freibewegliche Elektronen im Metall wie ein Gas durch ein Gitter von Atomrümpfen, die elastisch miteinander gekoppelt sind. Diese führen Schwingungen aus, die um so stärker werden, je höher die Temperatur ist. Dadurch wird die Driftbewegung der Elektronen zunehmend behindert, der Widerstand steigt an.

Die Widerstandskennlinie in Bild 2.4a wird in einem kleinen Temperaturbereich ϑ_1 bis ϑ_2 (z. B. 0°C bis 100°C) als angenäherte Gerade durch die Formel

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \vartheta)$$

beschrieben. Darin ist R_0 der Widerstand bei 0°C und ϑ die angenommene Temperatur in °C. Der Temperaturkoeffizient α (in K⁻¹) gibt an, um welchen Bruchteil sich der Widerstand bei 1 K Temperaturunterschied ändert: $\frac{\Delta R}{R} = \alpha \cdot \Delta \vartheta$.

In der nachfolgenden Tabelle werden spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient für einige Metalle angegeben.

In der nachfolgenden Tabelle werden spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient für einige Metalle angegeben.

Tabelle: Spezifischer Widerstand ρ und Temperaturkoeffizient α einiger Metallwiderstände

Stoff	ρ in $10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$	α in 10^{-3}K^{-1}
Ag	0,016	3,77
Cu	0,017	3,80
Al	0,028	3,90
Fe	0,10	6,57
Ni	0,087	4,65
Manganin (86 Cu, 2 Ni, 12 Mn)	0,43	0,01
Konstantan (54 Cu, 45 Ni, 1 Mn)	0,50	0,03
Chromnickel B (60 Ni, 22 Fe, 18 Cr)	1,11	0,25

Die Stoffe Manganin, Konstantan und Chromnickel besitzen einen großen spezifischen Widerstand und einen besonders geringen Temperaturkoeffizienten. Diese Materialien

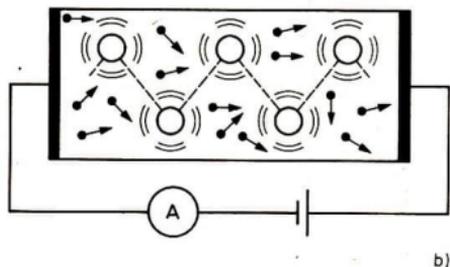
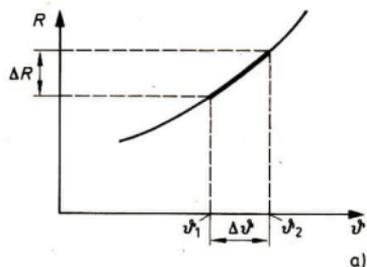


Bild 2.4
Temperaturabhängigkeit eines Metallwiderstandes
a) Widerstandskennlinie
b) Leitungsmodell mit Gitterschwingungen

werden als Widerstandsdrähte eingesetzt. Drahtwiderstände sind meist mit Konstantan gewickelt.

Die Metallwiderstände haben einen positiven Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes (ansteigende Widerstandskennlinie), abgekürzt als TP-Widerstände bezeichnet.

Thermistor als Meßfühler

Thermistoren sind keramische Halbleiterwiderstände.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung der Wirkungsweise eines Thermistors eine Experimentierschaltung nach Bild 2.5 auf! Betätigen Sie kurzzeitig den Taster im Stromkreis des Heizwiderstandes und beobachten Sie das Meßgerät! Setzen Sie diese Beobachtung auch nach dem Öffnen des Tasters fort! Welche Schlußfolgerungen ziehen Sie aus dem Ergebnis?

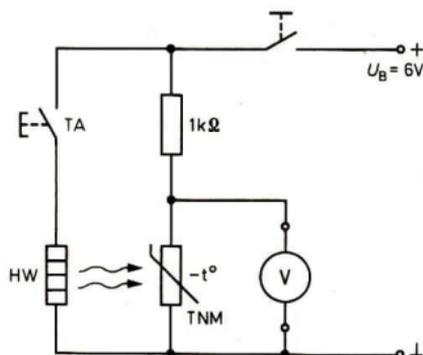


Bild 2.5
Experimentierschaltung zum Thermistor

Der elektrische Widerstand eines Halbleiters wird im Gegensatz zu Metallen mit ansteigender Temperatur geringer (Bild 2.6a). Dieses Verhalten läßt sich mit dem in Bild 2.6b dargestellten Modell erklären (siehe auch Abschnitt 1.2.5.). Im Halbleiter sind von vorn-

herein keine freien Leitungselektronen vorhanden. Sie werden erst durch die Schwingungsenergie der Gitteratome freigesetzt. Dabei entstehen Leerstellen (Defektelektronen) auf den Bindungsarmen. Je höher die Temperatur, um so mehr Elektronen werden freigesetzt und um so kleiner wird der elektrische Widerstand.

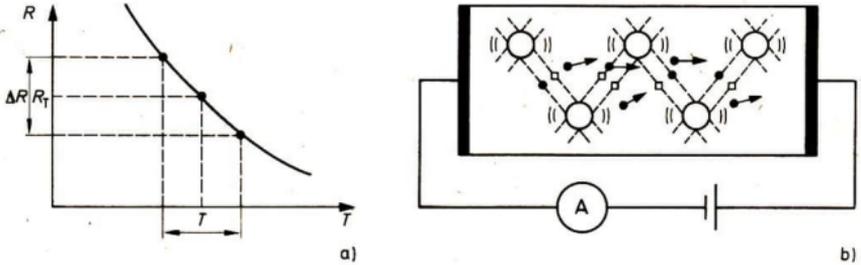


Bild 2.6
 Temperaturabhängigkeit von Halbleiterwiderständen
 a) Widerstandskennlinie
 b) Leitungsmodell mit Atomgitter, Elektronen und Defektelektronen

Die Widerstandskennlinie in Bild 2.6a kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\frac{\Delta R}{R_T} = - \frac{b}{T} \cdot \frac{\Delta T}{T}$$

T ist die absolute Temperatur (in K). Der Temperaturkoeffizient ist hier negativ (fallende Kennlinie). Solche Halbleiterwiderstände nennt man daher abgekürzt TN-Widerstände.

- ▼ Bauen Sie zur Aufnahme der Kennlinie eines Thermistors eine Experimentierschaltung nach Bild 2.7a auf! Bestimmen Sie durch schrittweises Erhöhen der Betriebsspannung U_B von 1...6 V die Wertepaare für Spannung und Stromstärke! Stellen Sie die Beziehung $I = f(U)$ grafisch dar! Vergleichen Sie das Ergebnis mit Bild 2.7b!

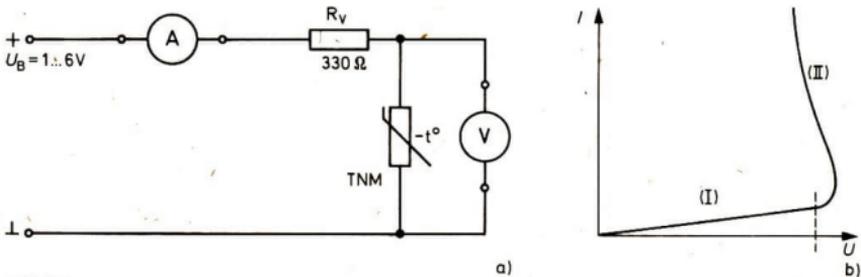


Bild 2.7
 a) Experimentierschaltung zur Kennlinienaufnahme des Thermistors
 b) Strom-Spannungs-Kennlinie des Thermistors

Über das Verhalten eines Thermistors gibt die Strom-Spannungs-Kennlinie Aufschluß (Bild 2.7b). Diese Kennlinie besteht aus zwei Bereichen, dem Bereich der Fremderwärmung (Bereich I) und dem Bereich der Eigenerwärmung (Bereich II).

Die Meßschaltung muß immer einen Vorwiderstand R_v enthalten. Im Bereich I (bei geringer Stromstärke) ist der Widerstand nahezu unabhängig von der Stromstärke und nur durch äußere Wärmezufuhr zu beeinflussen. In diesem Bereich wird der Thermistor als Meßfühler eingesetzt. Im Bereich II erwärmt sich der Thermistor durch die höhere Stromstärke selbst. Dadurch verringert sich sein Widerstand, wodurch die Stromstärke noch weiter ansteigt. Schließlich wird der Thermistorstrom nur noch durch den Vorwiderstand begrenzt. Der Bereich der Eigenerwärmung wird bei Regelungsschaltungen angewendet.

Thermoelement als Meßfühler

Ein Thermoelement besteht aus zwei miteinander direkt in Kontakt gebrachten (verschweißten) Metalldrähten unterschiedlichen Materials, die sich im Temperaturkoeffizienten stark unterscheiden.

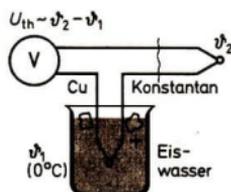


Bild 2.8 Prinzip des Thermoelements

Besteht zwischen beiden Verbindungsstellen eine Temperaturdifferenz $\vartheta_2 - \vartheta_1$, so ist am Meßgerät eine elektrische Spannung, die sogenannte Thermospannung, abzulesen (Bild 2.8). Diese entsteht durch die unterschiedliche Beweglichkeit der freien Leitungselektronen in beiden Metallen. Um relativ große Thermospannungen zu erhalten, wählt man Metalle mit möglichst großem Unterschied an Elektronenbeweglichkeit. Die nachfolgende Tabelle nennt dazu einige Beispiele.

Tabelle: Thermospannungen einiger Metallkombinationen als Thermoelemente in mV

ϑ in $^\circ\text{C}$	Kupfer und Konstantan	Eisen und Konstantan	Chromnickel und Konstantan	Platin-Rhodium und Platin
-100	- 4,30	- 4,60		
- 50	- 1,85	- 2,45		
0	0	0	0	0
50	2,05	2,65	3,06	0,299
100	4,25	5,37	6,21	0,643
200	9,20	10,95	13,30	1,436
300	14,89	16,55	20,96	2,316
400	20,99	22,15	28,74	3,251
500	(27,40)	27,84	36,75	4,331

Thermoelemente sind relativ leicht herzustellen und besonders für die Messung hoher Temperaturen (z. B. Schmelztemperatur von Blei oder Fließtemperatur von Glas) geeignet. Für Präzisionsmessungen und Temperaturen bis 1300°C werden Platin-Rhodium-Thermoelemente eingesetzt. Das Thermoelement ist gegenüber den bisher betrachteten Meßfühlern ein aktives Element, da es ein elektrisches Signal ohne äußere Versorgungsenergie erzeugt. Die Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperatur zeigt Bild 2.9.

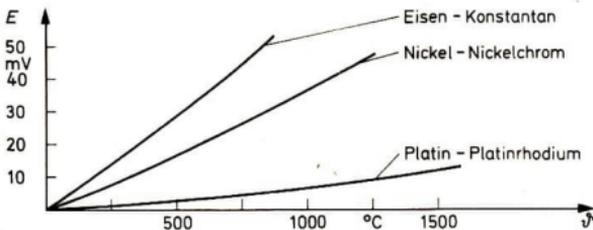


Bild 2.9 Thermospannung verschiedener Thermoelemente

Halbleiterdiode als Meßfühler

Im folgenden Experiment soll untersucht werden, wie die Temperaturabhängigkeit der Vorgänge in Halbleiter-Grenzschichten zur elektrischen Temperaturmessung ausgenutzt werden kann.

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung nach Bild 2.10 auf! Bestimmen Sie nach dem Anlegen der Betriebsspannung die Stromstärke! Fassen Sie die Diode fest zwischen Daumen und Zeigefinger und beobachten Sie das Meßgerät! Lassen Sie die Diode wieder los und beobachten Sie weiter! Erklären Sie die Beobachtungen!

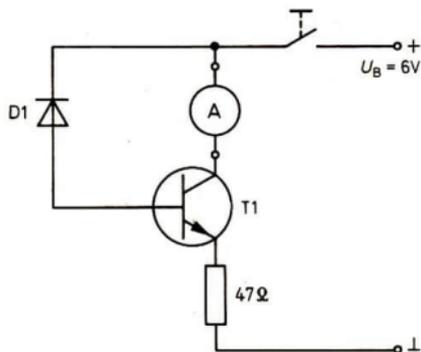


Bild 2.10 Experimentierschaltung zum Temperaturverhalten einer Halbleiterdiode

Der Sperrstrom einer Halbleiterdiode steigt exponentiell mit der Temperatur an. Das gleiche trifft für den Kollektorreststrom eines Transistors bei offener Basis zu. Der höhere Sperrstrom, den die Diode bei der Erwärmung im Experiment erreicht, ist gleichzeitig der Basisstrom des Transistors. Dadurch erhöht sich auch der Kollektorstrom, der durch das

Meßgerät angezeigt wird. Eine direkte Messung der Veränderungen des Sperrstromes ist mit dem Schülervielfachmeßgerät Polytest 1 W nicht möglich (siehe Abschnitt 1.2.5.). Halbleiterdioden und Transistoren sind besonders als Meßfühler für die Messung von Zimmertemperaturen geeignet. Der Temperaturkoeffizient der Veränderung des Sperrstromes liegt bei 6 bis 10% je °C und ist damit wesentlich höher als die Empfindlichkeit anderer Meßfühler.

2.2.2. Optoelektronische Meßwandler

Während mit einem thermoelektrischen Meßwandler die Temperatur als Meßgröße erfaßt wird, muß ein optoelektronischer Meßwandler Informationen über Helligkeit und Farbe, das heißt über Intensität und Wellenlänge des Lichtes liefern. Dazu dienen Bauelemente aus lichtempfindlichem Halbleitermaterial.

Beim Auftreffen von Licht auf solches Material erhöht sich infolge der Energiezufuhr die Anzahl der wanderungsfähigen Elektronen (Bild 2.11). Dieser Vorgang vollzieht sich jedoch bei verschiedenen Wellenlängen des Lichtes unterschiedlich. Die in den Experimenten zur Untersuchung der optoelektronischen Strahlungsempfänger auszuführenden Messungen wurden deshalb auf relative Vergleiche bzw. qualitative Anzeigen beschränkt. Optoelektronische Strahlungsempfänger sind Bauelemente, die ihr elektrisches Verhalten bei Lichteinwirkung verändern.

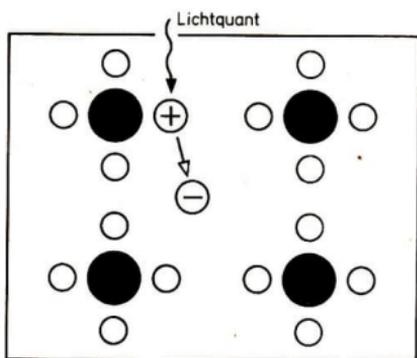


Bild 2.11
Freisetzung wanderungsfähiger Elektronen durch Licht

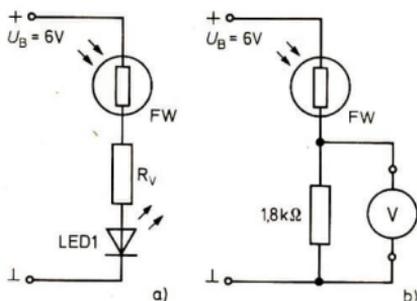


Bild 2.12
Experimentierschaltungen zum Fotowiderstand

Fotowiderstand

Ein Fotowiderstand ist ein Halbleiterwiderstand, der meist aus einem Trägermaterial (Glas oder Keramik) besteht, auf das Cadmiumsulfid-Pulver aufgedampft wurde.

- Bauen Sie zur Untersuchung der Wirkungsweise eines Fotowiderstandes eine Experimentierschaltung nach Bild 2.12a auf! Verdunkeln Sie vor dem Anlegen der Betriebsspannung

den Fotowiderstand mit der Hand! Beobachten Sie das Verhalten der Schaltung bei unterschiedlicher Belichtung des Fotowiderstandes! Wiederholen Sie den Versuch nach Umpolung der Spannungsquelle und der Lichtemitterdiode!

Welche Schlußfolgerungen ziehen Sie aus den Beobachtungen? Bestimmen Sie in einer Experimentierschaltung nach Bild 2.12b den Spannungsabfall bei unterschiedlicher Belichtung des Fotowiderstandes!

Der elektrische Widerstand des Fotowiderstandes verändert sich in Abhängigkeit von der Belichtung, und damit ändert sich auch die Stromstärke in der Experimentierschaltung. Durch Belichtung werden im Halbleitermaterial wanderungsfähige Elektronen erzeugt, die bei wachsender Beleuchtungsstärke zu einer vergrößerten Leitfähigkeit und damit zu einer höheren Stromstärke führen. Dieser Vorgang ist unabhängig von der Polarität der anliegenden Spannung. Fotowiderstände können als bipolare Bauelemente deshalb in Gleich- und Wechselstromkreisen eingesetzt werden. Für Messungen wird ein den lichtabhängigen Stromstärkeänderungen entsprechender Spannungsabfall genutzt. Wichtigste Betriebswerte sind die höchstzulässige elektrische Leistung und die höchstzulässige Spannung. Die Leistung gebräuchlicher Fotowiderstände liegt zwischen 100 mW und 200 mW. Charakteristische Daten sind der Dunkelwiderstand R_D bei 0 lx (zwischen 1 M Ω und 10 M Ω) und der Hellwiderstand R_H , meist definiert für $E = 1000$ lx (zwischen 0,5 k Ω und 5 k Ω); lx ist die Einheit der Beleuchtungsstärke.

Die aus Cadmiumsulfid gefertigten Fotowiderstände haben eine hohe Empfindlichkeit im sichtbaren Bereich des Lichtes (Bild 2.13). Sie besitzen eine hohe Ansprechempfindlichkeit, reagieren aber sehr träge gegenüber Änderungen der Beleuchtungsstärke. Sie sind bis etwa 100 Hz einsetzbar.

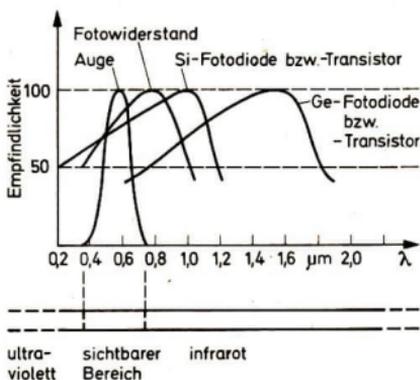


Bild 2.13
Ansprechempfindlichkeit optoelektronischer
Strahlungsempfänger

Fotodiode

Die Tatsache, daß die Lichteinwirkung auf die Sperrschicht einer in Sperrrichtung gepolten Diode den Sperrstrom erhöht, wird bei Fotodioden genutzt. Sie werden aus Silicium gefertigt.

Fotodioden werden stets in Sperrrichtung betrieben (Bild 2.14a). Betriebswerte sind die

maximale Sperrspannung U_R (meist bis 25 V) und die Sperrstromstärke I_R bei $E = 1000 \text{ lx}$ ($10 \mu\text{A}$ bis $50 \mu\text{A}$, typabhängig).

Fotodioden reagieren fast trägheitslos auf Änderungen der Beleuchtungsstärke. Ihr Empfindlichkeitsmaximum liegt im Infrarotbereich (Bild 2.13).

Fotodioden können ohne Spannungsquelle wie ein Fotoelement wirken. Bei großer Beleuchtungsstärke wird eine Spannung bis zu 0,4 V erzeugt, die mit einem Spannungsmesser nachweisbar ist (Bild 2.14b). Fotoelemente bilden die Grundlage für Solarzellen.

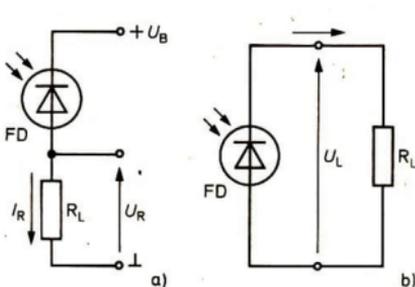


Bild 2.14 Fotodiode

- a) Schaltung als Diode in Sperrrichtung
b) Schaltung als Fotoelement

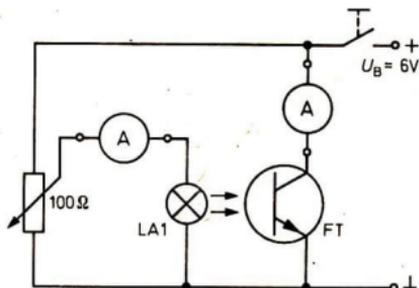


Bild 2.15

Experimentierschaltung zum Fototransistor

Fototransistor

Beim Fototransistor wirkt die Basis-Kollektor-Strecke wie eine Fotodiode, deren Strom vom Transistor verstärkt wird. Dadurch wird die Ansprechempfindlichkeit gegenüber der Fotodiode vergrößert.

- Bauen Sie zur Untersuchung der Wirkungsweise eines Fototransistors eine Experimentierschaltung nach Bild 2.15 auf! Die Lichtquelle (Glühlampe) wird so angeordnet, daß das Licht möglichst vollständig auf den Fototransistor fällt. Ermitteln Sie für einen Lampenstrom I_L von 10; 20; 30 und 40 mA die Stromstärke I_C des Kollektorstromes! Stellen Sie den Zusammenhang $I_C = f(I_L)$ grafisch dar!

Aus dem Experiment ergibt sich, daß der Stromfluß des Fototransistors von der Beleuchtungsstärke abhängt. Der Zusammenhang zwischen I_L und I_C ist jedoch bei Verwendung einer Glühlampe als Lichtquelle nicht linear.

Die Betriebswerte einer Schaltung mit Fototransistor richten sich nach dem Grenzwert der zulässigen Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} (bis 30 V), der Gesamtverlustleistung $P_{C \max} = U_{CE} \cdot I_C$ (50 mW bis 100 mW, typabhängig) und der Kollektorstromstärke I_C bei $U_{CE} = 5 \text{ V}$ und $E = 1000 \text{ lx}$ (1 mA bis 2 mA), je nach Stromverstärkungsgruppe und Transistortyp.

Fototransistoren haben eine hohe Ansprechempfindlichkeit und reagieren schnell auf Änderungen der Beleuchtungsstärke. Sie sind aus Silicium oder Germanium gefertigt und haben einen dementsprechenden Ansprechbereich (Bild 2.13).

2.2.3. Überblick über weitere Meßwandler

Außer thermoelektrischen und optoelektronischen Meßwandlern gibt es noch Meßwandler zur Messung weiterer physikalischer Größen wie Länge oder Kraft.

Dehnungsmeßwandler

Mit dem Dehnungsmeßwandler (DMW) werden Längenänderungen elektrisch gemessen. Dieser Meßwandler besteht aus einem mehrfach parallel gelegten Widerstandsdraht, der in eine Plastfolie eingebettet ist. Bekanntlich hängt der elektrische Widerstand eines Drahtes von seiner Länge ab ($R \sim l$). Wird der Draht gedehnt, so erhöht sich sein Widerstand, wird er gestaucht, so verringert er sich. Will man z. B. die Durchbiegung eines Stabes messen, so wird je ein DMW auf die Oberseite (Dehnung) und auf die Unterseite (Stauchung) geklebt. Beide werden in einer Meßschaltung (Widerstandsmeßbrücke) miteinander verbunden. Der Brückenstrom I_B , der im Bedarfsfall noch verstärkt werden muß, ist der elektrische Wert für die Durchbiegung (Bild 2.16).

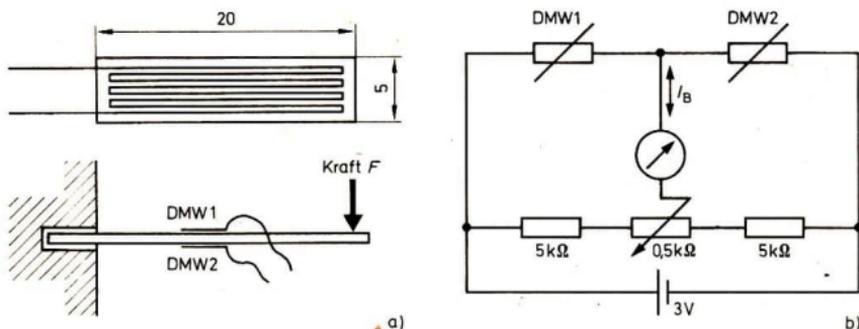


Bild 2.16 Dehnungsmeßwandler
a) prinzipieller Aufbau und Prinzipskizze zum Messen der Durchbiegung
b) Schaltung

Piezoelektrischer Meßwandler

Ein piezoelektrischer Meßwandler besteht aus einem Kristallplättchen, das auf beiden Seiten mit einem Metallbelag versehen ist. Gebräuchliche Kristallwerkstoffe dafür sind Quarz (Siliciumdioxid) und Seignettesalz (Kalium-Natrium-Salz der Weinsäure). Die Plättchen werden aus einem Einkristall in einer bestimmten Richtung zur Kristallorientierung geschnitten (Bild 2.17a).

Der piezoelektrische Effekt beruht darauf, daß zwischen den Oberflächen des Kristallplättchens eine elektrische Spannung entsteht, wenn auf das Plättchen eine Kraft wirkt. So kann man auf elektrischem Wege eine Kraft bzw. einen Druck messen (Bild 2.17b).

Interessant ist noch die Umkehrbarkeit des piezoelektrischen Effekts: Wird an die Elektroden des Kristallplättchens eine elektrische Spannung angelegt, so verändert sich die Dicke des Plättchens (Bild 2.18). Legt man eine Wechselspannung an, so führt der Kristall

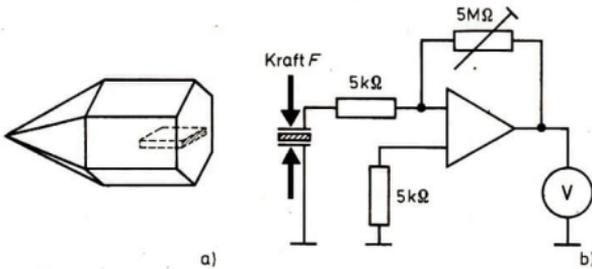


Bild 2.17
Piezoelektrischer Meß-
wandler
a) Schnittfläche in einem
Quarz-Einkristall
b) Meßschaltung für eine,
Druckmessung

mechanische Schwingungen aus. Dabei entsteht bei einer bestimmten, scharf ausgeprägten Frequenz Schwingungsresonanz. Diese, als Schwingquarze bezeichneten Bauelemente werden beim Aufbau von Generatoren mit stabilisierter Schwingungsfrequenz eingesetzt. Solche Generatoren benötigt man z. B. in elektronischen Uhren oder in Sendergeräten der Funktechnik.

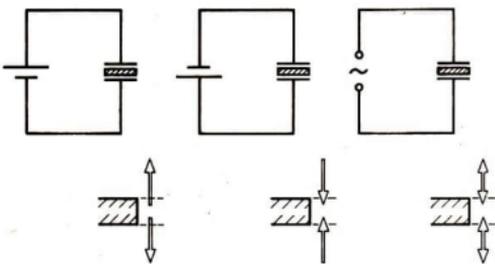


Bild 2.18
Umgekehrter piezoelektrischer Ef-
fekt

2.3. Relais

2.3.1. Elektromechanisches Relais

Zum indirekten Schalten eines Stromkreises wird in vielen Fällen noch das elektromechanische Relais eingesetzt. Sein Vorteil besteht vor allem darin, daß über seine metallischen Kontakte Gleichströme beliebiger Polarität sowie Wechselströme bei relativ hohen Leistungen geschaltet werden können.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des elektromagnetischen Verhaltens eines Relais eine Experimentierschaltung nach Bild 2.19 auf! Der Schleifer des Einstellwiderstandes soll zunächst am Masseanschluß anliegen. Erhöhen Sie langsam die Spannung durch Verstellen des Schleifers so lange, bis der Relaisanker gerade angezogen wird! Lesen Sie die zugehörige Stromstärke ab!

Stellen Sie danach den Schleifer langsam so lange wieder in Richtung Masseanschluß, bis der Relaisanker gerade abfällt und bestimmen Sie die zugehörige Stromstärke!

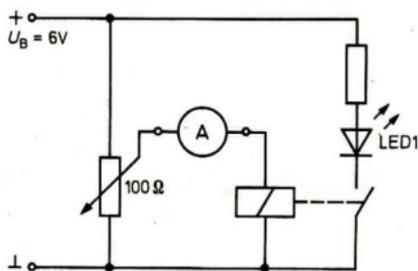
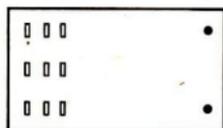


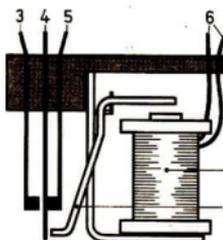
Bild 2.19
Experimentierschaltung zur Anzugs- und Abfallstromstärke eines Relais

Bild 2.20 Relais

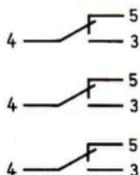
- a) Sockel
- b) Grundaufbau
- c) Schaltzeichen eines Relais mit drei Kontaktpaaren



a)



b)



c)

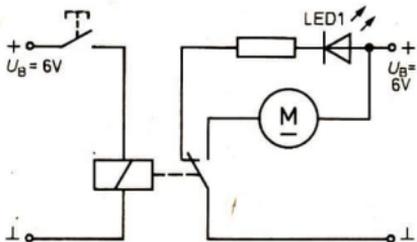
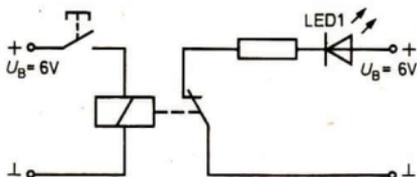
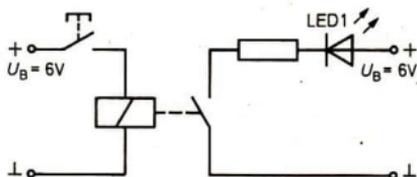


Bild 2.21
Experimentierschaltungen zum elektromechanischen Relais

Kernstück des Relais ist eine Spule mit Eisenkern (1), die bei Stromfluß ein Magnetfeld erzeugt. Weiter ist ein beweglich angeordneter Relaisanker (2) vorhanden, eine Schalterfeder (4), ein Ruhestromkontakt (5) und ein Arbeitsstromkontakt (3). Wird eine bestimmte Stromstärke erreicht, so wird der Relaisanker von dem magnetisierten Eisenkern angezogen und durch Hebelwirkung die Schalterfeder vom Ruhestromkontakt gelöst und an den Arbeitsstromkontakt gedrückt. Der Restmagnetismus des Spulenkerns bewirkt, daß der Relaisanker bei Verringerung des Spulenstromes noch festgehalten wird und erst bei einer kleineren Stromstärke abfällt.

- ▼ Bauen Sie zur Darstellung der Schaltmöglichkeiten nacheinander die Experimentierschaltungen nach Bild 2.21 auf! Betätigen Sie den Taster im Steuerstromkreis des Relais und beobachten Sie die Auswirkungen im gesteuerten Stromkreis!

Das Relais arbeitet als binärer Schalter. Mit seiner Hilfe können Stromkreise ein-, aus- und umgeschaltet werden. Dabei sind der steuernde und der gesteuerte Stromkreis gal-

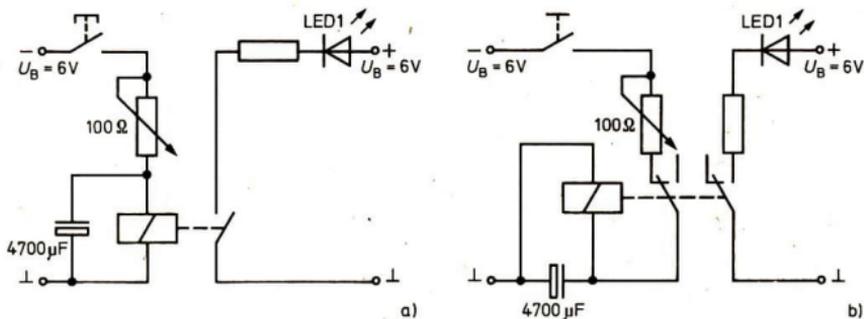


Bild 2.22 Relaischaltungen
a) Zeitschalter
b) Taktgenerator

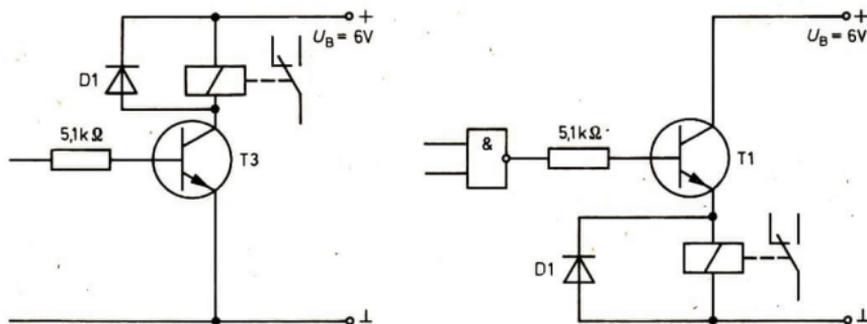


Bild 2.23 Anschalten eines elektromechanischen Relais an einen Transistor und an einen TTL-Schaltkreis

vanisch voneinander getrennt. Durch das Zusammenwirken mit anderen elektronischen Bauelementen können mit Relais auch Zeitschalter und Taktgeneratoren realisiert werden (Bild 2.22).

- Überlegen Sie, wie durch das Zusammenschalten von Relais ein- und -ausgängen die im Abschnitt 1.4. dargestellten kombinatorischen logischen Schaltungen realisiert werden können!

Der Ausgang eines Transistor- oder Schaltkreisverstärkers wird in der Praxis oft mit einem elektromechanischen Relais verbunden, um größere Leistungen schalten zu können. Typische Beispiele für derartige Schaltungen sind im Bild 2.23 dargestellt.

2.3.2. Elektronische Relais

Grundschaltungen

Das elektromechanische Relais schaltet erst bei einer bestimmten Stromstärke. Es ist ein *Schwellwertschalter*. Es wurde festgestellt, daß das Relais angezogen bleibt, wenn die Spulenstromstärke diesen Schwellwert unterschreitet und es erst bei einer geringeren Stromstärke abfällt. Es besitzt eine *Hysterese* (Hysterese: Fortbestehen einer Wirkung nach Aufhören der Ursache). Einen Schwellwertschalter mit Hysterese kann man auch mit elektronischen Bauelementen realisieren.

Ein einfacher Schwellwertschalter ist das NAND-Gatter, das im Abschnitt 1.4. bereits un-

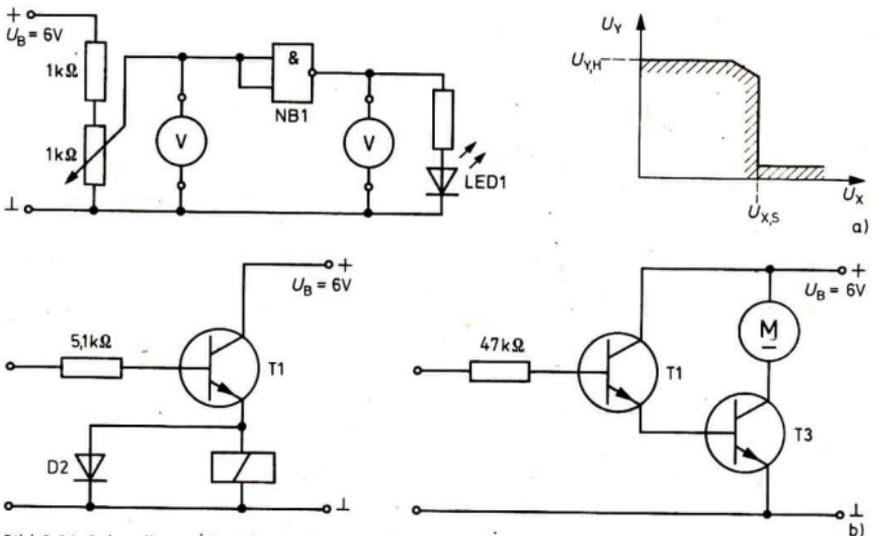


Bild 2.24 Schwellwertschalter mit NAND-Gatter

a) Meßschaltung

b) Anschaltung größerer Leistungen

tersucht wurde. (Bild 2.24a). Die Spannung am Gatterausgang springt von $U_{V,H}$ auf $U_{V,L}$, wenn die Schwellwertspannung $U_{X,S}$ am Eingang übersprungen wird.

- Ermitteln Sie die Schwellwertspannung $U_{X,S}$ eines TTL-NAND-Gatters nach Bild 2.24a (Baustein NB 1, SEG Elektronik/Mikroelektronik)! Schalten Sie an den Gatterausgang ein elektromechanisches Relais bzw. einen Kleinmotor an!

Hinweis

Der Gatterausgang darf nur begrenzt belastet werden, angegeben durch die Ausgangslastzahl N (siehe Abschnitt 4.3.). Deshalb erfolgt die Anschaltung nach Bild 2.24b.

Eine Schalthysterese erreicht man mit dem im Abschnitt 1.4.5. bereits prinzipiell beschriebenen Schmitt-Trigger. Die Kennwerte des Triggers sind: Einschaltspannung U_1 , Abschaltspannung U_2 und Hysteresespannung $U_H = U_1 - U_2$.

- ▼ Bauen Sie zum Kennenlernen der Eigenschaften eines Triggers die Experimentierschaltung nach Bild 2.25 auf! Untersuchen Sie, wie Einschalt-, Abschalt- und Hysteresespannung eines Schmitt-Triggers mit dem Schaltkreisbaustein NB 1 von dem Längswiderstand R_1 und dem Rückführwiderstand R_2 abhängen! Dabei soll $R_2 = 1,8 \text{ k}\Omega$ fest eingestellt bleiben. Wählen Sie z. B. $R_1 = 220 \Omega, 330 \Omega, 1 \text{ k}\Omega, 1,8 \text{ k}\Omega$ und die Betriebsspannung $U_B = 5 \text{ V}$!

Hinweis

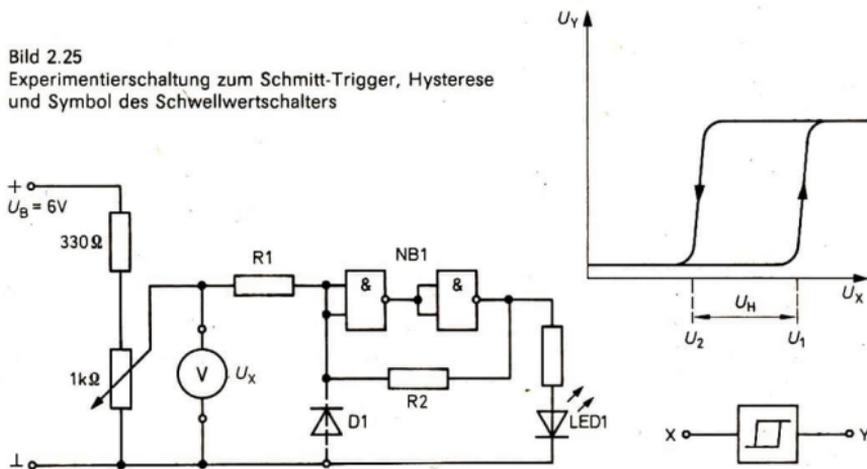
Die Abschaltspannung kann von einem bestimmten Wert von R_1 ab negativ werden. In diesem Falle muß die Diode D1 eingesetzt werden. Der Spannungsteilerwiderstand geht in den Wert von R_1 mit ein, muß also klein gegen R_1 gewählt werden.

- Überprüfen Sie das experimentelle Ergebnis anhand der Formeln

$$U_1 = U_{X,S} \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad U_2 = U_1 - U_{V,H} \frac{R_1}{R_2}; \quad U_H = U_{V,H} \frac{R_1}{R_2}$$

($U_{X,S}$ und $U_{V,H}$ siehe Bild 2.24a)

Bild 2.25
Experimentierschaltung zum Schmitt-Trigger, Hysterese
und Symbol des Schwellwertswitchers



An die Stelle der Zusammenschaltung von Gattern zu Triggerschaltungen können auch spezielle integrierte Schaltkreise treten, die eine oder mehrere Triggerschaltungen enthalten.

- ▼ Bauen Sie zur Erprobung einer integrierten Triggerschaltung die Experimentierschaltung nach Bild 2.26 auf! Untersuchen Sie den Zusammenhang von Einschalt-, Abschalt- und Hysteresespannung für verschiedene Einstellungen des Einstellwiderstandes am Triggerbaustein TB des SEG Elektronik/Mikroelektronik!

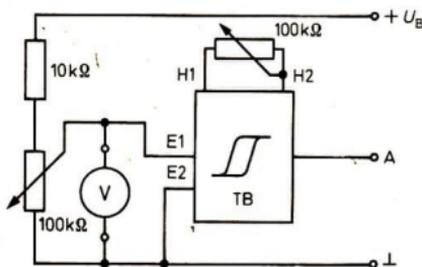


Bild 2.26
Experimentierschaltung zum integrierten
Triggerbaustein

Der Schaltkreisbaustein kann als Schwellwertschalter mit einstellbarer Hysterese universell eingesetzt werden.

Praktische Anwendungen

Die in diesem Abschnitt behandelten Schaltungen reagieren nach Erreichen oder Überschreiten eines bestimmten Wertes einer nichtelektrischen Größe, wie Temperatur, Beleuchtungsstärke, Schallpegel, Flüssigkeitsstand oder Drehzahl, mit der Auslösung eines Schaltungsvorganges oder einer Information. Aus der Vielzahl der Schaltungsmöglichkeiten wurde eine Auswahl vorgenommen.

Thermorelais. Die Auslösung von temperaturabhängigen Schaltungsvorgängen setzt die elektrische Messung der nichtelektrischen Größe Temperatur voraus. Für praktische Schaltungen sind dazu besonders Thermistoren oder wegen der Temperaturabhängigkeit von pn-Übergängen Dioden und Transistoren geeignet.

- ▼ Bauen Sie mit der Experimentierschaltung nach Bild 2.27 einen temperaturabhängigen Schalter auf! Der Schleifer am Einstellwiderstand $100\ \Omega$ wird so eingestellt, daß etwa $10\ \Omega$ wirksam werden. Der Schleifer am Einstellwiderstand $10\ \text{k}\Omega$ steht auf Mittelstellung. Verstellen Sie nach dem Anlegen der Betriebsspannung den Schleifer am Einstellwiderstand $10\ \text{k}\Omega$ so lange, bis die Lichtemitterdiode gerade verlischt! Betätigen Sie kurzzeitig den Taster im Stromkreis des Heizwiderstandes und beobachten Sie die Auswirkungen an der Lichtemitterdiode! Beobachten Sie auch nach dem Öffnen des Tasters weiter! Erklären Sie das elektrische Verhalten der Schaltung bei normaler und bei erhöhter Temperatur!

Der Thermistor und der Einstellwiderstand bilden einen Spannungsteiler. Der Spannungsabfall über dem Einstellwiderstand ist die Eingangsspannung der Triggerschaltung.

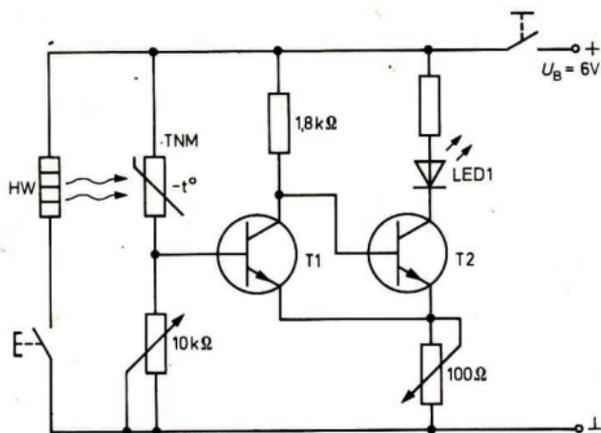


Bild 2.27
Experimentierschaltung
zum Thermorelais

Sie wird bei „kaltem“ Thermistor so eingestellt, daß sie geringfügig unter der Schwellspannung liegt. Wird der Thermistor durch den Heizwiderstand erwärmt, so verringert sich sein elektrischer Widerstand. Im Spannungsteiler fließt demzufolge ein größerer Strom, der auch zu einem größeren Spannungsabfall am Einstellwiderstand führt. Die Schwellspannung wird überschritten, der Trigger schaltet. Wenn der Thermistor durch Abkühlung seinen ursprünglichen Widerstandswert erreicht, wird durch die Unterschreitung der Schwellspannung der Ausgangszustand wieder hergestellt. Die Schaltung arbeitet als Temperaturwächter.

- Überlegen Sie, welche anderen Formen der Signalisierung des Schaltzustandes möglich wären und wofür die Schaltung praktisch genutzt werden kann!

Temperaturregelung. Der Vorgang der Temperaturregelung soll durch ein Experiment verdeutlicht werden.

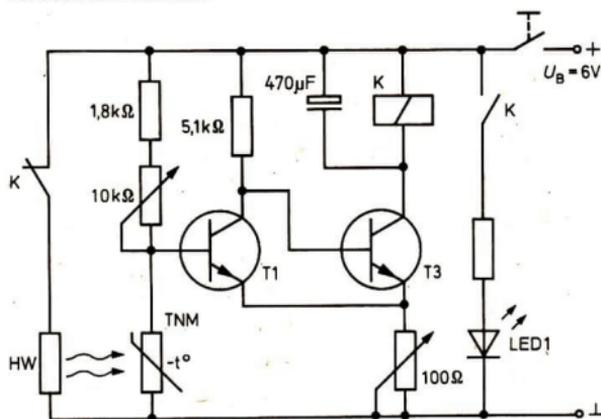


Bild 2.28
Experimentierschaltung zur
Temperaturregelung

- ▼ Bauen Sie eine Temperaturregelung nach Bild 2.28 auf! Stellen Sie vor dem Anlegen der Betriebsspannung die Schleifer der Einstellwiderstände sorgfältig so ein, daß etwa $1\text{ k}\Omega$ bzw. $10\ \Omega$ wirksam werden!

Beobachten Sie nach dem Anlegen der Betriebsspannung an der Lichtemitterdiode den Wirkungsablauf der Schaltung über einen längeren Zeitraum!

- Ordnen Sie die Bauelemente der Schaltung den steuerungstechnischen Begriffen des Regelkreises zu (Bild 2.3b)! Ermitteln Sie die Einschalt- und Abschaltzeiten des Relais und zeichnen Sie danach ein Schaltprogramm!

Fotorelais. Fotorelais sind lichtabhängige Steuerungen (Lichtschranken), die mit verschiedenen Schaltungsvarianten realisiert werden können. Die Unterschiede bestehen vor allem im Ansprechen auf „hell“ oder „dunkel“ und in der Empfindlichkeit.

- ▼ Beobachten Sie das Betriebsverhalten eines belichteten und unbelichteten Fotowiderstandes in einer Experimentierschaltung nach Bild 2.29!

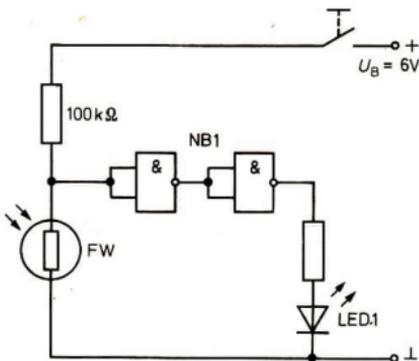


Bild 2.29
Experimentierschaltung zur Lichtschranke (Dunkelschaltung)

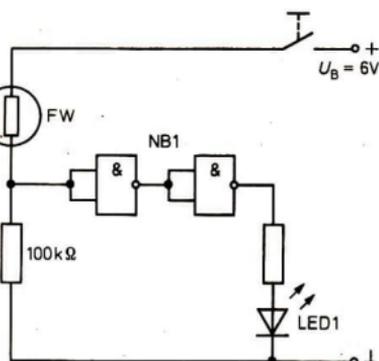


Bild 2.30
Experimentierschaltung zur Lichtschranke (Hellschaltung)

Die Schaltung stellt ein Fotorelais mit Dunkelschaltung dar, d. h. die LED leuchtet, wenn der Fotowiderstand nicht beleuchtet ist. Die Gatter-Eingangsspannung wird durch den Spannungsteiler aus Fotowiderstand und Vorwiderstand ($100\text{ k}\Omega$) gebildet. Da der Fotowiderstand im Dunkelzustand einen hohen Widerstandswert besitzt, liegt die Eingangsspannung des Gatters G1 oberhalb der Schwellwertspannung $U_{x,s}$ (s. auch Bild 2.24a), sein Ausgang liegt auf L-Pegel und der Ausgang des nachfolgenden Gatters G2 demzufolge auf H-Pegel. Wird der Fotowiderstand beleuchtet, so sinkt sein Widerstandswert und damit die Eingangsspannung von G1 unter die Schwellwertspannung $U_{x,s}$ ab. Damit schalten G1 und G2 um, die LED erlischt.

- Überlegen Sie, wie die Schaltung verändert werden müßte, wenn die Umschaltung bei belichtetem Fotowiderstand erfolgen soll (Hellschaltung)! Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit Bild 2.30!

Durch die Kombination der Gatterschaltungen mit einem Transistorverstärker können Fotorelais mit höherer Empfindlichkeit realisiert werden.

- Die Experimentierschaltung für ein empfindliches Fotorelais zeigt Bild 2.31. Der Schleifer des Einstellwiderstandes wird vor dem Anlegen der Betriebsspannung so eingestellt, daß der gesamte Widerstand wirksam wird. Erproben Sie die Funktion der Schaltung bei Beleuchtung aus größerer Entfernung (Taschenlampe) und verschiedenen Einstellungen des Einstellwiderstandes!

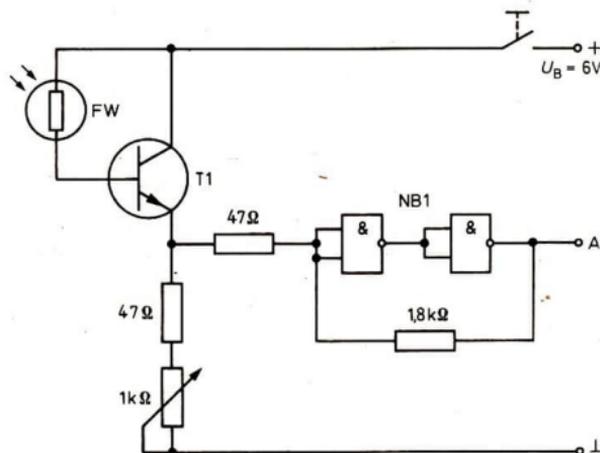


Bild 2.31
Experimentierschaltung für
ein empfindliches Fotore-
lais

Der Fotowiderstand liegt zwischen Basis und Kollektor des Eingangstransistors. Durch Lichteinwirkung wird der Basisstrom des Transistors und somit auch der Kollektorstrom gesteuert. Die Eingangsspannung des nachfolgenden Triggers wird durch den Spannungsabfall am Emittor des Transistors bestimmt. Mit dem Einstellregler wird die Ansprechschwelle eingestellt.

Dämmerungsschalter. Dämmerungsschalter werden zur automatischen Einschaltung von Beleuchtungen (Baustellen, Kraftfahrzeuge) bei Verringerung des Tageslichtes eingesetzt.

- Bauen Sie einen Dämmerungsschalter nach Bild 2.32 auf! Ahmen Sie durch Verringerung der Raumhelligkeit die Dämmerung nach! Überprüfen Sie die Funktionstüchtigkeit der Schaltung und stellen Sie eine zweckmäßige Ansprechschwelle ein!

Mit Hilfe eines Trigger-Schaltkreises lassen sich Fotorelais universell und mit geringem Schaltungsaufwand realisieren.

Akustischer Schalter. Die Umformung von Schallschwingungen in elektronische Schaltungsvorgänge wird vor allem bei der Überwachung von Vorgängen in der Produktion, bei Alarmanlagen und in der Modellfernsteuerung angewendet. Als Meßfühler und -wandler werden Mikrofone eingesetzt.

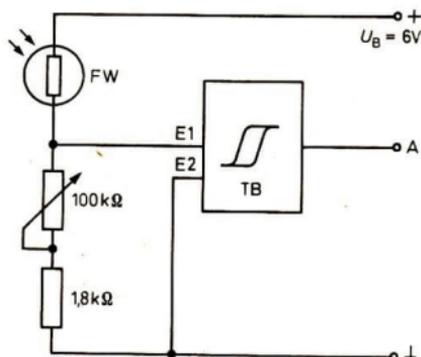


Bild 2.32
Experimentierschaltung zum Dämmerungs-
schalter

- ▼ Die Experimentierschaltung für einen akustischen Schalter zeigt Bild 2.33. Verwenden Sie als Mikrophon einen Kopfhörer! Die Schallimpulse können durch Händeklatschen erzeugt werden. Stellen Sie mit Hilfe des Einstellwiderstandes die Ansprechempfindlichkeit der Schaltung so ein, daß die LED bei Ruhe gerade noch nicht aufleuchtet!

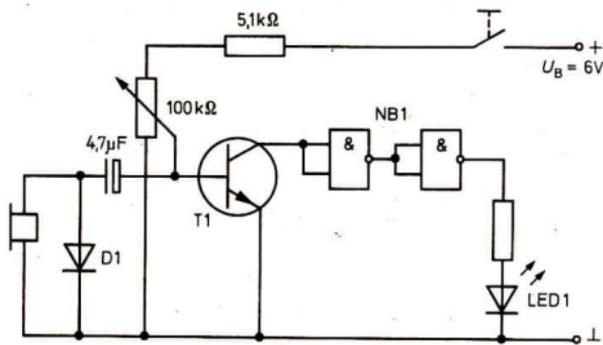


Bild 2.33
Experimentierschaltung
zum akustischen Schalter

Die Schallwellen werden über die Membrane und das elektromagnetische System des Kopfhörers in eine Wechselspannung umgeformt. Die Diode bewirkt, daß nur eine Halbwelle an der Basis des Transistors wirksam wird. Mit Hilfe des Einstellwiderstandes werden der Arbeitspunkt des Transistors und die Ansprechempfindlichkeit eingestellt. Die Gatter arbeiten als Schaltverstärker.

Sensorschalter. Die Auslösung von Schaltvorgängen durch Berühren von „Sensortasten“ wird z. B. bei Rundfunk- und Fernsehempfängern angewendet.

- ▼ Bauen Sie einen einfachen Sensorschalter nach Bild 2.34 auf! Der Berührungskontakt wird aus zwei aufgeklebten Aluminiumfolienstreifen hergestellt, die über zwei untergelegte dünne Drähte mit der Schaltung verbunden sind. Überbrücken Sie den Kontakt mit einem Finger und beobachten Sie die LED!

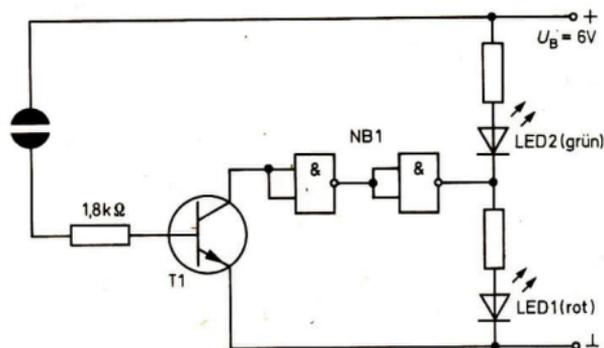


Bild 2.34
Experimentierschaltung
zum Sensorschalter

Überbrückt man die Streifen mit der Hand, so erhält der Transistor einen Basisstrom. Er wird leitend, und der Eingang von Gatter G1 geht auf L-Potential.

Dabei wirkt der Hautwiderstand des Fingers als Basisvorwiderstand. Er liegt je nach Beschaffenheit und Feuchtigkeit der Haut bei 30 kΩ bis 500 kΩ.

- Überlegen Sie, wie die Empfindlichkeit des Sensorschalters erhöht werden kann, um in jedem Fall eine sichere Auslösung zu erreichen!

Füllstandsmesser und -regelung. Bei vielen Vorgängen in der Produktion, in der Forschung und im Haushalt muß der Füllstand in Behältern ständig überwacht werden. Ebenso wichtig ist die Einhaltung bzw. Wiederherstellung eines bestimmten Flüssigkeitsstandes bei der Entnahme bzw. Zufuhr von Flüssigkeiten.

- Bauen Sie die Experimentierschaltung einer Füllstandsmessung nach Bild 2.35 auf! Die drei Elektroden werden so durch einen Pappeckel bzw. flachen Korken gesteckt, daß sie in unterschiedlichen Höhen in ein Becherglas hineinragen. Das Wasser wird mit einem geringen Zusatz von Kochsalz elektrisch leitend gemacht. Beim Anlegen der Betriebsspannung soll das Becherglas zunächst leer sein.

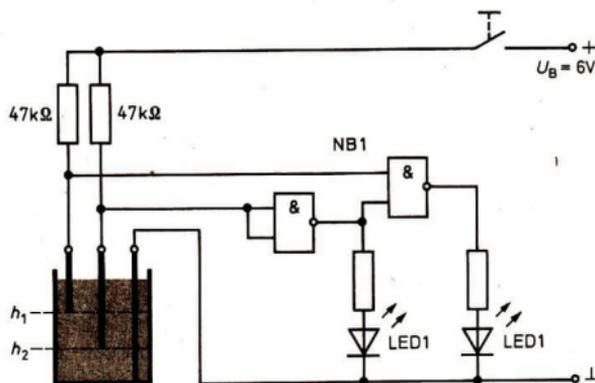


Bild 2.35
Experimentierschaltung zur
Füllstandsmessung

Beobachten Sie beim Einfüllen des Wassers die Lichtemitterdioden, wenn das Wasser nacheinander die Elektroden erreicht! Die niedrigste Elektrode führt Massepotential. Erklären Sie den Wirkungsablauf der Schaltung!

Taucht eine der beiden oberen Elektroden in die Lösung ein, so wird sie mit dem Massepotential verbunden, der jeweilige Gattereingang liegt auf L-Potential. Durch die nachgeschalteten Lichtemitterdioden wird eine Information über den Füllstand gegeben.

Der Füllstand eines Behälters kann in ähnlicher Weise elektronisch geregelt werden. Eine Experimentierschaltung dafür zeigt Bild 2.36. Für den unteren Vorratsbehälter und die Pumpe ist eine Kfz-Scheibenwaschanlage gut geeignet. Der Abfluß vom oberen Behälter über die Schlauchverbindung kann durch eine Quetschklemme beeinflusst werden. Bei Beginn des Experiments soll sich die Flüssigkeit im unteren Behälter befinden.

- ▼ Bauen Sie eine Flüssigkeitsstandsregelung nach Bild 2.36 auf! Legen Sie die Betriebsspannung und die Spannung für den Pumpenmotor an und beobachten Sie den Wirkungsablauf! Mit Hilfe der Quetschklemme muß der Ablauf der Flüssigkeit so eingestellt werden, daß er geringer ist als der Zulauf.

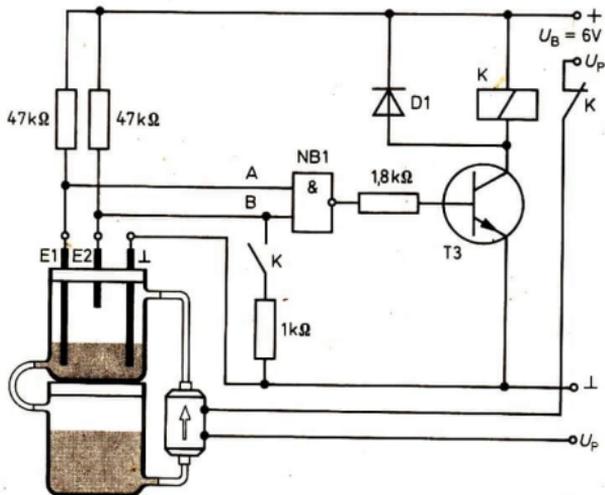


Bild 2.36
Experimentierschaltung zur Füllstandsregelung

- Begründen Sie, daß der Wirkungsablauf einem Regelkreis entspricht! Stellen Sie den Verlauf der Flüssigkeitsstandsänderung grafisch dar!

Wenn sich keine Flüssigkeit im oberen Behälter befindet, befinden sich die Eingänge A und B des Gatters auf H-Potential. Der Ausgang führt dann L-Potential, und der Transistorschalter ist geöffnet. Der Pumpenmotor erhält über den Ruhestromkontakt K Spannung und arbeitet. Erreicht die Flüssigkeit die Elektrode E1, erhält Eingang A L-Potential, aber der Schaltzustand des Gatters ändert sich nicht. Erst wenn auch an E2 L-Potential auftritt, erhält der Ausgang H-Potential, und das Relais schaltet durch die Öffnung von K die Pumpe ab. Unterschreitet der Flüssigkeitsstand das Niveau von E2, bleibt das L-Poten-

tial am Eingang B durch den Arbeitskontakt K erhalten, und das Relais bleibt weiterhin angezogen.

Erst wenn der Niveaustand an der Elektrode E1 ebenfalls unterschritten wird, schaltet das Gatter um, das Relais wird stromlos und die Pumpe über den Ruhestromkontakt K erneut eingeschaltet.

Drehzahlmessung. Durch Umformung der Drehzahl einer Welle in Lichtimpulse kann mit optoelektronischen Bauelementen die elektrische Messung realisiert werden. Die Lichtimpulse werden dabei entweder durch Unterbrechung des Lichtstrahles oder durch Reflexion erzeugt (Bild 2.37).

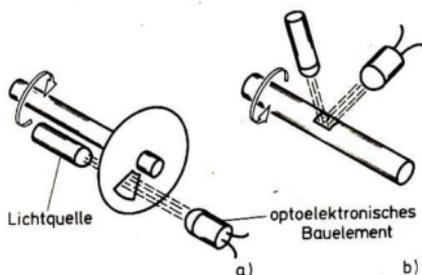


Bild 2.37 Erzeugung von Lichtimpulsen zur Drehzahlmessung
a) mit Lochscheibe
b) durch Reflexion

- ▼ Bauen Sie zur Drehzahlmessung eine Experimentierschaltung nach Bild 2.38 auf! Ordnen Sie den Motor mit der Lochscheibe so an, daß die Lochscheibe frei zwischen Glühlampe und Fototransistor rotiert! Die Drehzahl des Motors kann über den Einstellwiderstand $100\ \Omega$ beeinflußt werden. Stellen Sie verschiedene Drehzahlen und damit Impulsfrequenzen ein und beobachten Sie die Anzeige am Meßgerät!

Die Drehzahlmessung wird mit einer Lochscheibe und einer Lichtschranke ausgeführt. Da ein Fotowiderstand zu träge reagiert, wird als Lichtempfänger ein Fototransistor ein-

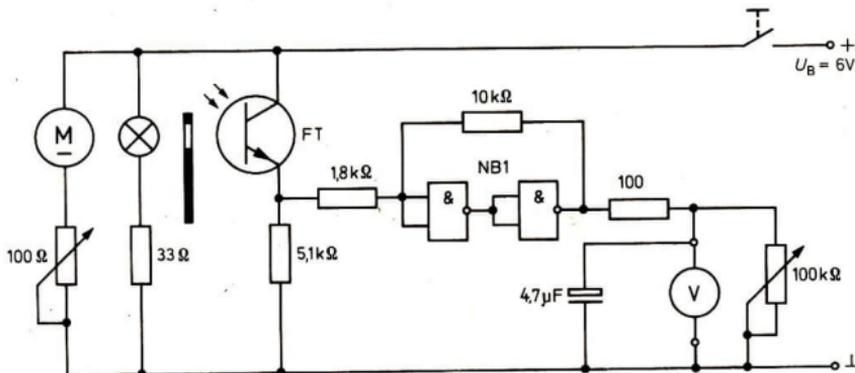


Bild 2.38 Experimentierschaltung zur Drehzahlmessung

gesetzt. Die entstehenden Spannungsimpulse werden im Kondensator gespeichert, der sich über den Widerstand langsam entlädt. Die Kondensatorspannung ist ein Maß für die Impulsdichte und damit für die Frequenz.

- Überlegen Sie, wie Sie die analoge Anzeige eichen könnten, um einfache Messungen durchzuführen! Begründen Sie die Vorteile optoelektronischer Drehzahlmessungen gegenüber den auch möglichen Verfahren mit Unterbrecherkontakten oder Tachodynamometern!

Die Experimentierschaltungen für die untersuchten Beispiele stellen nur das Schaltungsprinzip dar. Für den praktischen Einsatz im Betrieb, in der Schule oder zu Hause müssen diese Schaltungen den konkreten Einsatzbedingungen angepaßt werden. Nach der Erprobung der optimierten Schaltung mit dem SEG Elektronik/Mikroelektronik sollte der Entwurf einer Leiterplatte und die Realisierung als fest verschalteter Baustein erfolgen.

2.4. Elektronische Meßverstärker

2.4.1. Transistor als Meßverstärker

Die mit elektrischen und elektronischen Meßwandlern erreichten Signalspannungen und -ströme reichen oft nicht aus, um an weniger empfindlichen Meßgeräten einen ablesbaren Zeigerausschlag zu erzeugen. Zwischen Meßwandler und Meßgerät muß ein Meßverstärker geschaltet werden.

An einen Meßverstärker werden folgende Forderungen gestellt:

- Gute Linearität im gesamten Meßbereich, d. h. die Ausgangsspannung muß sich genau proportional zur Eingangsspannung verhalten.
- Die Verstärkung muß weitgehend von äußeren Einflüssen, wie Schwankungen der Betriebsspannung oder der Umgebungstemperatur, unabhängig sein.
- Die Verstärkung soll in weiten Grenzen einstellbar sein, so daß ein nachgeschaltetes Meßgerät geeicht werden kann.

Diese Bedingungen werden von einer einfachen Transistorschaltung nicht erfüllt. Daher werden diese Schaltungen auch mehr zur qualitativen Anzeige, d. h. ohne genauere Meßwertangabe, verwendet.

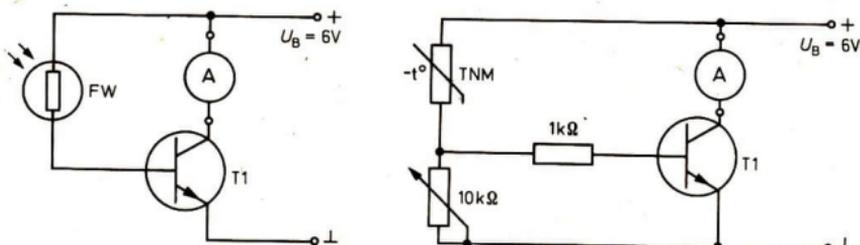


Bild 2.39 Einfache Meßverstärkerschaltungen

- Überlegen Sie, von welchen Größen die Meßverstärkung bei den im Bild 2.39 dargestellten Experimentierschaltungen abhängig ist!

Der Basisstrom des Transistors wird durch den Belichtungszustand des Fotowiderstandes bzw. die Temperatur des Thermistors bestimmt. Zur Anzeige gelangt der Kollektorstrom I_C , der angenähert proportional dem Basisstrom I_B ist. Entscheidend für die Anzeigempfindlichkeit ist die Großsignal-Stromverstärkung des Transistors $B = \frac{I_C}{I_B}$.

Durch die Zusammenschaltung von Transistoren und durch eine zweckmäßige Verbindung des Meßgerätes mit dem Schaltungsausgang lassen sich die Empfindlichkeit und die Genauigkeit des Meßverstärkers weiter erhöhen.

- ▼ Bauen Sie eine Experimentierschaltung nach Bild 2.40 auf! Stellen Sie den Schleifer des Einstellwiderstandes so ein, daß bei normaler Raumbeleuchtung 0 V angezeigt wird! Belichten Sie den Fotowiderstand mit einer Taschenlampe (oder einer anderen Lichtquelle) und beobachten Sie die Meßwertanzeige!

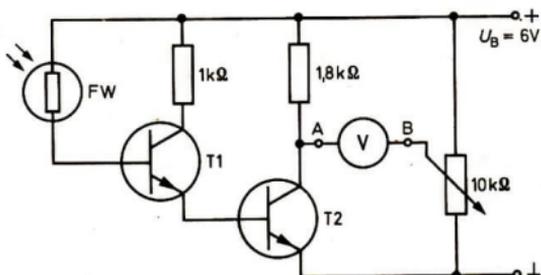


Bild 2.40
Experimentierschaltung zum Meßverstärker mit höherer Empfindlichkeit

- Erläutern Sie die prinzipiellen Unterschiede zwischen den Schaltungen nach Bild 2.39 und Bild 2.40! Begründen Sie die höhere Empfindlichkeit und nennen Sie praktische Einsatzmöglichkeiten!

In der Schaltung nach Bild 2.40 (Darlington-Schaltung) sind zwei Transistoren direkt gekoppelt. Der Transistor T1 arbeitet wie in der Schaltung nach Bild 2.39. Da er aber gleichzeitig als Basiswiderstand von T2 wirkt, ist die Stromverstärkung insgesamt $B = B_1 \cdot B_2$. Wird der Fotowiderstand belichtet, so fließt durch T1 ein Kollektorstrom, der gleichzeitig Basisstrom von T2 ist. Dieser wird weiter verstärkt und als Spannungsabfall am Kollektorstromwiderstand von T2 registriert.

Der Arbeitswiderstand und der Widerstand der Kollektor-Emitter-Strecke des Transistors T2 und der Einstellwiderstand 10 kΩ bilden eine Brückenschaltung (siehe Abschnitt 1.3.). Bei der Anfangsbelichtung wird das Teilverhältnis am Einstellwiderstand so gewählt, daß sich keine Potentialunterschiede zwischen den Punkten A und B ergeben. Bei Belichtung des Fotowiderstandes ändert sich jedoch das Potential am Punkt A gegenüber dem Masseanschluß. Die Differenz der Spannung zwischen A und B wird angezeigt. Die Schaltung arbeitet als einfacher Belichtungsmesser.

2.4.2. Differenzverstärker

Die betrachteten einfachen Transistor-Meßverstärkerschaltungen arbeiten ungenau, weil die relativ starke Temperaturabhängigkeit des Kollektorstromes das Ergebnis beeinflusst. Das kann man leicht nachweisen, wenn man die Transistoren mit der Hand erwärmt. Eine einfache Möglichkeit zur Kompensation des Temperatureinflusses besteht darin, daß man in beide Brückenarme einen Transistor einfügt (Bild 2.41). Da sich bei Erwärmung die Kollektorströme beider Transistoren ändern, bleibt das Gleichgewicht erhalten. Für Meß-, Steuer- und Regelungsaufgaben mit hoher Genauigkeit und Stabilität werden Differenzverstärker eingesetzt.

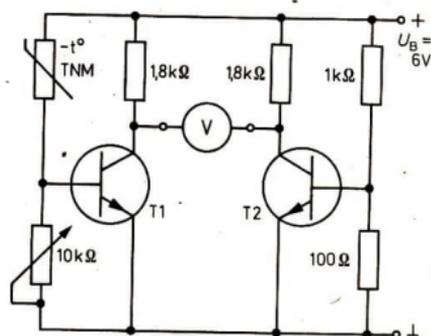


Bild 2.41
Experimentierschaltung zum Meßverstärker mit
Temperaturkompensation

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung eines Differenzverstärkers nach Bild 2.42 auf! Beachten Sie, daß zwei Betriebsspannungen mit unterschiedlichem Potential gegenüber dem Masseanschluß notwendig sind! Nach dem Anlegen der Betriebsspannungen wird die Basisvorspannung und damit der Kollektorstrom des Transistors T3 so eingestellt, daß eine Kollektor-Emitter-Spannung von 2,5 V auftritt. Legen Sie nacheinander an die Eingänge E_A und E_B die Eingangsspannung U_E an und beobachten Sie an den Meßgeräten das Verhalten der Ausgangsspannungen von T1 und T2! Legen Sie die Eingangsspannung an beide Eingänge gleichzeitig und zuletzt zwischen den beiden Eingängen an und beobachten Sie die Auswirkungen!
- Ordnen Sie die Ergebnisse des Experiments in einer Übersicht an! Erarbeiten Sie sich den Wirkungsablauf der Schaltung!

Der Kollektorstrom der Transistoren T1 und T2 ist gleichzeitig der Kollektorstrom des Transistors T3. Da T3 eine feste Basisvorspannung erhält, ist sein Kollektorstrom konstant, er arbeitet als sogenannte Konstantstromquelle.

Liegt die positive Eingangsspannung am Eingang E_A an, sinkt infolge des erhöhten Kollektorstromes die Spannung am Punkt A. Da der Gesamtstrom durch T3 konstant gehalten wird, sinkt demzufolge der Kollektorstrom von T2, und die Spannung am Punkt B erhöht sich.

Wird die Eingangsspannung an Eingang E_B angelegt, ergibt sich das umgekehrte Betriebsverhalten. Liegt an beiden Eingängen gleichzeitig eine positive Eingangsspannung an (gleicher Takt), so tritt keine Veränderung auf.

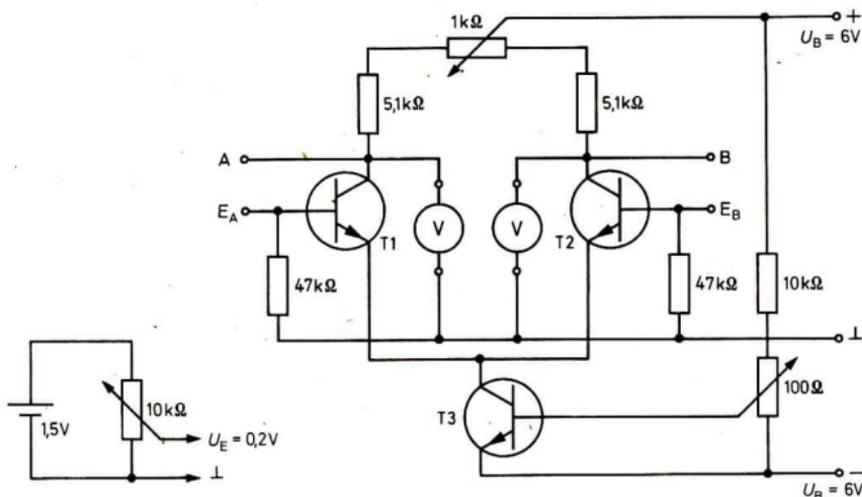


Bild 2.42 Experimentierschaltung zum Differenzverstärker

Das Anlegen der Eingangsspannung zwischen den Eingängen E_A und E_B hat zur Folge, daß sich die Kollektorspannung an einem Transistor (bzw. Ausgang) erhöht und am anderen verringert. Zwischen den beiden Ausgängen tritt dann die doppelte Ausgangsspannung auf, die zur Messung genutzt werden kann. Die Schaltung arbeitet als Differenzverstärker. Sie ist die Grundlage der Meßverstärkerschaltungen mit Operationsverstärker.

2.4.3. Operationsverstärker als Meßverstärker

Grundsaltungen und Übertragungskennlinie eines Operationsverstärkers

Die im vorhergehenden Abschnitt aufgezählten Anforderungen an einen Meßverstärker werden im hohen Maße durch einen Operationsverstärker erfüllt, der als integrierter Schaltkreis bereits alle Funktionselemente zur linearen Verstärkung und zur Stabilisierung enthält. Der Name Operationsverstärker kommt aus der Rechentechnik. Hier wurden diese Verstärker ursprünglich zur Durchführung von Rechenoperationen und zur Darstellung von Funktionsverläufen in Analogrechnern eingesetzt. Sie haben sich in der Folgezeit aber als ideale, universell einsetzbare Verstärkerbausteine erwiesen und sind heute in der Meß- und Regelungstechnik nicht mehr zu entbehren. Das Schaltsymbol des Operationsverstärkers ist ein Dreieck mit der Darstellung von zwei Eingängen und einem Ausgang (Bild 2.43).

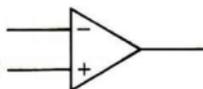


Bild 2.43
Schaltsymbol des Operationsverstärkers

Kenntnisse über das Betriebsverhalten von Operationsverstärkern sind die Voraussetzung für die selbständige Erarbeitung von Einsatzmöglichkeiten.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Betriebsverhaltens eine Experimentierschaltung nach Bild 2.44, Variante a, auf! Stellen Sie den Einstellwiderstand $1\text{ M}\Omega$ so ein, daß der volle Widerstandswert wirksam wird! Der Schleifer des Einstellwiderstandes $1\text{ k}\Omega$ soll am Masseanschluß sein. Erhöhen Sie langsam die Eingangsspannung U_E und beobachten Sie die Meßwertanzeige für die Ausgangsspannung U_A ! Nehmen Sie die Meßwerte auf! Wiederholen Sie das Experiment mit der Schaltung nach Bild 2.44, Variante b!

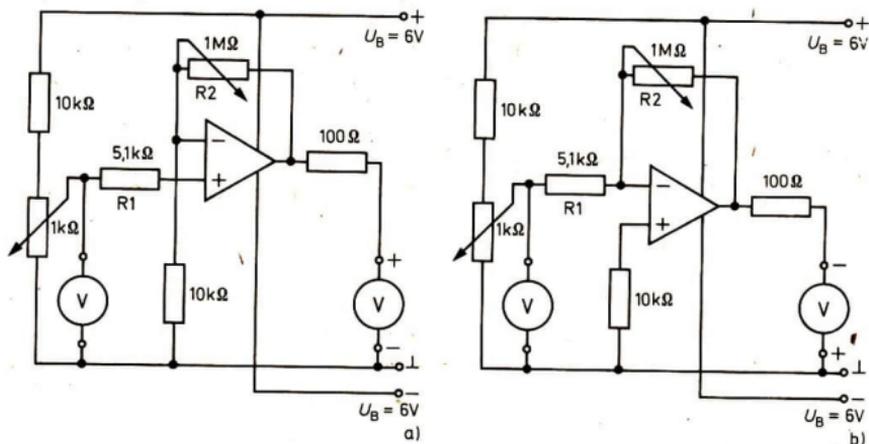


Bild 2.44 Experimentierschaltungen zum Operationsverstärker

- Zeichnen Sie mit Hilfe der im Experiment nach Bild 2.44 ermittelten Wertepaare das Funktionsbild $U_A = f(U_E)$! Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit Bild 2.45!

Der Operationsverstärker zeigt folgendes Betriebsverhalten: Liegt die positive Eingangsspannung am mit + gekennzeichneten Eingang an, ist die Ausgangsspannung ebenfalls positiv gegenüber dem Masseanschluß. Sie wird nicht umgekehrt (nicht invertierender Betrieb). Dagegen bewirkt eine positive Eingangsspannung am mit - gekennzeichneten Eingang eine negative Ausgangsspannung gegenüber dem Masseanschluß (invertierender Betrieb). Der Plus-Eingang wird daher als nicht invertierender und der Minus-Eingang als invertierender Eingang bezeichnet (Bild 2.45).

In den Grundschaltungen (Bild 2.44) ist R_1 der Längswiderstand und R_2 der Rückführwiderstand. In der Praxis ist R_1 meist fest in die Schaltung eingebaut. Durch Auswechseln oder Stellen von R_2 kann man auf einfache Weise die gewünschte Spannungsverstärkung v einstellen.

$$v = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_2}{R_1}$$

(invertierend)

$$v = \frac{U_A}{U_E} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

(nicht invertierend)

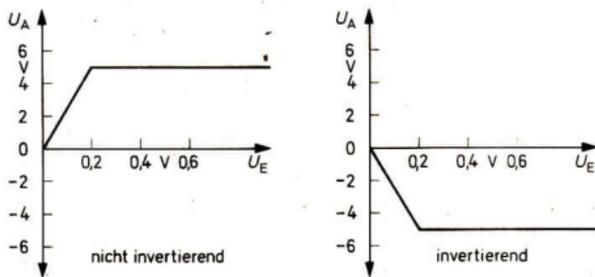


Bild 2.45
Übertragungskennlinien eines Operationsverstärkers

Die Betriebsspannung muß im allgemeinen symmetrisch sein. Das bedeutet, daß der Masseanschluß zwischen positivem und negativem Pol liegt.

■ Beispiel für die Spannungsverstärkung

$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ ergeben nach den Berechnungsformeln $v = -10$ für den invertierenden und $v = 11$ für den nicht invertierenden Betrieb.

Die innere Verstärkung, also für $R_2 \rightarrow \infty$ oder ohne Rückführung, ist sehr hoch. Sie liegt bei $v = 10000$. Ein Operationsverstärker ohne Rückführung arbeitet aber wegen der hohen Empfindlichkeit nicht stabil.

● Nehmen Sie die Kennlinie eines Operationsverstärkers im invertierenden und nicht invertierenden Betrieb für die Verstärkungen $v = 10$ und $v = 100$ auf!

Tragen Sie die Kennlinien auf Millimeterpapier auf und überzeugen Sie sich von der Linearität der Verstärkung! Bei welchen Eingangsspannungen ist der Verstärker übersteuert?

Eine weitere Anwendung findet der Operationsverstärker als Spannungsvergleicher, auch *Komparator* genannt. Hier wird eine Eingangsspannung U_E mit einer fest eingestellten Spannung, der Referenzspannung U_{ref} verglichen. Ist $U_E < U_{ref}$, so arbeitet der Ver-

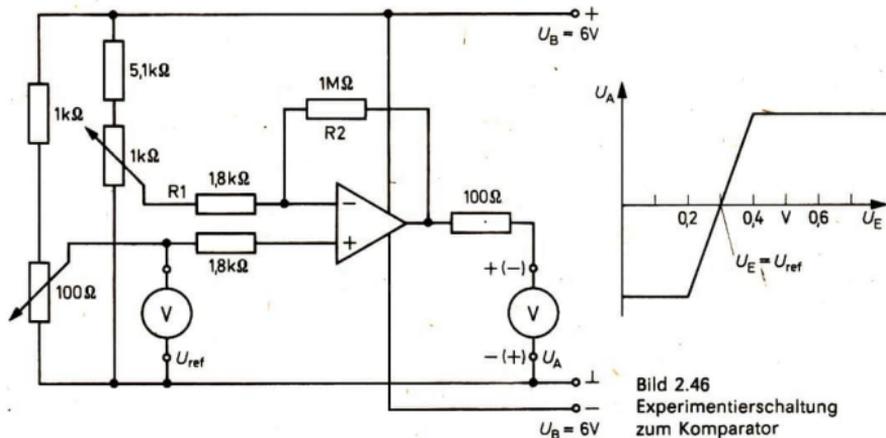


Bild 2.46
Experimentierschaltung zum Komparator

stärker im invertierenden, ist $U_E > U_{ref}$, so arbeitet er im nicht invertierenden Betrieb. Sind beide Spannungen gleich, also $U_E = U_{ref}$, so ist die Ausgangsspannung $U_A = 0$ (Bild 2.46).

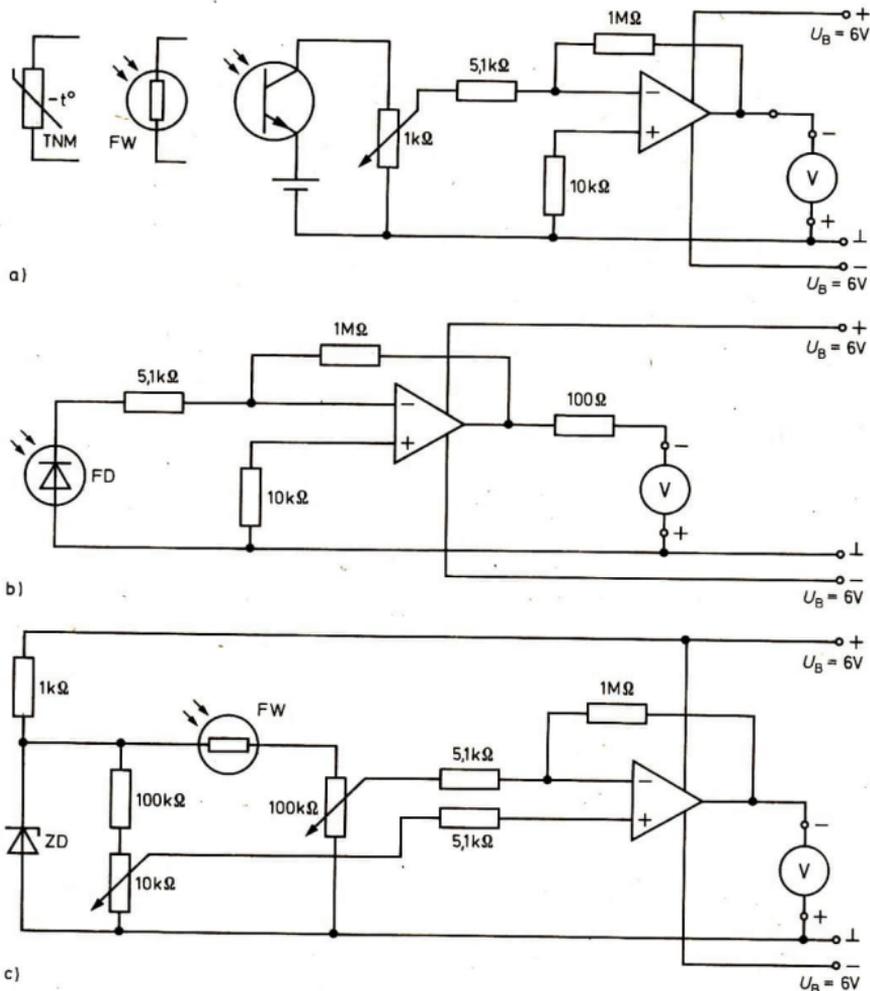


Bild 2.47 Anschaltung von Meßwandlern an den Eingang eines Operationsverstärkers

a) Thermistor, Fotowiderstand, Fototransistor

b) Fotodiode als Spannungsquelle (als Fotoelement)

c) Nullabgleich des Meßgerätes am Eingang des Operationsverstärkers

- Überprüfen Sie die Funktion der Komparatorschaltung, wenn Sie eine Referenzspannung $U_{ref} = 0,2 \text{ V}$ anlegen! Nehmen Sie die Übertragungskennlinie auf!

Anschaltung von Meßwandlern an den Operationsverstärker

Die Ausgangsspannung U_A eines Operationsverstärkers kann man auf zweierlei Art beeinflussen:

Fall 1: Man verändert durch einen Meßwandler die Eingangsspannung und hält die Spannungsverstärkung konstant (Bild 2.47).

Fall 2: Man hält die Eingangsspannung konstant und verändert die Verstärkung des Operationsverstärkers, indem der Meßwandler an die Stelle des Rückführwiderstandes gesetzt wird (Bild 2.48).

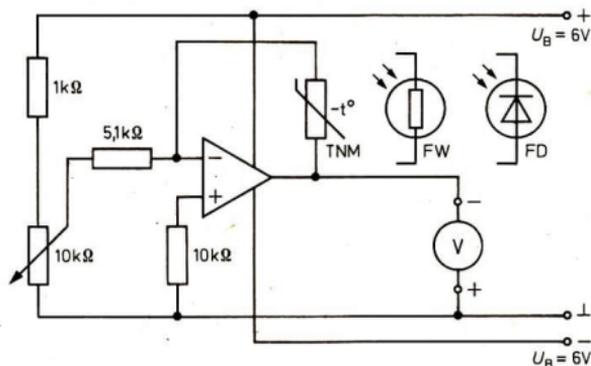


Bild 2.48
Anschaltung von Meßwandlern an den Operationsverstärker bei konstanter Eingangsspannung

Zu Fall 1: Die Meßwandler benötigen eine zusätzliche Spannungsquelle, so daß schon zu Beginn der Messung (bei der Anfangstemperatur bzw. der Anfangsbeleuchtungsstärke) ein Zeigerausschlag am Meßgerät vorhanden ist. Dieser kann durch eine zusätzliche Brückenschaltung am Ausgang des Verstärkers kompensiert werden. Ein verbesserter Nullabgleich ist möglich, wenn an den zweiten Eingang des Verstärkers eine Vergleichsspannung geschaltet ist, die einem stabilisierten Spannungsteiler mit Z-Diode entnommen wird.

Zu Fall 2: Die konstante Eingangsspannung wird wiederum dem stabilisierten Spannungsteiler entnommen. In diesem Falle nun wird die Verstärkung durch den veränderten Widerstand des Meßwandlers beeinflusst. Da der elektrische Widerstand z. B. des Thermistors bei höherer Temperatur geringer wird, verringert sich auch die Spannungsverstärkung und damit die Ausgangsspannung. Als Anfangswert wird also am Meßgerät der größte Zeigerausschlag eingestellt.

Praktische Anwendungen des Operationsverstärkers

Aus der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten von Operationsverstärkern werden nur zwei typische Anwendungsbeispiele dargestellt.

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung für einen Belichtungsmesser nach Bild 2.49 auf!

Stellen Sie mit Hilfe des Einstellwiderstandes von 10 kΩ die Ausgangsspannung bei abgedunkeltem Fototransistor auf 0 V ein! Beobachten Sie den angezeigten Meßwert bei unterschiedlicher Belichtung!

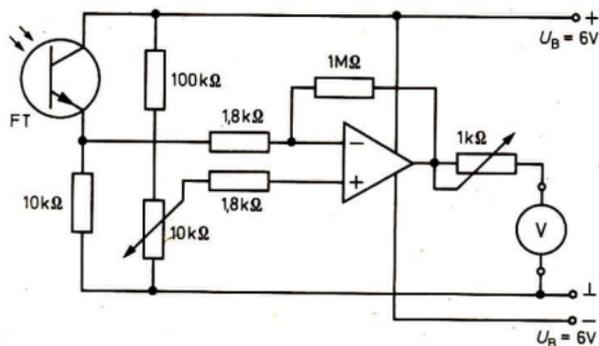


Bild 2.49
Experimentierschaltung
zum Belichtungsmesser

Der Fototransistor und die Widerstände am Eingang des Operationsverstärkers bilden eine Brückenschaltung. Bei abgedunkeltem Fotowiderstand erfolgt mit dem Einstellwiderstand ein Abgleich der Brückenschaltung, so daß an beiden Eingängen gleiche Potentiale anliegen – Ausgangsspannung 0 V. Bei Belichtung verändert sich der Spannungsabfall am Transistor bzw. am Widerstand 10 kΩ. Die Differenz der Eingangsspannungen wird verstärkt und angezeigt.

- ▼ Bauen Sie die Schaltung für eine Temperaturregelung nach Bild 2.50 auf! Überlegen Sie, wie der Heizwiderstand angeschlossen werden muß, damit er über den Ruhestromkontakt des Relais Spannung erhält! Stellen Sie mit dem Einstellwiderstand die Ausgangs-

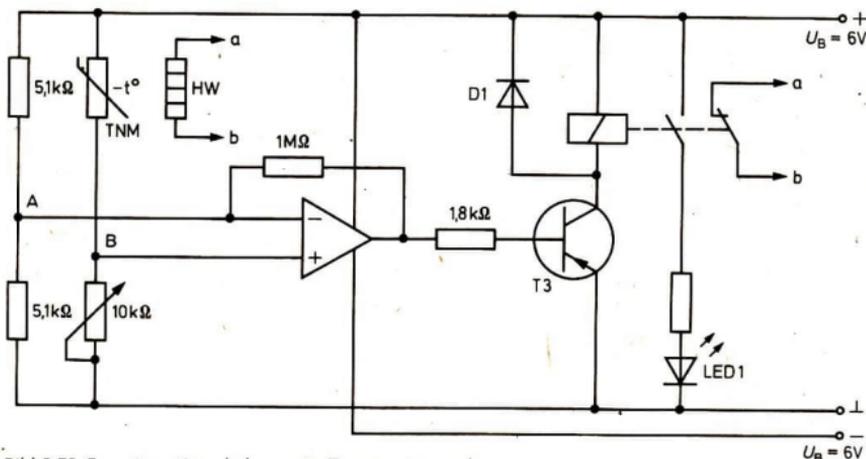


Bild 2.50 Experimentierschaltung zur Temperaturregelung

spannung der Schaltung so ein, daß das Relais nicht angezogen wird (Verbindung zum Heizwiderstand geöffnet)! Beobachten Sie das Betriebsverhalten der Schaltung! Erklären Sie den Wirkungsablauf!

Mit dem Einstellwiderstand wird bei „kaltem“ Thermistor ein geringer Potentialunterschied zwischen A und B eingestellt. Bei anliegender Betriebsspannung fließt über den Ruhekontakt des Relais Strom durch den Heizwiderstand. Der Thermistor wird erwärmt, und das Potential an Punkt B wird gegenüber Masse positiver. Dadurch erhöht sich auch die Ausgangsspannung, der Transistor wird geöffnet, und das Relais schaltet. Dadurch wird die Stromzuführung zum Heizwiderstand unterbrochen, bis der Sollwert durch Abkühlung des Thermistors wieder unterschritten wird.

2.5. Digitale Meßwertdarstellung

In bisher untersuchten Schaltungen erfolgte eine analoge elektrische Meßwertdarstellung einer gemessenen nichtelektrischen Größe. Dabei mußte der Meßwert abgelesen und teilweise noch umgerechnet werden.

Will man z. B. die Temperatur direkt als Ziffer anzeigen, so muß man jeden Meßwert in eine Folge von Einzelimpulsen zerlegen, die danach zu zählen sind, um das Zählergebnis als Ziffer darzustellen. Die Zerlegung eines solchen Spannungswertes in eine Impulsfolge nennt man Digitalisieren.

Die Umwandlung der analogen Signalwerte in entsprechende Impulsfolgen erfolgt durch die schon genannten Analog-Digital-Umsetzer (ADU). Diese Baugruppen wandeln die analog vorliegende Größe (Stromstärke, Spannung, Widerstand) in einen digitalen Zeit- oder Frequenzmeßwert um. Das Prinzip soll mit dem nachfolgenden Experiment erläutert werden.

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung nach Bild 2.51 auf! Verdunkeln Sie den Fotowiderstand (ohne Tubus) vor dem Anlegen der Betriebsspannung mit der Hand! Lassen Sie nach dem Anlegen der Betriebsspannung allmählich immer mehr Licht einwirken und beobachten Sie die LED am Ausgang der Schaltung!

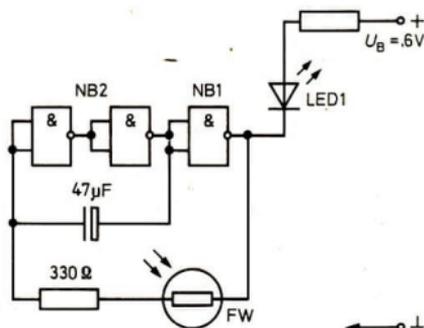


Bild 2.51
Experimentierschaltung zum Prinzip der Analog-Digital-Umsetzung

Die untersuchte Schaltung ist ein Impulsgenerator. Am Ausgang werden Rechteckimpulse abgegeben, deren Frequenz von der Kapazität des Kondensators und dem Wert des Widerstandes in der Rückführung abhängig ist. Der Wert des Fotowiderstandes ist aber wiederum von der Belichtung abhängig. Da die Kapazität des Kondensators konstant bleibt, beeinflusst nur die Wertänderung des Fotowiderstandes die Impulsfrequenz.

Die „analoge“ Veränderung der Belichtung hat eine analoge Veränderung des Widerstandswertes und damit eine entsprechende Veränderung der Frequenz der digitalen Impulse zur Folge.

Als Beispiel soll ein einfacher Analog-Digital-Umsetzer (ADU) mit 4 NAND-Gattern vorgestellt werden. Der Umsetzer ist als Umschaltgerät für einen Zähler mit Nullrückstellung (z. B. für das Zählgerät POLYDIGIT) geeignet (Bild 2.52).

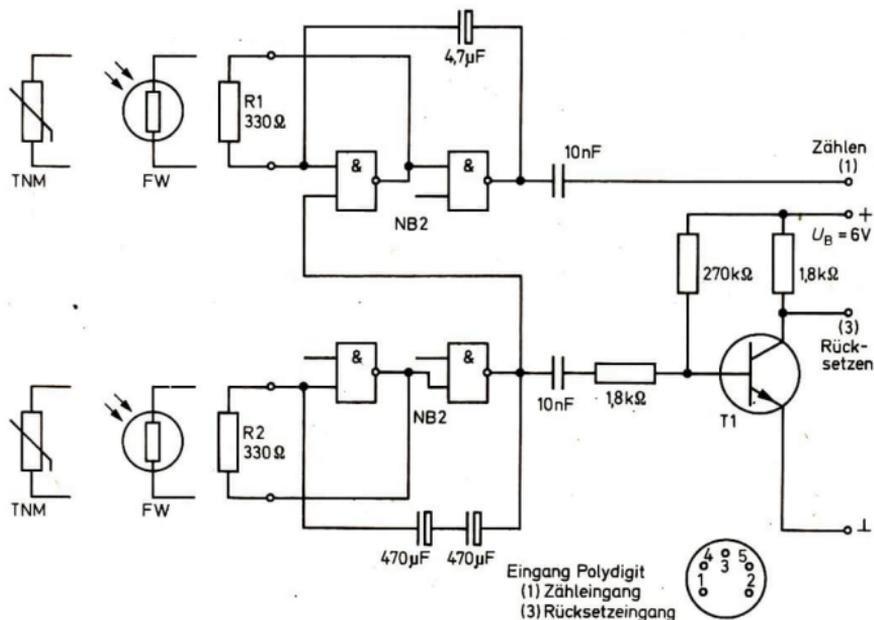


Bild 2.52 Aufbau eines einfachen Analog-Digital-Umsetzers mit NAND-Gattern

Der Analog-Digital-Umsetzer nach Bild 2.52 besteht aus zwei Generatoren: Einem Zählfrequenzgenerator (oben im Bild) und einem Zeitbasisgenerator (darunter). Aufbau und Wirkungsweise dieser Generatoren sind im Abschnitt 4.5. beschrieben.

Der Zählfrequenzgenerator wird durch den Zeitbasisgenerator in gleichen Zeitabständen gestartet, wenn $Q = H$ (bzw. $Q = 1$) ist und gestoppt, wenn $Q = L$ (bzw. $Q = 0$) wird. Die Frequenz beider Generatoren läßt sich in Grenzen durch einen veränderbaren Widerstand (Meßwandler) beeinflussen. Es gibt nur zwei Möglichkeiten, diese Schaltung als ADU mit Meßwandler arbeiten zu lassen:

Fall 1: als Spannungs-Frequenz-Umsetzer

Setzt man den Meßwandler an die Stelle von R1, so wird die Frequenz des Zählfrequenz-generators beeinflusst. Die Zeitbasis, d. h. die Zähldauer, bleibt konstant.

Fall 2: als Spannungs-Zeit-Umsetzer

In diesem Falle setzt man den Meßwandler an die Stelle von R2 und beeinflusst damit die Zeitbasis für die Zähl- und Stillstandszeiten. Die Zählfrequenz bleibt hier konstant.

In beiden Fällen hängt das Zählergebnis vom elektrischen Widerstand des Meßwandlers ab.

- Bauen Sie den ADU-Funktionsblock nach Bild 2.52 für den Fall 1 auf und schließen Sie ein Zählgerät (z. B. Zählgerät POLYDIGIT) an!

Hinweis

Erproben Sie die Wirkungsweise zunächst mit Festwiderständen $R_1 = R_2 = 330 \Omega$! Ersetzen Sie dann den Widerstand R1 durch einen Meßwandler! Vermeiden Sie dabei einen Kurzschluß zwischen den Anschlußklemmen! Ist dieser Widerstandswert jedoch zu groß, so schwingt der Generator nicht an. Die Schaltung funktioniert z. B. nicht mit einem Fotowiderstand im Dunkelzustand, sondern erst ab einer bestimmten Beleuchtungsstärke. Entsprechendes gilt auch für den Thermistor.

Da der Funktionsblock nicht sehr stabil arbeitet, wird eine absolute Eichung der Meßeinrichtung nur schwer gelingen. Für Demonstrationszwecke ist die Schaltung aber gut geeignet. Dabei kann die digitale Anzeige noch durch akustische Signale unterstützt werden.

3. Elektronik in der Nachrichtentechnik

3.1. Signalverstärkung

3.1.1. Signale und Signaldarstellung

Informationen über unsere Umwelt erhalten wir durch Signale. Unter einer *Information* versteht man im allgemeinen eine Nachricht oder eine Mitteilung. Das *Signal* ist der Träger der Information. Im folgenden sollen elektrische Signale untersucht werden.

Eine Gleichspannung, die sich in einem Beobachtungszeitraum nicht verändert, gibt keine Information außer der, daß sie konstant geblieben ist. Ändert sich die Spannung jedoch, so ist es von Bedeutung zu erfahren, *wie* sie sich ändert, ob kontinuierlich oder sprunghaft, ob ansteigend oder abfallend, ob einmalig oder periodisch, mit welcher Frequenz oder Amplitude usw. In Bild 3.1 sind einige Beispiele dargestellt. Die Änderung der Spannung ist ein Signal, daß und wie „etwas geschehen ist“.

Aus dem bisher Dargestellten läßt sich folgende Erkenntnis ableiten:

Ein Signal (elektrisches, optisches, akustisches usw.) stellt immer eine Störung eines bestehenden Zustandes im Sinne einer physikalischen Veränderung dar. Es ist Ausdruck für

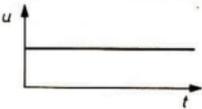
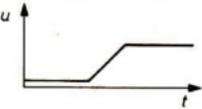
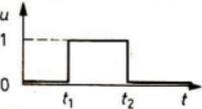
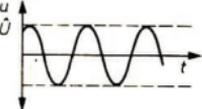
Signalform	Informationsgröße
	keine
	Anstieg $\frac{\Delta U}{\Delta t} > 0$
	Sprung $t_1: 0 \rightarrow 1$ $t_2: 1 \rightarrow 0$
	Amplitude \hat{U} Frequenz f Phase φ

Bild 3.1
Signalformen und zugeordnete Informationsgrößen

die Information und wird von einem materiellen Träger (elektromagnetisches Feld, Gas usw.) getragen. Solche Störungen lassen sich zahlenmäßig anhand von Größen ausdrücken, die die Informationsanteile (z. B. Frequenz, Amplitude und Phase bei einer Wechselspannung) liefern.

Jede Signalübertragung ist mit einem Leistungsverlust verbunden. Ist ein Signal für eine Übertragung zu schwach, so muß es verstärkt werden. Diese Signalverstärkung darf möglichst nicht zu Verzerrungen der Signale führen, damit keine Information verloren geht oder verfälscht wird. Wie das mit Hilfe elektronischer Schaltungen erfolgt, wird im Abschnitt 3.3. dargestellt.

Im Mittelpunkt stehen dabei niederfrequente Tonsignale, die sich in ihrer Frequenz (Tonhöhe) und ihrer Amplitude (Intensität) unterscheiden (Bild 3.2).

Bei der elektronischen Nachrichtenübertragung können diese niederfrequenten Tonsignale folgende Formen annehmen:

- sie treten direkt als Wechselspannung auf
- sie sind einer Gleichspannung überlagert
- sie sind einer hochfrequenten Trägerfrequenz aufmoduliert (Bild 3.3).



Bild 3.2
Niederfrequentes Tonsignal

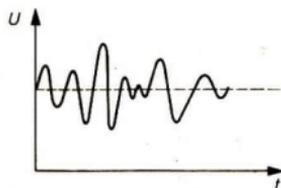
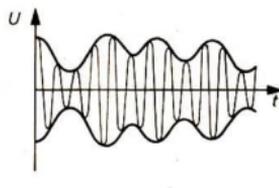


Bild 3.3
Niederfrequente Signalformen



In der weiteren Entwicklung der Rundfunk- und Fernsehtechnik zeichnet sich die zunehmende Anwendung der Digitaltechnik ab (siehe Abschnitt 4.). Die Signale werden im Sender in Impulsfolgen zerlegt (digitalisiert), ineinander verschachtelt, gesendet und im Empfänger wieder zu Signalen zusammengesetzt. Dieses Verfahren bringt erhebliche Vorteile. Die Übertragung ist praktisch störungsfrei, und sie kann mit einer wesentlich höheren Informationsdichte erfolgen.

3.1.2. Signalwandlung und Signalspeicherung

Signalwandler

Sprache und Musik werden allgemein durch Schallschwingungen direkt übertragen. Der Empfang und die Umwandlung der Schallschwingungen erfolgt durch das menschliche Ohr. Für die elektronische Nachrichtentechnik ist die Umwandlung von Schallschwingungen in elektrische Schwingungen und umgekehrt notwendig. Diese Aufgabe erfüllen Signalwandler. Die wichtigsten Signalwandler für Schall sind Mikrofone, Lautsprecher und Kopfhörer.

Mikrofone. Die Schallschwingungen werden von einer Membran aufgenommen. Durch die Schwingungen wird entweder der Stromfluß in einem Stromkreis beeinflusst oder durch Induktion eine proportionale Spannung erzeugt. Das erste Prinzip wird bei dem einfachen *Kohlemikrofon* des Telefons angewendet. In einer Kapsel befindet sich Kohlegrieß. Durch die Schallschwingungen wird der Übergangswiderstand zwischen den Kohlekörnern und damit der Gesamtwiderstandswert verändert. Der am Widerstand R entstehende Spannungsabfall ist ein den Schallschwingungen proportionales Signal (Bild 3.4a).

Beim *dynamischen Mikrofon* ist eine kleine Spule fest mit der Membran verbunden. Diese schwingt im Luftspalt eines Dauermagneten, so daß in der Spule eine den Schallschwingungen entsprechende Wechselspannung induziert wird (Bild 3.4b).

- Schließen Sie einen Kopfhörer direkt an den Eingang eines Oszillografen an! Erzeugen Sie einen Ton vor der Membran des Kopfhörers und betrachten Sie das Oszillogramm! Überlegen Sie, warum der Kopfhörer auch als „Mikrofon“ arbeiten kann!

Lautsprecher und Kopfhörer. Für die Umwandlung von elektrischen Schwingungen in Schallschwingungen wird das Prinzip umgekehrt. Beim *permanent-dynamischen Lautsprecher* fließt der niederfrequente Signalstrom durch die im Magnetfeld des Permanentmagneten angeordnete Schwingspule. Durch die Wechselwirkung der Magnetfelder kommt es zu mechanischen Schwingungen der Spule im Rhythmus des niederfrequenten Signals. Diese Schwingungen werden von der Membran als Schallwellen abgestrahlt (Bild 3.5a).

Beim *Kopfhörer* liegt eine Stahlmembran dicht über den Polen eines Elektromagneten. Der niederfrequente Signalstrom bewirkt eine entsprechende Veränderung des Magnetfeldes und damit die Anziehung bzw. Abstoßung der Membran (Bild 3.5b). Lautsprecher und einfacher Kopfhörer unterscheiden sich in der Qualität der Wiedergabe wesentlich, da ein solcher Kopfhörer nur Frequenzen von etwa 250 Hz bis 6 kHz überträgt.

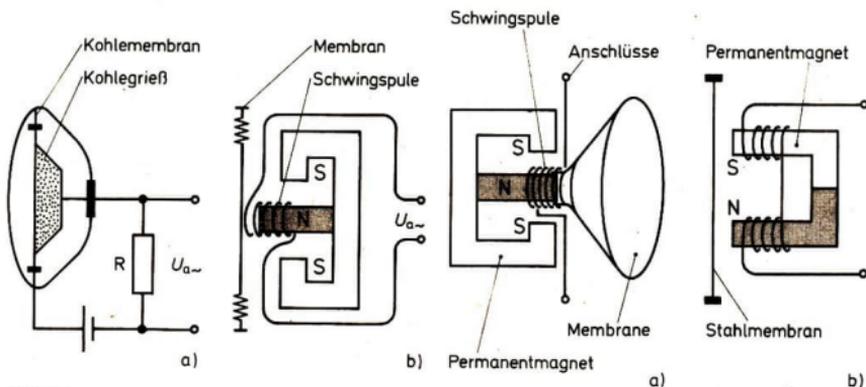


Bild 3.4
Prinzip des Mikrofons
a) Kohlemikrofon
b) Dynamisches Mikrofon

Bild 3.5
a) Prinzip des Lautsprechers
b) Prinzip des Kopfhörers

- Es sollen die Unterschiede in der Wiedergabequalität untersucht werden. Schließen Sie zuerst einen Kopfhörer und danach einen Lautsprecher an den Universalgenerator UVG an! Stellen Sie die Amplitude der Ausgangsspannung fest ein und verändern Sie dann die Frequenz von 10 Hz bis 20 kHz!

Welche Unterschiede stellen Sie fest? Warum hören Sie auch beim Lautsprecher von einer bestimmten Frequenz an nichts mehr?

Für den Anschluß der Schallwandler an elektronische Schaltungen ist es wichtig, den bei Betrieb auftretenden Wechselstromwiderstand (Impedanz) zu kennen. Nachfolgend einige Beispiele für die Impedanz von Signalwandlern:

■ Kohlemikrofon	200 Ω ... 5 k Ω
Dynamisches Mikrofon	20 Ω ... 200 Ω
Kristallmikrofon	100 k Ω ... 1 M Ω
Kondensatormikrofon	10 Ω ... 100 M Ω
Kopfhörer	4 k Ω
Dynamischer Kopfhörer	200 Ω ... 500 Ω
Lautsprecher	4 Ω ... 8 Ω

In vielen Fällen muß durch geeignete Schaltungsmaßnahmen eine Anpassung (s. Abschnitt 1.2.3.) an die elektronische Verstärkerschaltung erfolgen.

Speicher

Bei den Speichern wird zwischen mechanischer, elektromagnetischer und elektronischer Speicherung unterschieden. Häufig angewendete Speicher sind Schallplatte und Magnettonband.

Bei der *Schallplatte* werden die zu speichernden elektrischen Schwingungen in mechanische Schwingungen umgeformt und in die Plattenrinne eingepreßt (Bild 3.6a).

Bei der Abtastung der Schallplatte mit einem magnetischen Abtastsystem wird durch die Auslenkung in der Spule eine Niederfrequenzspannung induziert (Bild 3.6b).

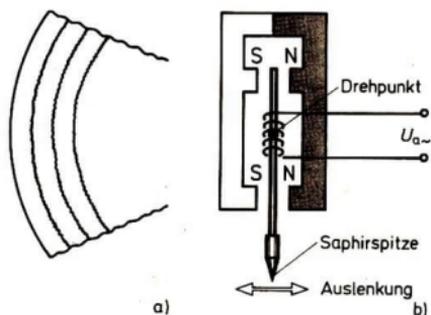


Bild 3.6 Signalisierung mit Schallplatte
a) Schallplattenrinne
b) Magnetisches Abtastsystem

In der Magnetontechnik werden die elektrischen Signale magnetisch gespeichert. Das *Magnettonband* besteht aus einem Trägermaterial mit einer dünnen Schicht aus magnetisierbaren Stoffen. Die elektrischen Schwingungen erzeugen in der Spule eines speziellen

Eisenkerns, dem Magnetkopf, ein entsprechendes elektromagnetisches Feld. Die Stärke- und Richtungsänderungen dieses Feldes werden am Spalt des Magnetkopfes auf das mit gleichmäßiger Geschwindigkeit vorbeilaufende Magnetband übertragen. Auf dem Magnetband entstehen dem Rhythmus des niederfrequenten Signals entsprechend Zonen mit unterschiedlicher Magnetisierung und Polarität (Bild 3.7).

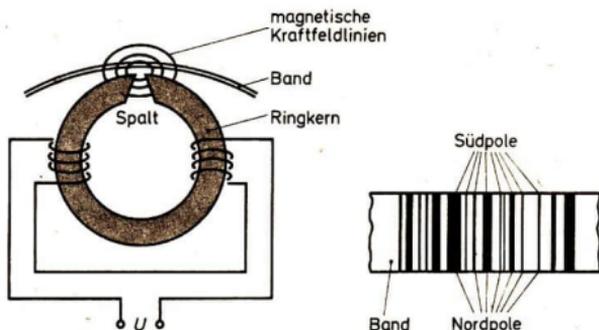


Bild 3.7
Prinzip der Magnetbandaufzeichnung

Die Entnahme des Signals aus dem Signalspeicher erfolgt durch die Umkehrung des Vorgangs. Beim Vorbeilaufen des Magnetbandes am Spalt des Kopfes erzeugen die unterschiedlichen Magnetfelder des Bandes eine entsprechende Induktionsspannung. Diese ergibt nach der notwendigen Verstärkung wieder das niederfrequente Signal.

Die magnetische Speichertechnik wurde in verschiedenen Spezialrichtungen weiterentwickelt. Sie hat heute besonders in der Rechentechnik (Disketten) und in der Unterhaltungselektronik einen hohen Stand erreicht.

Bei den elektronischen Speichersystemen erfolgt eine Digitalisierung des zu speichernden Signals.

3.1.3. Verstärkertechnik

Jede Verstärkung läuft auf eine Erhöhung der Signalleistung $p_s = u_s \cdot i_s$ hinaus. Dazu muß man dem Verstärker eine Versorgungsenergie zuführen, die aus der Betriebsspannungsquelle des Verstärkers entnommen wird (Bild 3.8).

Je nach der betrachteten Größe wird zwischen Leistungsverstärkung, Spannungsverstärkung und Stromverstärkung unterschieden.

Leistungsverstärkung $v_p = v_u \cdot v_i \quad v_p = \frac{U_a}{U_e} \cdot \frac{i_a}{i_e}$

Spannungsverstärkung $v_u = \frac{U_a}{U_e}$

Stromverstärkung $v_i = \frac{i_a}{i_e}$

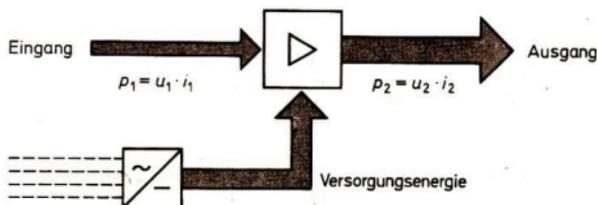
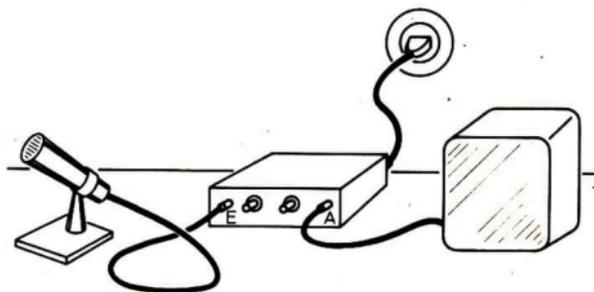


Bild 3.8
Signalverstärkung

Im folgenden soll im wesentlichen die Spannungsverstärkung betrachtet werden. Dabei wird die Eingangsspannung u_e um einen durch die Verstärkerschaltung bestimmten Faktor vergrößert und kann als Ausgangsspannung u_a abgenommen werden. Das Verhältnis dieser beiden Spannungen zueinander wird in der Verstärkertechnik häufig als ein logarithmisches Relativmaß für die Verstärkung genutzt und in Dezibel (dB) angegeben.

$$V = 20 \cdot \lg \frac{u_a}{u_e}$$

So entsprechen zum Beispiel die Verstärkungsverhältnisse von 1:10 einem Wert von 20 dB und von 1:100 einem Wert von 40 dB. Die Verwendung dieses Maßes hat den Vorteil, daß die Gesamtverstärkung von mehreren Verstärkerstufen einfach durch Addition der zugehörigen dB-Werte ermittelt werden kann.

Signalverstärkung mit Transistoren

Im Abschnitt 1.3. ist bereits die physikalische Wirkungsweise von Transistoren und ihre Anwendung in Schaltungen behandelt worden. Es soll untersucht werden, wie man Signale mit möglichst wenig Informationsverlust, das heißt verzerrungsarm, übertragen und verstärken kann.

- ▼ Bauen Sie eine Experimentierschaltung zur Signalverstärkung nach Bild 3.9a auf! Stellen Sie die Verbindungen zum Demonstrationsszillografen und zum Universalgenerator her! Führen Sie dem Eingang der Schaltung eine Eingangsspannung $U_{e_{\sim}} = 2 \text{ V}$ mit einer Frequenz von etwa 1 kHz zu! Verstellen Sie bei konstanter Eingangsspannung den Schleifer des Einstellwiderstandes über den ganzen Bereich und beobachten Sie das Oszillogramm! Wiederholen Sie das Experiment mit einer Schaltung nach Bild 3.9b! Stellen

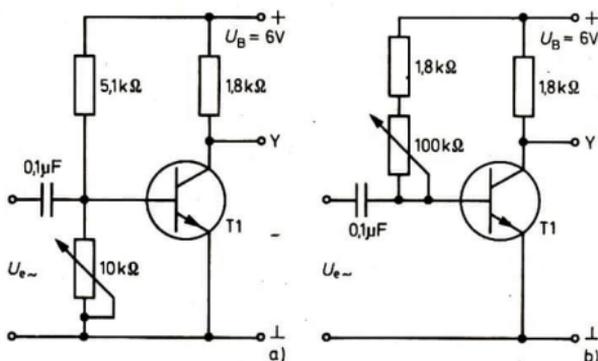


Bild 3.9
 Transistorverstärker; Basisvorspannungserzeugung
 a) mit Spannungsteiler
 b) mit Vorwiderstand

Sie den Schleifer so ein, daß ein verzerrungsfreies Ausgangssignal abgebildet wird! Erhöhen Sie danach die Eingangswechselspannung und beobachten Sie das Oszillogramm!

Die zu verstärkende Eingangswechselspannung U_{e-} wird einer Basisvorspannung überlagert, um zu erreichen, daß an der Basis stets nur positive Spannungsänderungen gegenüber dem Emitter auftreten (siehe Abschnitt 1.3.). Die Höhe der mit Hilfe des Spannungsteilers erzeugten Basisvorspannung beeinflusst die Lage des Arbeitspunktes und damit die Symmetrie der Verstärkung (Bild 3.10). Bei zu großer oder zu kleiner Basisvorspannung kommt es zu Verzerrungen des verstärkten Signals. Eine zu große Eingangswechselspannung führt auch bei richtiger Einstellung des Arbeitspunktes zur „Übersteuerung“ und damit zu Verzerrungen. Unter dem Aussteuerungsbereich versteht man den Spannungsabstand U_{ss} (Spannung von Spitze zu Spitze), der noch ohne sichtbare Verzerrungen von dem Verstärker übertragen wird.

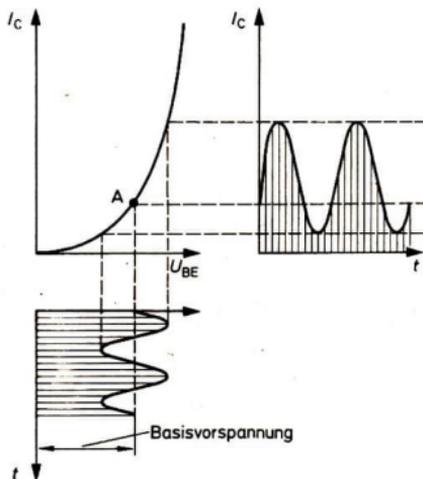


Bild 3.10
 Abhängigkeit der Verzerrungen von der Basisvorspannung

- Begründen Sie, warum die Phase der Ausgangswchselfspannung gegenüber der Eingangswchselfspannung um 180° verschoben ist!
- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Temperaturverhaltens eines Verstärkers die Experimentierschaltung nach Bild 3.9b auf! Stellen Sie die Eingangswchselfspannung und den Arbeitspunkt so ein, daß eine unverzerrte Ausgangsspannung im Oszillogramm abgebildet wird! Verändern Sie die Umgebungstemperatur des Transistors sehr *vorsichtig* mit der von einer Lötkolbenspitze abgestrahlten Wärme. Beobachten Sie dabei das Oszillogramm!

Um eine verzerrungsfreie Verstärkung zu erreichen, muß der eingestellte Arbeitspunkt „festgehalten“ werden. Um dies unabhängig von Veränderungen der Temperatur oder Schwankungen der Betriebsspannung zu gewährleisten, müssen spezielle Schaltungsmaßnahmen zur Stabilisierung vorgenommen werden (Bild 3.11a).

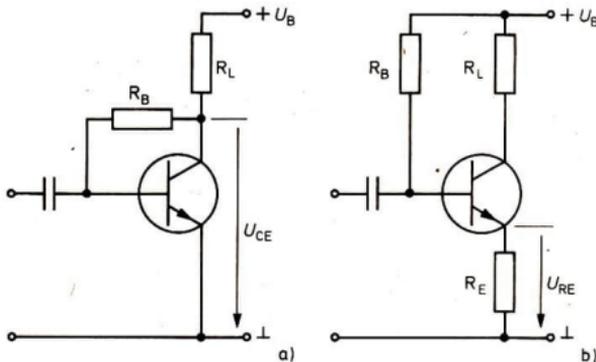


Bild 3.11
Stabilisierung des Arbeitspunktes
a) mit Basisvorwiderstand am Kollektor
b) mit Emittterwiderstand

Wird der Basisvorwiderstand R_B nicht direkt an der Betriebsspannungsquelle, sondern am Kollektor des Transistors angeschlossen, beeinflusst die Kollektor-Emitter-Spannung den Basisstrom. Steigt der Kollektorstrom des Transistors z. B. durch Erwärmung an, tritt am Lastwiderstand R_L ein größerer Spannungsabfall auf. Dadurch sinkt die Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} , gleichzeitig aber auch der durch sie verursachte Basisstrom I_B . Dieser Vorgang wirkt der Erhöhung des Kollektorruhestromes und damit der Verschiebung des Arbeitspunktes entgegen.

An einem in die Emittterleitung geschalteten Widerstand R_E (Bild 3.11b) wird durch den Kollektorstrom ein Spannungsabfall verursacht. Die Basis-Emitter-Spannung wird um den Betrag dieses Spannungsabfalls verkleinert. Eine Erhöhung des Kollektorstroms führt demzufolge zu einer Verringerung der Basis-Emitter-Spannung, die dieser Erhöhung entgegenwirkt.

Die Verstärkereigenschaften eines Transistors lassen sich durch geringfügige Abänderungen der Grundschialtung beeinflussen (Bild 3.12).

- ▼ Untersuchen Sie anhand der drei Schaltungen nach Bild 3.12, wie sich Aussteuerungsbereich und Spannungsverstärkung verändern!
Messen Sie den Ausgangswiderstand eines Emittterfolgers! Verwenden Sie als Wechsel-

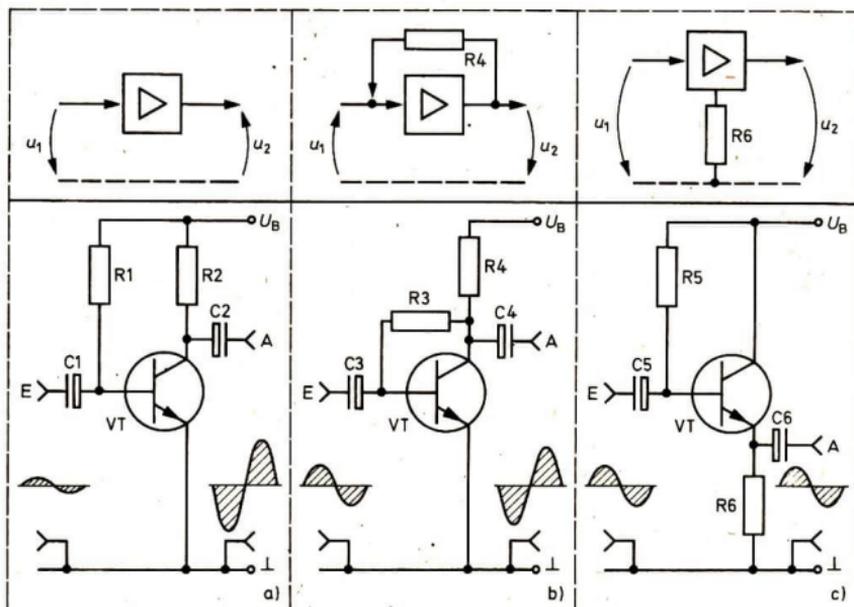


Bild 3.12 Verstärkerstufe mit Transistor

a) Grundschialtung

b) mit Spannungsgegenkopplung

c) mit Stromgegenkopplung (auch Kollektorschaltung oder Emitterfolger)

spannungsquelle den Universalgenerator und zur Messung den Oszillografen! Wegen der großen Spannungsunterschiede zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung ist der Meßbereich am Oszillografen umzuschalten und bei der späteren Berechnung zu berücksichtigen. Die Messung des Ausgangswiderstandes des Emitterfolgers erfolgt mit einer Verschaltung nach Bild 3.13.

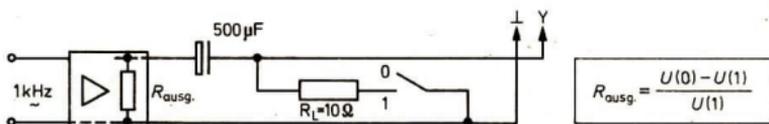
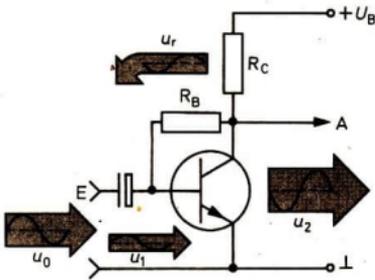


Bild 3.13 Messen des Ausgangswiderstandes mit bekanntem Lastwiderstand R_L

- Belegen Sie mit Hilfe der Versuchsergebnisse folgende allgemeinen Grundsätze für das Betriebsverhalten von Transistorverstärkern:
 - Eine Verstärkerstufe mit Gegenkopplung besitzt gegenüber der Grundschialtung einen größeren Aussteuerungsbereich und eine geringere Spannungsverstärkung.

- Der Emitterfolger hat einen vergleichsweise kleinen Ausgangswiderstand, die Spannungsverstärkung ist nahezu 1.

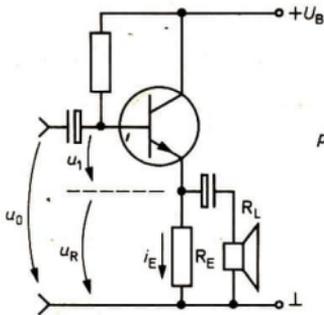
Die Gegenkopplung ist ein Spezialfall der Rückkopplung. Darunter versteht man die Rückführung eines Teiles der Signalausgangsspannung auf den Verstärkereingang. Wirkt diese rückgeführte Wechselspannung der Eingangsspannung entgegen (beide sind um 180° in der Phase verschoben), so handelt es sich um Gegenkopplung. In unserem Falle wird die Phase in der Verstärkerstufe gedreht. Bei der Gegenkopplung wird die Eingangssignalamplitude abgeschwächt, die Verstärkung verringert sich, aber der Aussteuerungsbereich wird größer (Bild 3.14a).



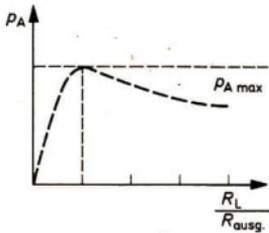
u_0 Generatorspannung
 u_1 wirksame Steuerspannung
 u_2 Ausgangsspannung
 u_r rückgeführte Spannung
 Spannungsverstärkung:

$$v_r = \frac{u_2}{u_0}$$

a)



p_A Ausgangsleistung



$\frac{R_L}{R_{\text{ausg.}}}$	$\frac{p_A}{p_{A \text{ max}}}$
$\frac{1}{4}$	$\frac{16}{25} \approx \frac{3}{5}$
$\frac{1}{2}$	$\frac{8}{9}$
1	1
2	$\frac{8}{9}$
4	$\frac{16}{25} \approx \frac{3}{5}$

b)

Bild 3.14 Gegengekoppelte Verstärkerstufen

- a) Gegenkopplung durch den Widerstand R_B
- b) Emitterfolger als Anpassungsverstärker für einen Lautsprecher und aufgenommene Leistung

Der Emitterfolger ist ein Anpassungsverstärker für einen geringen Lastwiderstand. Die größte elektrische Leistung wird übertragen, wenn der Ausgangswiderstand des Verstärkers $R_{\text{ausg.}}$ (nicht identisch mit dem Widerstand R_E !) gleich dem Lastwiderstand R_L ist. Ein Lautsprecher hat beispielsweise einen kleinen inneren Widerstand ($R_L = 4 \Omega$ bis 8Ω), der an den Verstärkerausgang angepaßt werden muß (Leistungsanpassung, Bild 3.14b).

Eine Ursache für Verzerrungen bei der Signalübertragung durch einen Verstärker ist des-

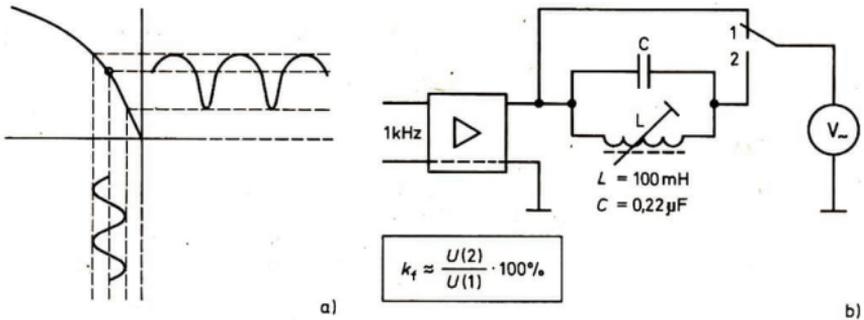


Bild 3.15 Nichtlineare Verzerrungen und ihre Messung
a) Verzerrung an nichtlinearer Übertragungskennlinie
b) Meßschaltung zur Ermittlung des Klirrfaktors

sen gekrümmte Übertragungskennlinie. Das führt zu nichtlinearen Verzerrungen (Bild 3.15a).

Eine verzerrte Wechselspannung setzt sich aus einer sinusförmigen Grundschwingung der Frequenz f und aus Oberschwingungen der Frequenzen $2f$, $4f$ usw. zusammen. Ein Maß für die Verzerrung ist der Klirrfaktor k_f , der den prozentualen Anteil der Oberschwingungen an der Gesamtwechselspannung angibt.

$$k_f = \frac{U_{\text{eff, Ober}}}{U_{\text{eff, gesamt}}} \cdot 100\%$$

Will man den Klirrfaktor ermitteln, so muß man die Grundschwingung mit einer Frequenzsperre (z. B. Parallelschwingkreis) herausblenden (Bild 3.15b).

Der Klirrfaktor ist eine Qualitätsgröße für den Verstärker. Eine besondere Qualitätsklasse stellt der HiFi-Verstärker dar (von englisch: high fidelity – hohe Wiedergabetreue). Sein Klirrfaktor ist höchstens 1%. Bei der Telefonübertragung entsteht dagegen ein Klirrfaktor bis zu 20%.

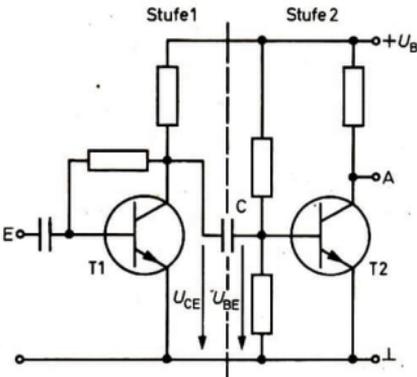


Bild 3.16
Kopplung von Transistor-Verstärkerstufen

Die Kopplung zwischen zwei Transistorverstärkerstufen für Wechselspannungsverstärkung erfolgt durch Kondensatoren (s. Abschnitt 1.3.). Am Ausgang der ersten Verstärkerstufe ist die Ausgangswechselspannung der Gleichspannung U_{CE} zwischen Kollektor und Emitter überlagert. Am Eingang der zweiten Verstärkerstufe wird sie der Basisvorspannung überlagert. Diese beiden Gleichspannungspotentiale sind unterschiedlich und müssen durch einen Kondensator getrennt werden (Bild 3.16). Der Kondensator und der Widerstand des Basisvorspannteilers bzw. der Basis-Emitter-Widerstand des Transistors bilden einen Spannungsteiler. An ihm liegt die Ausgangswechselspannung der ersten Stufe an.

Aus einzelnen Verstärkerstufen läßt sich durch Kopplung ein mehrstufiger Verstärker aufbauen (Bild 3.17). Die Gesamtverstärkung entspricht dann dem Produkt der Verstärkungen der Stufen.

Gesamtverstärkung $v = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3$

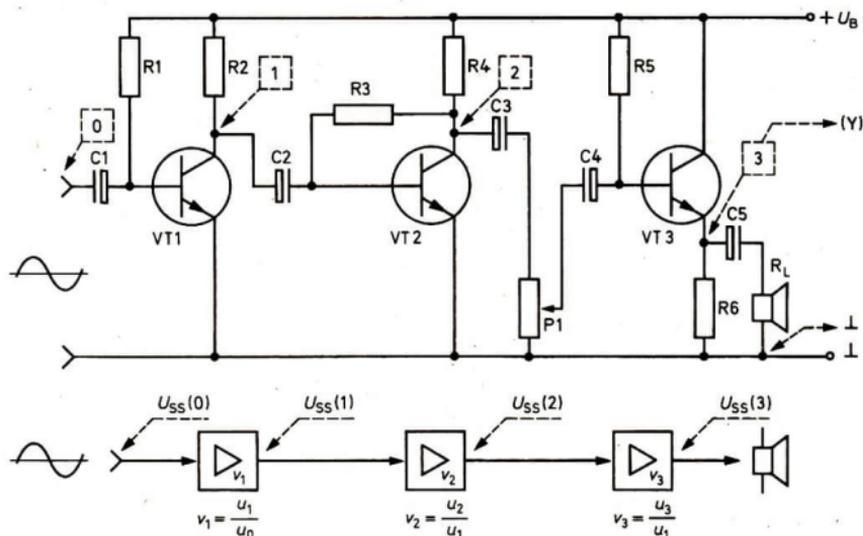


Bild 3.17

Mehrstufiger Verstärker mit Widerstandsanzpassung für einen Lautsprecher

- ▼ Bauen Sie eine mehrstufige Verstärkerschaltung nach Bild 3.17 auf!
Überprüfen Sie nach Aufbau der Schaltung die Arbeitspunkte der Transistoren ($U_{CE} \approx \frac{1}{2} U_E$)! Da der Arbeitspunkt von der Stromverstärkung des verwendeten Transistors abhängt, kann die Kollektorstromstärke und damit die Spannung U_{CE} durch Korrektur der Basiswiderstände verändert werden.
Diese Veränderungen in der Schaltung sind nur bei abgeschalteter Betriebsspannung vorzunehmen!
Ermitteln Sie Aussteuerungsbereich, Verstärkungen der Stufen und Gesamtverstärkung

des Verstärkers! Berechnen Sie die erreichte Ausgangssignalleistung, wenn der Verstärker voll ausgereizt ist!

$$P_e = \frac{U_{SS}^2(3)}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot R_L}, \text{ denn } U_{\text{eff}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} U_{SS}$$

Verwenden Sie einen Kleinlautsprecher (6...8 Ω, 1 W)!

- Es soll die Verstärkung bei unterschiedlichen Frequenzen untersucht werden. Schließen Sie dazu an die Schaltung nach Bild 3.17 den Universalgenerator als Wechselspannungsquelle für die Eingangsspannung und den Demonstrationsszillographen als Meßgerät für die Ausgangsspannung entsprechend Bild 3.18 an! Stellen Sie bei einer Frequenz der Eingangsspannung von 1 kHz die Amplitude so ein, daß im Oszillogramm eine unverzerrte Ausgangsspannung abgebildet wird (Schleifer von P1 auf Mittelstellung)! Verändern Sie die Frequenz der konstanten Eingangsspannung zwischen 10 Hz und 20 kHz und beobachten Sie das Oszillogramm der Ausgangsspannung!
- Ermitteln Sie aus dem Oszillogramm für verschiedene Frequenzen der konstanten Eingangsspannung die Höhe der Ausgangsspannung! Stellen Sie den Zusammenhang $U_a = f(f)$ grafisch dar! Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Darstellung in Bild 3.19! Überlegen Sie, warum die Verstärkung von der Frequenz abhängt!

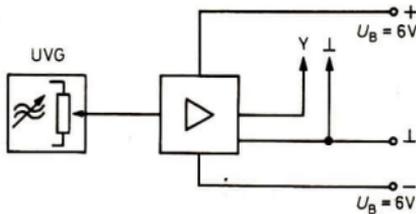


Bild 3.18
Experimentierschaltung zur Bestimmung des Frequenzganges

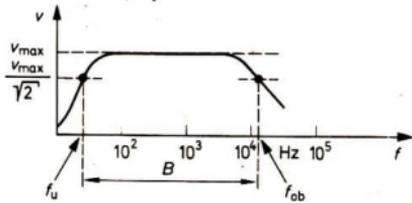
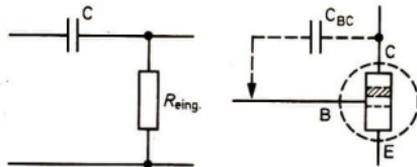


Bild 3.19
Frequenzgang eines Niederfrequenz-Verstärkers



Eine Ursache für den Verstärkungsabfall bei niedrigen und hohen Frequenzen ist die Frequenzabhängigkeit des Wechselstromwiderstandes von Kondensatoren. Dieser ist bei geringer Frequenz hoch und nimmt mit zunehmender Frequenz immer mehr ab; $X_C = \frac{1}{f}$.

Im Bereich der unteren Frequenzen werden die Kopplungskondensatoren (C1 bis C5) wirksam und im Bereich der oberen Frequenz die inneren Sperrschichten der Transistoren zwischen Basis und Kollektor, die eine zusätzliche Spannungsgegenkopplung bewirken. Durch zusätzliche Frequenzglieder in der Schaltung kann der Frequenzgang noch verändert werden (Klangfarbenregelung).

Die Übertragungsqualität eines Verstärkers wird durch den *Frequenzgang* bestimmt. Das ist die Abhängigkeit der Spannungsverstärkung von der Signalfrequenz (Bild 3.19). Kenngrößen des Frequenzganges sind die *untere Grenzfrequenz* f_u und die *obere Grenzfrequenz* f_{ob} , bei denen die Verstärkung auf den Wert $\frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$ abgesunken ist. Das sind etwa

70% des Maximalwertes. Die *Bandbreite* B des Verstärkers ist die Differenz von oberer und unterer Grenzfrequenz: $B = f_{ob} - f_u$. Da unser Hörbereich von 20 Hz bis etwa 20 kHz reicht, sollten die Grenzfrequenzen unterhalb und oberhalb dieses Bereichs liegen. Da der überstrichene Frequenzbereich relativ groß ist, wird im Diagramm die Frequenz im logarithmischen Maßstab aufgetragen, das heißt, alle Zehnerpotenzen haben auf der Achse gleiche Abstände, dazwischen gibt es die logarithmische Einteilung, z. B. $\lg 2 = 0,3$; $\lg 5 = 0,7$ usw. Die genauen Werte kann man Tabellen entnehmen bzw. mit dem Schulrechner SR 1 ermitteln.

Die in Bild 3.17 dargestellte Verstärkerschaltung hat jedoch noch einen großen Mangel: die erreichte Ausgangsleistung ist gering und der Aussteuerungsbereich zu klein. Eine Verbesserung erreicht man, indem man die Endstufe als *Gegentaktverstärker* aufbaut (Bild 3.20). Sie besteht aus einem npn- und einem pnp-Transistor. Die positive Halbwelle der Signalspannung steuert den npn-Transistor auf, die negative Halbwelle den pnp-Transistor. Da je Transistor der gesamte Kollektorstrombereich genutzt werden kann, ergibt sich eine wesentlich größere Leistung.

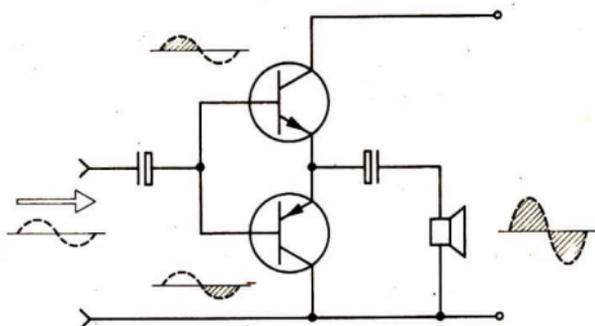


Bild 3.20
Gegentakt-Verstärkerstufe

Bei einer *Stereofonieübertragung* (Stereoverstärkung), soll ein räumlicher Höreindruck erzeugt werden, wie er z. B. in einem Konzertsaal entsteht. Dazu sind zwei gleichwertige

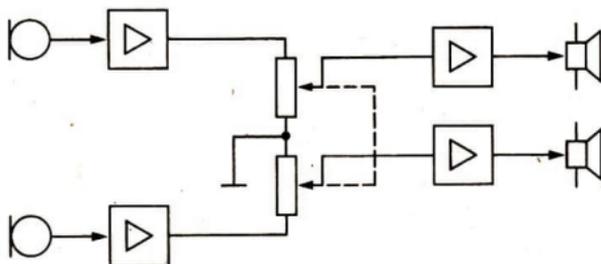


Bild 3.21
Prinzip der Stereofonie-
übertragung

Übertragungskanäle erforderlich, die über eine mechanisch gekoppelte Balanceregulierung aufeinander abgestimmt werden (Bild 3.21).

Integrierter Niederfrequenzverstärker

Ein Niederfrequenzverstärker (NF-Verstärker) mit großer Verstärkung und großem Aussteuerungsbereich, geringen nichtlinearen Verzerrungen, Leistungsanpassung und einstellbarem Frequenzgang erfordert einen erheblichen schaltungstechnischen Aufwand, wenn man ihn mit Einzeltransistoren aufbauen will. Da diese Eigenschaften aber immer wieder gefordert werden, ist es naheliegend, den Verstärker als integrierten Schaltkreis herzustellen.

- ▼ Bauen Sie zur Anwendung eines integrierten NF-Verstärkers eine Experimentierschaltung mit dem Baustein LV des SEG Elektronik/Mikroelektronik nach Bild 3.22 auf! Führen Sie an diesem Verstärker die in den beiden vorangehenden Experimenten vorgenommenen Messungen durch! Vergleichen Sie die Ergebnisse!

3.2. Trägerfrequenzverfahren bei der drahtlosen Nachrichtenübermittlung

3.2.1. Prinzip des Trägerfrequenzverfahrens

Die physikalische Grundlage der drahtlosen Nachrichtenübermittlung ist die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen (siehe LB Physik Kl. 10).

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung elektromagnetischer Wellen die Experimentierschaltung nach Bild 3.23 auf! Verändern Sie die Kapazität des Drehkondensators so lange, bis das Oszillogramm eines stark einfallenden Senders sichtbar wird! Beobachten Sie das Schwingungsbild bei niedrigen und hohen Zeitablenkfrequenzen des Oszillografen!

Beim Trägerfrequenzverfahren werden Signale mit Hilfe elektromagnetischer Wellen übertragen (Bild 3.24). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wel-

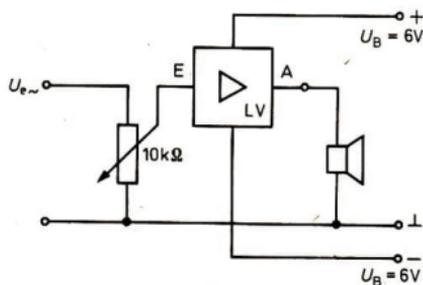


Bild 3.22
Experimentierschaltung zum integrierten Niederfrequenzverstärker

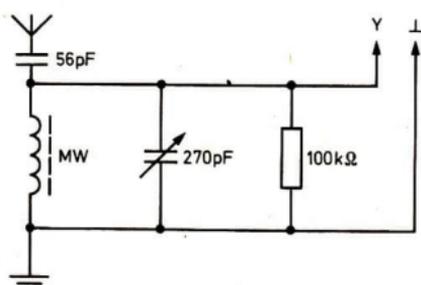


Bild 3.23
Experimentierschaltung zum Trägerfrequenzverfahren

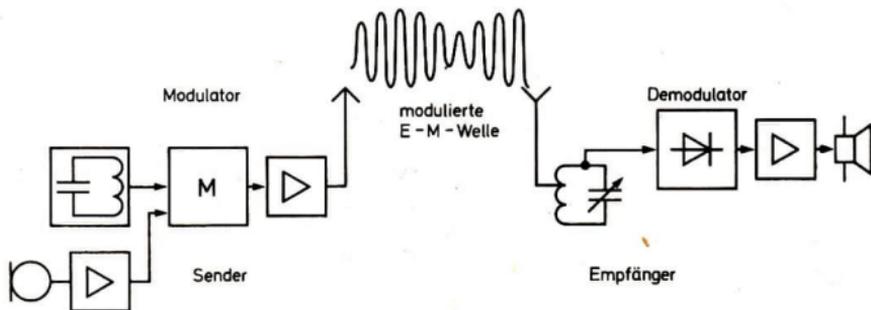


Bild 3.24 Prinzip einer drahtlosen Nachrichtenübermittlung

len entspricht der Lichtgeschwindigkeit. Der Sender besteht aus einem Oszillator zur Erzeugung der Trägerschwingung und einem Modulator zum Aufträgen der Signale auf den Träger (Modulation). Der Sendeverstärker dient zur Erzeugung der benötigten Sendeleistung zur Antennenanpassung. Im Empfänger, der auf die Frequenz der Trägerschwingung abgestimmt ist, werden die Signale durch die Demodulationsstufe wieder vom Träger getrennt (Demodulation), weiter verstärkt und über Lautsprecher oder Bildschirm wiedergegeben.

Bei der Modulation unterscheidet man Amplitudenmodulation (AM), Frequenzmodulation (FM) und Phasenmodulation (PM). Dabei wird jeweils einer der drei Informationsparameter (siehe Abschnitt 3.1.1.) des Trägers, nämlich Amplitude, Frequenz oder Phase im Rhythmus der Signalschwingungen verändert (Bild 3.25).

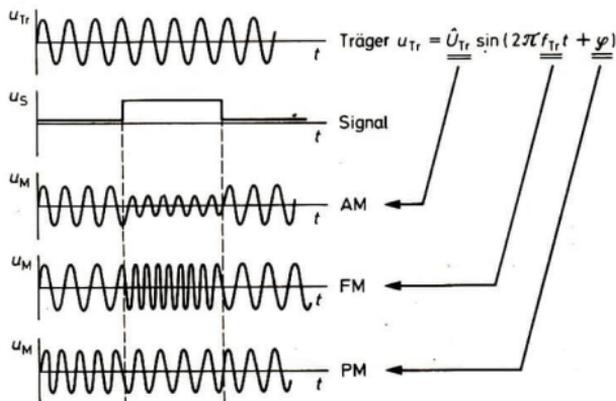


Bild 3.25 Schwingungsbilder der drei Modulationsarten

- Erkunden Sie, welche der Modulationsarten beim Hörrundfunk (LW, MW, KW und UKW) sowie beim Fernsehen für Bild- und Tonübertragung angewendet werden! Welche Bereiche der Trägerfrequenz sind den Sendebereichen LW, MW, KW und UKW zugeordnet?

Berechnen Sie die Bereiche der Wellenlängen nach der Formel $c = \lambda \cdot f$ ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ist die Lichtgeschwindigkeit, λ ist die Wellenlänge)

3.2.2. Elektrischer Schwingkreis

Kernstück eines Senders oder Empfängers ist der elektrische Schwingkreis. Dieser besteht aus Spule und Kondensator. Je nach der Zusammenschaltung der Elemente unterscheidet man den Reihen- und den Parallelschwingkreis. In dem Experiment nach Bild 3.23 ist ein Parallelschwingkreis eingesetzt worden. Der elektrische Schwingkreis besitzt Resonanzeigenschaften. Die Resonanzfrequenz ist:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

L : Induktivität in H $\left(1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}\right)$
 C : Kapazität in F $\left(1 \text{ F} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}\right)$

Für praktische Berechnungen verwendet man die Formel:

$$f = \frac{159}{\sqrt{L \cdot C}}$$

f in kHz f in MHz
 L in mH oder L in μH
 C in nF C in pF

- Berechnen Sie aus dem Experiment nach Bild 2.23 angenähert die Induktivität der Schwingkreisspule aus der Trägerfrequenz des eingestellten Senders unter der Annahme, daß der Drehkondensator auf $C = 100 \text{ pF}$ eingestellt ist!

Induktivität und Kapazität kann man aus dem Wechselstromwiderstand von Spule bzw. Kondensator bestimmen. Er ist für die Spule

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = 2\pi \cdot f \cdot L$$

und für den Kondensator

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

- Überlegen Sie, wie man den Wechselstromwiderstand messen kann!
- Bauen Sie zum Nachweis der Resonanz die Experimentierschaltung nach Bild 3.26 auf! Die Eingangswchselspannung wird dem Stromversorgungsgerät SVG entnommen. Führen Sie den beweglichen Teil des Eisenkernes ganz in die Spule ein und schließen Sie den magnetischen Kreis! Ziehen Sie langsam den Kern aus der Spule heraus und beobachten Sie den Maximal- und Minimalwert der Stromstärke! Führen Sie das Experiment mit einer Glühlampe als Indikator durch!

Die Veränderung der Induktivität durch die Bewegung des Kerns hat eine Veränderung des induktiven Widerstandes X_L zur Folge (siehe Abschnitt 1.2.4.). Erreicht X_L den Wert des kapazitiven Widerstandes X_C , ist für die Frequenz der anliegenden Wechselspannung der Resonanzfall erreicht. Der Wechselstromwiderstand des Parallelschwingkreises er-

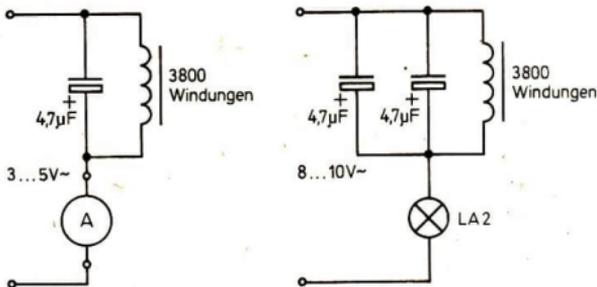


Bild 3.26
Experimentierschaltung zur
Parallelresonanz

reicht einen Maximalwert und die Stromstärke ein Minimum. Der Resonanzfall kann auch durch die Veränderung der Kapazität herbeigeführt werden.

- Nehmen Sie die Resonanzkurve eines Parallelschwingkreises mit Hilfe des Universalgenerators und eines Wechselspannungsmessers bzw. des Demonstrationsszillografen als Indikator auf! Bestimmen Sie Resonanzfrequenz, Bandbreite und Induktivität der Spule! Meßschaltung und Meßbeispiel sind in Bild 3.27 dargestellt.

Hinweis

Die Spule hat außer dem Wechselstromwiderstand auch noch einen endlichen Gleichstromwiderstand R , den man für genauere Messungen ebenfalls bestimmen muß. Die korrigierte Formel lautet

$$Z = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \sqrt{R^2 + 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot L^2}$$

Diese Formel ist nach L aufzulösen und mit den Meßwerten zu berechnen.

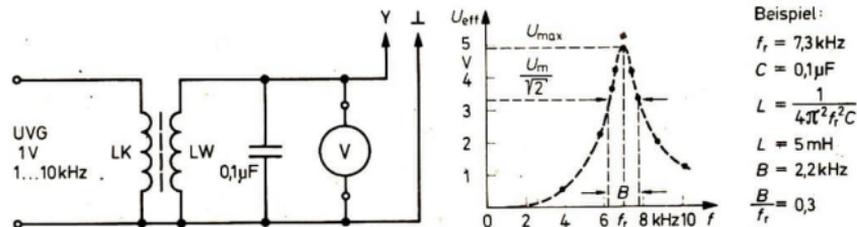


Bild 3.27 Meßschaltung und Meßbeispiel zur Resonanzkurve eines elektrischen Schwingkreises

3.2.3. Erzeugung elektrischer Schwingungen mit elektronischen Schaltungen

Im Sender (und auch im Überlagerungsempfänger) werden Sinusschwingungen mit einem elektronischen Generator (Sinusgenerator) erzeugt. Dieser besteht im Prinzip aus einem mitgekoppelten Verstärker und einem Frequenzglied (Bild 3.28).

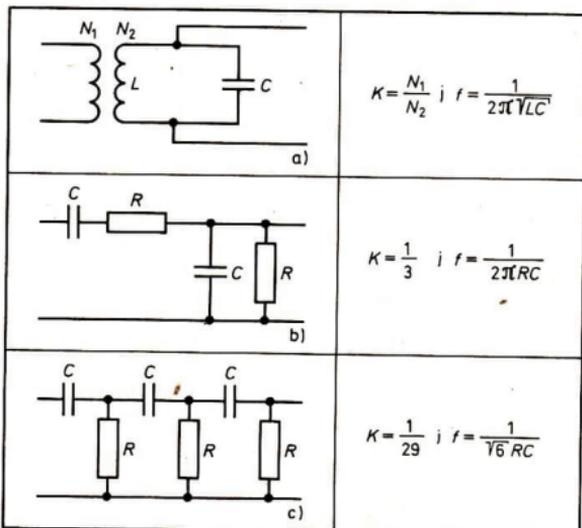
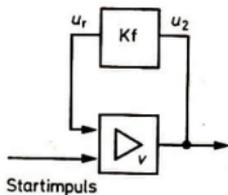


Bild 3.28

Prinzip eines Sinusgenerators und Beispiele für Frequenzglieder

- Schwingkreis
- Wien-Vierpol
- RC-Phasenschieberkette

Mitkopplung kommt an einem Verstärker zustande, wenn die vom Ausgang an den Eingang zurückgeführte Wechselspannung mit der Eingangswechselspannung die gleiche Phasenlage hat, diese also bei der Überlagerung verstärkt. Der Mitkopplungsfaktor K ist das Verhältnis von rückgeführter Spannung u_r zur Ausgangsspannung u_2 . Die Spannungsverstärkung v des Verstärkers ohne Mitkopplung ist das Verhältnis der Ausgangsspannung u_2 zur Eingangsspannung u_1 .

$$K = \frac{u_r}{u_2} \quad ; \quad v = \frac{u_2}{u_1}$$

Der Generator wird schwingungsfähig, wenn das Produkt $K \cdot v = 1$ ist, also die Signalverstärkung mindestens so groß ist wie der Kehrwert des Mitkopplungsfaktors. Die Schwingungen werden durch einen Startimpuls ausgelöst. Dieser entsteht meist schon beim Einschalten des Gerätes durch den Einschaltstromstoß.

- ▼ Bauen Sie einen elektronischen Generator nach Bild 3.29 auf! Kontrollieren Sie das Verhalten der Schaltung beim Anlegen der Betriebsspannung mit dem Kopfhörer! Vergleichen Sie mit Hilfe des Demonstrationsszillographen und des elektronischen Schalters die Phasenlage der Wechselspannung am Eingang der Phasenschieberkette (Punkt A) und nach jedem RC-Glied (Punkte B, C, D)!
- ▼ Bauen Sie eine weitere elektronische Generatorschaltung (RC-Wien-Vierpolgenerator) nach Bild 3.30 auf! Überprüfen Sie das Verhalten der Schaltung mit dem Kopfhörer und dem Demonstrationsszillographen! Begründen Sie, warum der RC-Wien-Vierpolgenerator mit 2 Transistoren aufgebaut werden muß!

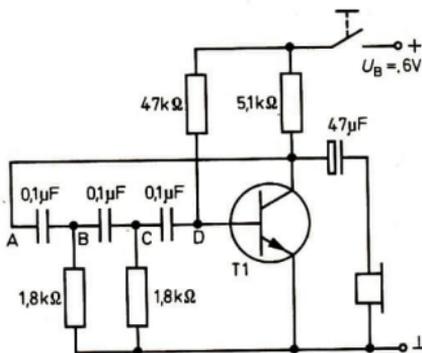


Bild 3.29
Experimentierschaltung zum RC-Generator mit
Phasenschieberkette

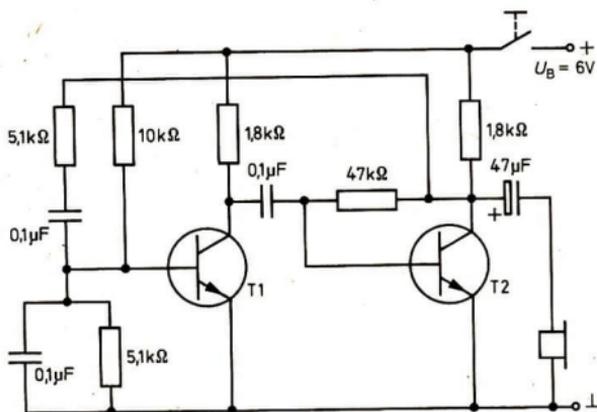


Bild 3.30
Experimentierschaltung
zum RC-Wien-Vierpolgene-
rator

3.2.4. Modulation einer hochfrequenten Schwingung

Durch die Modulation wird dem Signalträger das Signal aufgeprägt. Bei der *Amplitudenmodulation* (AM) wird die Amplitude des Trägers im Rhythmus der Signalschwingungen verändert. Dabei entstehen drei Schwingungsanteile:

- die Trägerschwingung $\hat{U}_{Tr} \cdot \cos 2\pi \cdot f_{Tr} \cdot t$
(enthält keine Signalgrößen)
- das linke Seitenband $\frac{\hat{U}_s}{2} \cos 2\pi (f_{Tr} - f_s) t$
(enthält die Signalgrößen U_s und f_s)
- das rechte Seitenband $\frac{\hat{U}_s}{2} \cos 2\pi (f_{Tr} + f_s) t$
(enthält ebenfalls diese Signalgrößen).

Demnach wird die Information beim Trägerfrequenzverfahren nur durch die Seitenbänder übertragen.

In der Funktechnik verwendet man den Begriff *Modulationsgrad* M . Das ist das Verhältnis von Signalamplitude \hat{U}_s zur Trägeramplitude \hat{U}_{Tr} , also $M = \frac{\hat{U}_s}{\hat{U}_{Tr}}$. Beim Rundfunk wird ein Modulationsgrad $M = 35\%$ angewendet, d. h. der Mittelwert der Trägeramplitude schwankt bei der Modulation um etwa ein Drittel (Bild 3.31a). Die Seitenbänder enthalten also die Signalgrößen M und f_s zum Trägerfrequenzband (Bild 3.31b). Man sieht daraus, daß zur Signalübertragung nicht eine Trägerfrequenz, sondern ein ganzer Frequenzbereich (die Bandbreite) erforderlich ist. Die Seitenbänder zweier benachbarter Trägerfrequenzen dürfen sich nicht überschneiden.

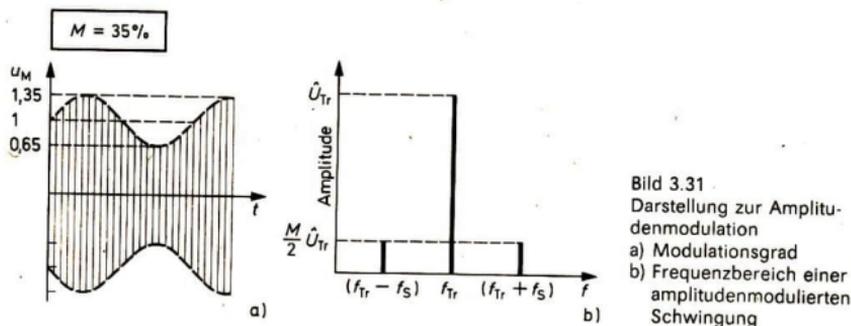


Bild 3.31

Darstellung zur Amplitudenmodulation

a) Modulationsgrad

b) Frequenzbereich einer amplitudenmodulierten Schwingung

- Im Mittel- und Langwellenbereich des Rundfunks ist je Sender eine Bandbreite von 9 kHz festgelegt. Berechnen Sie, wieviel Sender auf diesen Wellenbereichen regional arbeiten können, ohne sich gegenseitig zu stören!

Die *Frequenzmodulation* (FM) ist technisch komplizierter. Hier sind zur Übertragung mehrere Seitenbänder erforderlich. Dadurch ergibt sich eine Bandbreite je Sender von 180 kHz bis 200 kHz. Diese Sender können nur mit höheren Trägerfrequenzen wirtschaftlich betrieben werden, z. B. im UKW-Bereich. Bei der Modulationsart FM erreicht man eine höhere Übertragungsqualität, da auch die höheren Frequenzen mit übertragen werden und die Übertragung im wesentlichen störungsfrei ist.

Der Aufbau und der Betrieb eines Senders ist genehmigungspflichtig. Dabei werden hohe Anforderungen an eine genau vorgegebene und konstante Sendefrequenz gestellt. Diese Sender sind mit einem frequenzstabilisierten Generator ausgerüstet. Die Stabilisierung erreicht man mit einem Schwingquarz.

3.3. Empfangstechnik

3.3.1. Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung

Im Empfänger muß die Signalspannung aus der modulierten Schwingung zurückgewonnen werden. Das einfachste Verfahren zur Demodulation ist die teilweise Gleichrichtung mit einer Diode.

- ▼ Bauen Sie zur Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung die Experimentierschaltung nach Bild 3.32 auf! Beobachten Sie am Oszillografen den Betriebszustand an Punkt A und Punkt B! Stellen Sie dazu den Drehkondensator so ein, daß ein Sender empfangen wird!

Als Antenne dient eine Kupferdrahtlitze von mehreren Metern. Der Erdanschluß kann an der Wasserleitung oder an Heizungsrohren vorgenommen werden.

Wodurch unterscheiden sich die Oszillogramme?

- Versuchen Sie, mit dieser Schaltung einen Ortssender im MW-Bereich zu empfangen, indem Sie an Stelle von R_L einen Kopfhörer einsetzen! Zeichnen Sie die modulierten und die demodulierte Schwingung nach den beobachteten Schwingungsbildern auf!

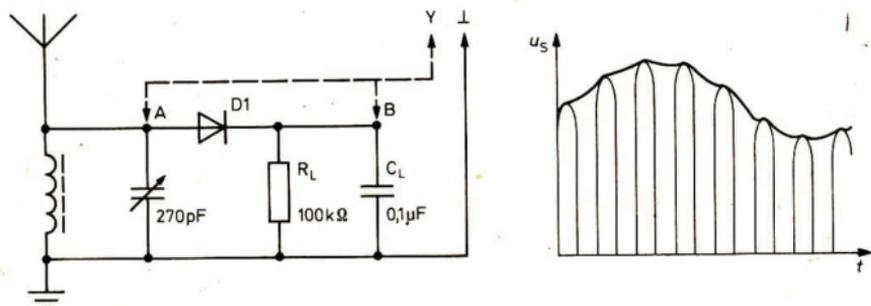


Bild 3.32 Experimentierschaltung zur Demodulation einer amplitudenmodulierten Schwingung

Die im Schwingkreis induzierte modulierte Spannung wird mit der Diode D1 gleichgerichtet und mit dem Ladekondensator C_L geglättet. Die Kapazität von C_L ist (zusammen mit dem Lastwiderstand R_L) so zu bemessen, daß die hochfrequenten Schwingungsteile nahezu vollständig geglättet, aber die wesentlich langsameren Amplitudenschwankungen noch übertragen werden. Für die Berechnung von C_L gibt es die Richtformel

$$\frac{1}{f_{Tr}} \ll C_L \cdot R_L \ll \frac{1}{f_s}$$

- Schätzen Sie aus der Richtformel den Wert für C_L ab, wenn $f_{Tr} = 1$ MHz (MW-Bereich), $f_s = 1$ kHz (Tonfrequenzbereich) und Lastwiderstand $R_L = 2$ k Ω sind!

Die untersuchte einfache Empfänger- und Demodulatorschaltung wird als Detektorschaltung bezeichnet.

3.3.2. Geradeausempfänger

Das mit dem Experiment nach Bild 3.32 empfangene Signal ist für den Nachweis noch zu schwach. Es muß weiter verstärkt werden. Einen Signalempfänger, der die empfangenen Schwingungen auf direktem Wege (Demodulation, Verstärkung) verarbeitet, nennt man einen Geradeausempfänger. Ein solcher Empfänger ist der Detektor mit Verstärker.

- Bauen Sie die Experimentierschaltung eines Detektors nach Bild 3.33 auf! Überprüfen Sie die Wiedergabe mit dem Kopfhörer für verschiedene Einstellungen des Drehkondensators! Welche Unterschiede ergeben sich zu den Ergebnissen des vorhergehenden Experiments?

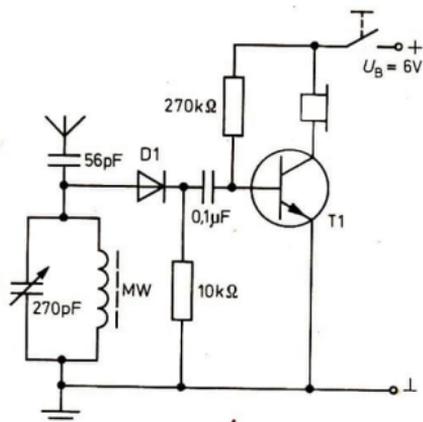


Bild 3.33
Experimentierschaltung zum Detektorempfänger mit Verstärker

In der Schaltung nach Bild 3.33 sind Demodulationsstufe und Verstärker noch getrennt. Beim nun folgenden Empfängertyp wirkt der Transistor sowohl als Demodulator, nämlich durch die Gleichrichterwirkung der Basis-Emitter-Strecke, als auch als Verstärker. Eine solche Schaltung bezeichnet man als *Audionempfänger* (von lateinisch: audire – hören). Eine einfache Audionschaltung ist in Bild 3.34 dargestellt. Diese Schaltung zeichnet sich dadurch aus, daß der Transistor im Ruhezustand nahezu keinen Basisstrom führt, die Schaltung also einen großen Basiswiderstand besitzt (im Beispiel 270 k Ω). Für den Ladekondensator gelten dieselben Überlegungen wie beim Detektorempfänger. Durch die Kondensatoraufladung verschiebt sich der Arbeitspunkt und schwankt danach im Rhythmus der Signalschwingungen (Bild 3.34, rechts).

- Bauen Sie einen Audionempfänger als Experimentierschaltung auf und untersuchen Sie seine Funktionsweise mit dem Demonstrationsoszilloskopfen!
- Verbessern Sie die Schaltung durch einen nachgeschalteten Niederfrequenzverstärker! Bauen Sie dazu die Experimentierschaltung nach Bild 3.35 auf! Stellen Sie den Drehkondensator auf den Empfang eines Ortssenders ein und überprüfen Sie die Möglichkeit der Lautstärkeregelung! Versuchen Sie, die Bandbreite des Ortssenders durch geeignete Ankopplung von Antenne und Schwingkreis (lose Kopplung) noch zu verändern!

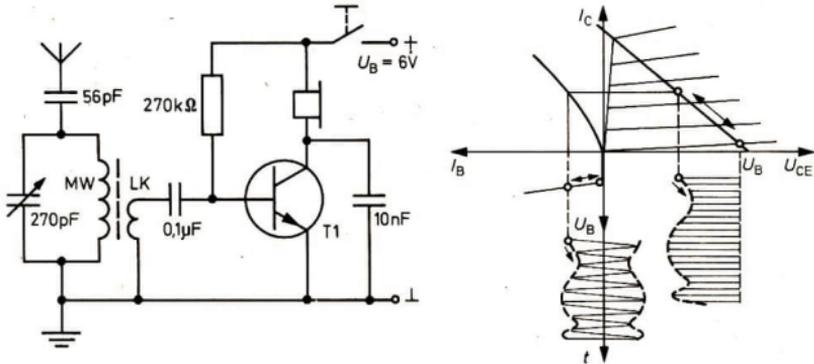


Bild 3.34 Schaltung eines Audionempfängers und Verschiebung des Arbeitspunktes

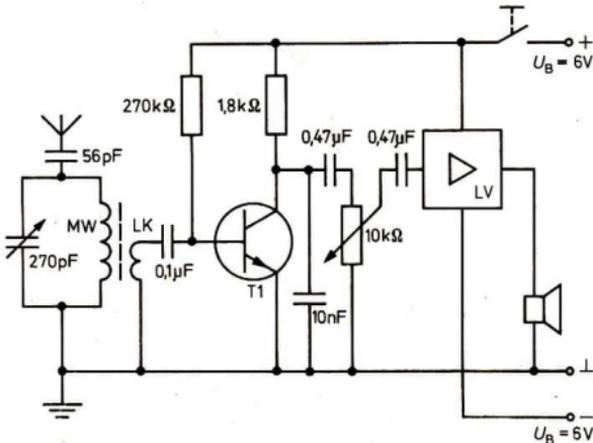


Bild 3.35 Experimentierschaltung zum Geradeausempfänger mit integriertem NF-Verstärker

Die Audionempfänger sind für den Amateur interessant, weil sie relativ leicht aufzubauen sind. In der Praxis spielen sie jedoch kaum mehr eine Rolle, weil sie den Anforderungen an Trennschärfe und Übertragungsqualität nicht genügen. Eine wesentliche Verbesserung wird mit dem Überlagerungsempfänger erreicht.

3.3.3. Überlagerungsempfänger

Ein wesentlicher Nachteil des Geradeausempfängers besteht darin, daß ein dem Schwingkreis nachgeschalteter Verstärker für einen großen Frequenzbereich ausgelegt sein muß. Das wird beim Überlagerungsempfänger vermieden, indem eine feste Zwischenfrequenz f_{ZF} gebildet wird, die für alle Empfangsfrequenzen gleich bleibt. Sie

wird durch Überlagerung der modulierten Trägerschwingung mit einer höherfrequenten Oszillatorschwingung mit Hilfe zweier mechanisch gekoppelter Drehkondensatoren gebildet und über ein Bandfilter einem Zwischenfrequenzverstärker zugeführt. Dieser braucht nur noch für eine feste Frequenz ausgelegt sein. Er bestimmt wesentlich die Empfindlichkeit des Verstärkers. Das Schema des Überlagerungsempfängers zeigt Bild 3.36.

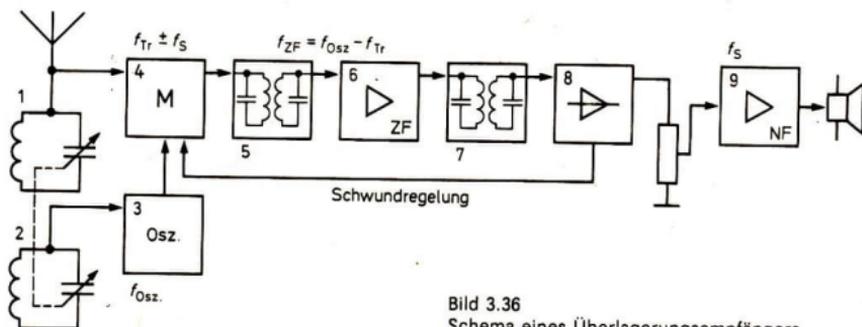


Bild 3.36
Schema eines Überlagerungsempfängers

Baugruppen im Bild 3.36 und ihre Funktion

- 1 Vorkreis: Empfangsschwingkreis mit Antennenanschluß
- 2 Oszillatorkreis: Schwingkreis für die Erzeugung unmodulierter Oszillatorschwingungen im Empfänger
- 3 Oszillator: Schaltung zur Erzeugung der Oszillatorschwingungen
- 4 Mischstufe: Hochfrequenzverstärker und Überlagerung von Trägerschwingung ($f_{Tr} \pm f_S$) und Oszillatorschwingung (f_{Osz})
- 5 Bandfilter (BF 1): Schwingkreissystem, abgestimmt auf die Zwischenfrequenz $f_{ZF} = f_{Osz} - f_{Tr}$
- 6 Zwischenfrequenzverstärker: Schmalbandverstärker für $f_{ZF} \pm f_S$
- 7 Bandfilter (BF 2): Aufbau wie 5, Bereitstellung der Spannung für die Demodulation
- 8 Demodulatorstufe: Diodendemodulation, Bereitstellung des niederfrequenten Signals, Rückführung auf die Mischstufe zu deren Verstärkungsregelung
- 9 Niederfrequenzverstärker mit Lautstärkeregelung und Lautsprecheranschluß.

Die beim Überlagerungsempfänger angewendete *Überlagerung* zweier Schwingungen unterscheidet sich prinzipiell von der *Modulation*, weil dabei zwei Schwingungen mit ihren jeweiligen Augenblickswerten entsprechend addiert werden.

3.4. Grundlagen der Fernsehtechnik

3.4.1. Prinzip der Fernsehübertragung

Die Grundlage des Fernsehens ist die Zerlegung und Wiederzusammensetzung eines Bildes. Die Trägheit des menschlichen Auges, einen Lichtreiz länger wahrzunehmen, als er tatsächlich vorhanden ist, ermöglicht die punktuelle Übertragung einer Bildinformation.

- Führen Sie in einem abgedunkelten Raum mit einer Taschenlampe schnell kreisförmige Bewegungen aus! Lassen Sie sich durch einen Beobachter erklären, welchen Bildeindruck er wahrgenommen hat!

Für die elektronische Bildübertragung ist die Erzeugung eines Lichtstrahles erforderlich, der so schnell über die Bildfläche geführt werden kann, daß dieser Vorgang vom Auge nicht mehr wahrgenommen wird. Gleichzeitig müssen die Hell-Dunkel-Werte der Bildinformation durch elektronische Steuerung der Lichtintensität des Lichtstrahles wirksam werden.

- ▼ Führen Sie dazu am Demonstrationsoszillografen die nachstehenden Operationen durch!
 - Stellen Sie die Zeitablenkfrequenz auf den Wert von 50 ms/cm ein und beobachten Sie das Schirmbild! Erhöhen Sie die Zeitablenkfrequenz und beobachten Sie die Auswirkung!
 - Legen Sie an den Eingang zur externen Steuerung der Helligkeit des Elektronenstrahls eine Spannung an (Bild 3.37)! Beobachten Sie das Schirmbild, wenn Sie den Taster rasch schließen und öffnen!

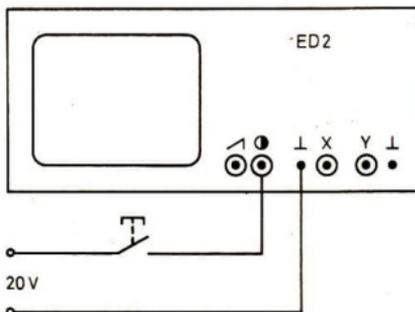


Bild 3.37
Experimentierschaltung zur Helligkeitssteuerung des Elektronenstrahls

Am Fernsehbild kann man beobachten, daß es aus Zeilen zusammengesetzt ist. Es sind nach der bei uns gültigen CCIR-Norm 625 Zeilen pro Bild und 25 vollständige Bilder je Sekunde. In der Aufnahmeröhre wird das Bild auf einem feinen Raster von Fotoelementen abgebildet und mit einem Katodenstrahl zeilenweise abgetastet. Dabei entstehen elektrische Spannungsschwankungen, die den abgetasteten Helligkeitsschwankungen entsprechen, also den Bildinhalt darstellen (Bild 3.38). Bei der Bildwiedergabe werden die Zeilen- und Bildwechselimpulse den Ablenkspulen der Empfängerröhre zugeführt. Hier wird der Katodenstrahl genau synchron zur Aufnahme über den Bildschirm geführt, der mit einer fluoreszierenden Schicht versehen ist. Der Bildinhalt ist an die Hell-Dunkel-Steuerung der Röhre gelegt, so daß ein der Natur entsprechendes Bild dargestellt werden kann.

Die Strahlablenkung erfolgt im Unterschied zum Katodenstrahloszillografen durch ein von Ablenkspulen erzeugtes Magnetfeld. Diese Ablenkspulen sind auf den Hals der Bildröhre aufgesetzt. Bei der Bildzusammensetzung im Empfänger wird das Zeilensprungver-

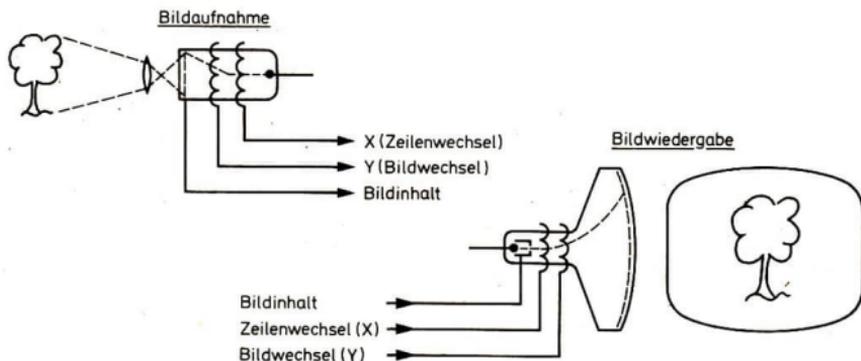


Bild 3.38 Prinzip der Aufnahme und Wiedergabe eines Fernsehbildes

fahren angewendet. Nach diesem Verfahren werden 50 Halbbilder pro Sekunde übertragen: Das erste Halbbild enthält die 1., 3., 5. Zeile usw., das zweite die 2., 4., 6. Zeile usw. Beide Halbbilder werden ineinandergefügt und ergeben erst das vollständige Bild. So entstehen 25 vollständige Bilder je Sekunde. Da das Auge nicht so schnell reagiert, erscheinen die aneinandergereihten und aufeinander abgestimmten Standbilder als bewegte Bilder. Mit dem Zeilensprungverfahren wird das Bildflimmern unterdrückt.

Das gesamte Schema der Fernsehübertragung zeigt Bild 3.39. Außer den Bild- und den Gleichlaufsignalen, die amplitudenmoduliert sind, muß noch das Tonsignal übertragen werden, das frequenzmoduliert ist. Der Abstand der Trägerfrequenz von Bild- und Tonkanal beträgt nach der in der DDR gültigen Norm 5,5 MHz. In einigen anderen Ländern beträgt dieser Abstand 6,5 MHz.

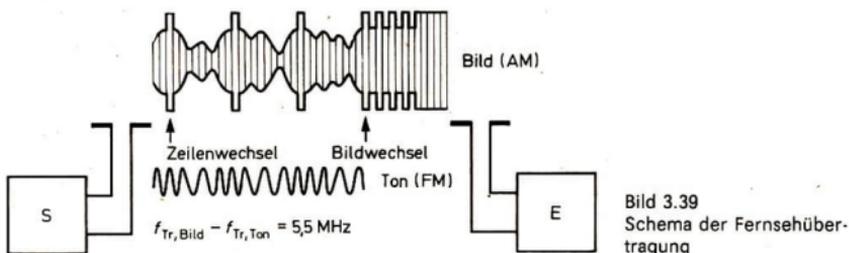


Bild 3.39 Schema der Fernsehübertragung

3.4.2. Grundaufbau eines Fernsehempfängers

Der Grundaufbau eines Fernsehempfängers ist in Bild 3.40 schematisch dargestellt. Die Funktionen der Blöcke werden nachstehend erläutert.

Der Fernsehempfänger ist ein Überlagerungsempfänger, der zunächst alle drei Signale

(Ton, Bild und Gleichlaufzeichen) verarbeitet und diese dann voneinander trennt. Der komplizierteste Verarbeitungsprozess spielt sich bei den Gleichlaufzeichen ab, die die Aufgabe haben, die vertikale und die horizontale Ablenkspannung zwischen Fernsehgerät und Kamera zu synchronisieren, das heißt, einen zeitgleichen Verlauf der Ablenkspannungen zu erreichen und dadurch ein genaues Ineinanderfügen der Halbbilder zu sichern. Die horizontale Ablenkspannung wird außerdem zur Gewinnung der Hochspannung für die Beschleunigung des Elektronenstrahls verwendet.

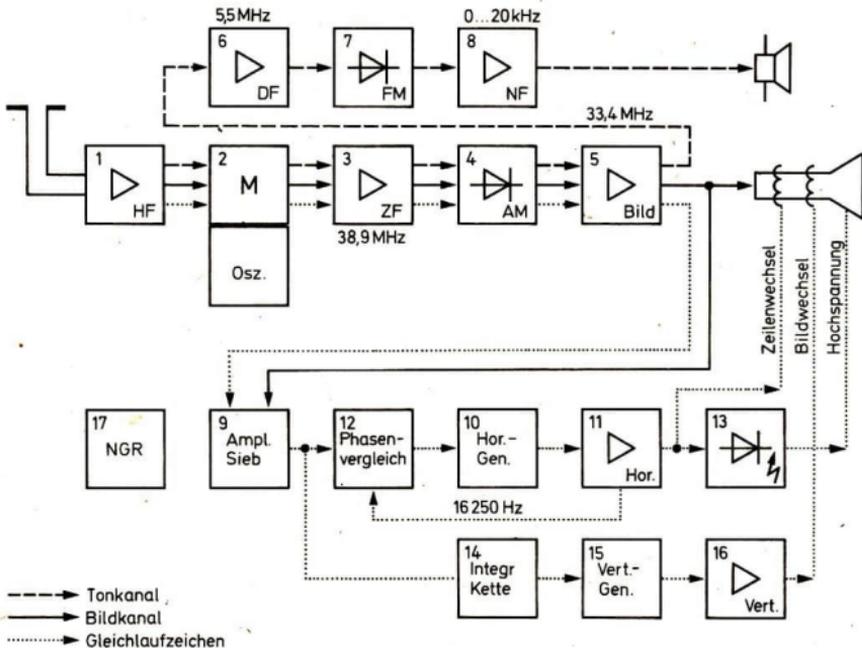


Bild 3.40 Grundaufbau eines Schwarz-Weiß-Fernsehempfängers

Baugruppen im Bild 3.40 und ihre Funktion

- 1 Hochfrequenzverstärker: Signalspannung der Antenne vergrößern
- 2 Misch- und Oszillatorstufe: Erzeugung einer Zwischenfrequenz (Bild: 38,9 MHz, Ton: 33,4 MHz)
- 3 Zwischenfrequenzverstärker
- 4 Videogleichrichter: Diodengleichrichtung für AM-Demodulation, Tonkanal passiert diese Stufe ungehindert
- 5 Videoverstärker (Bildendverstärker): Verstärkung der Bildsignale, Auskopplung des Tonträgers
- 6 Tonkanal-Zwischenfrequenzverstärker: Bildung der Zwischenfrequenz für die frequenzmodulierte Tonübertragung aus der Differenz von Bildträger- und Tonträgerfrequenz
 $(f_{Tr, Bild} - f_{Tr, Ton} = 5,5 \text{ MHz})$

- 7 Demodulationsstufe für FM
- 8 Niederfrequenzverstärker für das Tonsignal
- 9 Amplitudensieb: Abtrennung der Gleichlaufzeichen vom Bildinhalt (Verstärker, der erst ab einer bestimmten Spannung anspricht)
- 10 Horizontalgenerator (Sägezahngenerator, dessen Frequenz durch die Zeilenwechselimpulse gesteuert wird)
- 11 Horizontalverstärker: Erzeugung der für die Horizontalablenkspulen benötigten elektrischen Leistung
- 12 Phasenvergleichsstufe: Automatische Frequenzregelung des Horizontalgenerators durch Vergleich der Phasenlage der Zeilenwechselimpulse und der Horizontalablenkung (Zeilen werden genau untereinander gesetzt)
- 13 Hochspannungsquelle für die Anodenspannung der Bildröhre (etwa 15 kV), bestehend aus einem Hochspannungstransformator (Zeilentransformator), der durch die Horizontalablenkimpulse (15625 Hz) gespeist wird, und einem Hochspannungsgleichrichter mit Ladekondensator
- 14 Integrierkette: Einfügen der Halbbilder ineinander beim Zeilensprungverfahren (das jeweils 2. Halbbild hat zusätzliche Bildwechselimpulse)
- 15 Vertikalgenerator: Erzeugung der Ablekspannung für die Vertikalablenkung (Bildwechsel)
- 16 Vertikalverstärker: die im Vertikalgenerator erzeugte Bildablenkspannung wird auf die für die Vertikalablenkspulen benötigte Leistung gebracht
- 17 Netzgleichrichter: geregelte Gleichrichterstufe zur Bereitstellung der Versorgungsenergie für die Funktionsblöcke.

3.5. Optoelektronische Signalübertragung

Eine neue Entwicklungsrichtung in der Nachrichtentechnik stellt die Anwendung der Optoelektronik dar. Ihre Grundlagen bilden Lichtemissionselemente (Lampen, Lichtemitterdioden, Lasergeneratoren), Lichtübertragungselemente (Lichtleitkabel), Lichtverstärker (Laser) und Lichtempfängerelemente (Fotodioden, Fototransistoren).

Mit Licht als Signalträger lassen sich wesentlich mehr Informationen gleichzeitig und praktisch störungsfrei übertragen. Das Licht hat im sichtbaren und infraroten Bereich eine Frequenz von etwa 10^{14} Hz. Ansonsten werden als Träger elektromagnetische Wellen von 10^6 bis 10^8 Hz benutzt. Da jede Signalübertragung nur auf einem bestimmten Frequenzbereich des Trägers möglich ist (Telefonie etwa 5 kHz, Rundfunk mit Amplitudenmodulation etwa 10 kHz, mit Frequenzmodulation etwa 200 kHz), können bei hoher Trägerfrequenz mehr Sendekanäle auf einem Trägerfrequenzband untergebracht werden. Optoelektronische Übertragungsstrecken mit Lichtleitkabel über einige hundert Kilometer Entfernung gestatten heute die gleichzeitige Übertragung von mehreren zehntausend Telefongesprächen, von erheblich mehr Fernsehsendungen, Bildtelegrammen usw. als mit herkömmlichen Mitteln.

3.5.1. Prinzip der optoelektronischen Signalübertragung

Wie bereits dargestellt, wird beim Trägerfrequenzverfahren das Signal einer Träger-schwingung aufmoduliert und dann gesendet. In der Optoelektronik wird Licht als Signal-

träger eingesetzt. Licht ist auch eine elektromagnetische Welle mit einer elektrischen Schwingungskomponente, allerdings mit einer erheblich höheren Frequenz (etwa 10^{14} Hz) als bei den bisherigen Anwendungen.

Man benötigt für eine Übertragungsstrecke einen *Signalgeber*, eine Lichtquelle mit modulierbarer Lichtstärke als *Lichtsender*, ein *Lichtleitkabel* als Übertragungskanal, einen *Lichtempfänger*, einen Demodulator sowie einen *Signalaufnehmer* (Bild 3.41).

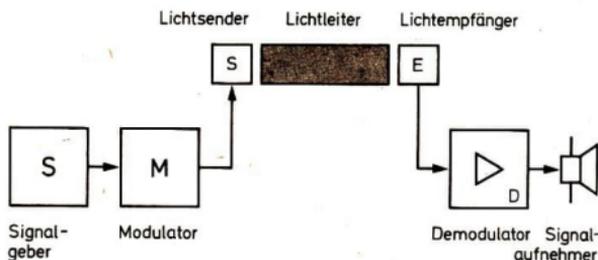


Bild 3.41
Prinzip einer optoelektronischen Signalübertragungsstrecke

- ▼ Bauen Sie zur Darstellung des Prinzips der optoelektronischen Signalübertragung eine Experimentierschaltung nach Bild 3.42 auf! In dem Experiment soll als Signalgeber ein Taster und als Signalaufnehmer ein Strommesser eingesetzt werden. Betätigen Sie den Taster und beobachten Sie das Ergebnis!

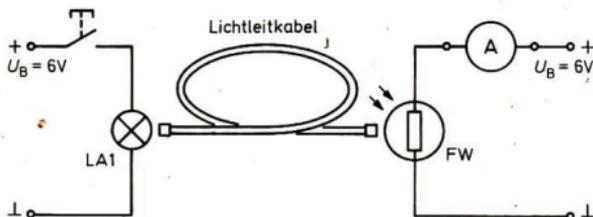


Bild 3.42
Experimentierschaltung zur optoelektronischen Signalübertragung

Der Zeiger am Meßgerät schlägt aus, sobald der Taster gedrückt ist. Das Lichtleitkabel überträgt den Lichtstrom (das Signal also) zum Fotowiderstand, der darauf reagiert.

Das Lichtleitkabel besteht aus vielen feinen Glasfasern, in denen die elektromagnetische Welle des Lichtes durch Totalreflexion fast ohne Streuung und Energieverlust weitergeleitet wird. Totalreflexion entsteht, wenn ein Lichtstrahl von einem optisch dichteren Medium (Glas) in ein optisch dünneres Medium (Luft) übergeht und dabei einen Grenzwinkel α_G überschreitet (Bild 3.43).

Die untersuchte Experimentieranordnung arbeitet recht träge, da der Zeiger nur langsam ausschlägt. Setzt man an die Stelle des Meßgerätes eine Lampe, so kann man schon schneller Impulse eingeben, aber die Glühwendel des Lichtsenders benötigt eine gewisse Zeit (etwa 10^{-2} s), um sich bis zur Glut zu erhitzen und um wieder abzukühlen. Setzt man an die Stelle des Tasters z. B. einen Tongenerator, so muß man einen anderen Lichtsender nehmen. Eine wesentlich schnellere Signalfolge läßt sich durch Einsatz einer Lichtemitterdiode (LED) übertragen.

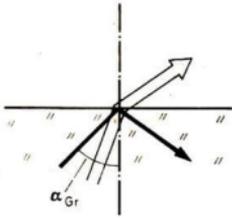


Bild 3.43
Totalreflexion von Licht in
Glas

3.5.2. Lichtemitterdiode als Sender

Betreibt man eine pn-Halbleiterdiode in Durchlaßrichtung, so bewegen sich Elektronen aus dem n-Gebiet und Defektelektronen aus dem p-Gebiet aufeinander zu und rekombinieren in der Übergangszone. Bei jedem Rekombinationsvorgang wird ein Energiebetrag frei, der der Bindungsenergie der Elektronen im Halbleiter entspricht. Diese Energiebeträge können unter bestimmten Bedingungen und bei bestimmten Halbleitermaterialien, z. B. Galliumarsenid (GaAs), als Lichtquanten ausgesendet werden. Der pn-Übergang leuchtet. Eine Lichtemitterdiode besitzt einen großflächigen pn-Übergang, der dicht unter der Oberfläche liegt (Bild 3.44).

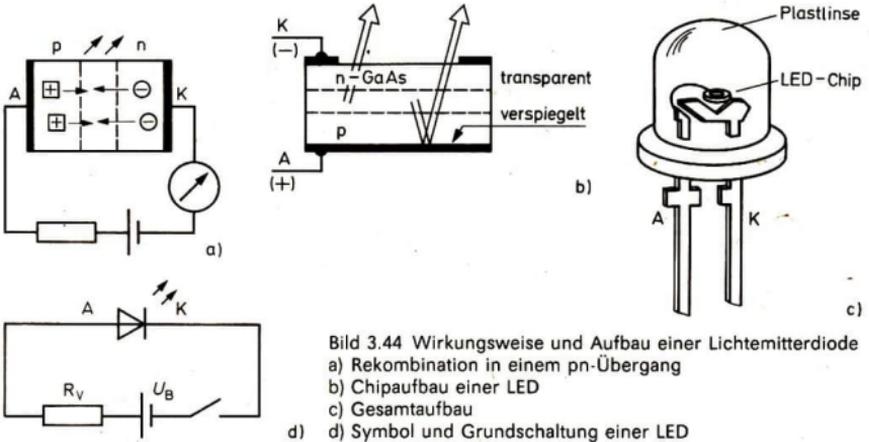


Bild 3.44 Wirkungsweise und Aufbau einer Lichtemitterdiode
a) Rekombination in einem pn-Übergang
b) Chipaufbau einer LED
c) Gesamtaufbau
d) Symbol und Grundschialtung einer LED

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Lichtemitterdiode interessiert nur im Durchlaßbereich. Weiterhin ist die höchstzulässige Durchlaßstromstärke I_f und die höchstzulässige Sperrspannung U_R des Diodentyps zu beachten. Die Durchlaßkennlinie besitzt einen ausgeprägten Knick, d. h., der Durchlaßstrom setzt erst von einer bestimmten Schwellwertspannung U_f ab ein.

▼ Bauen Sie zur Untersuchung von Lichtemitterdioden eine Experimentierschaltung nach

Bild 3.45a auf! Nehmen Sie die Durchlaßkennlinien der Lichtemitterdioden LED 1 (rot) und LED 2 (grün) auf! Beachten Sie dabei die höchstzulässige Durchlaßstromstärke! Ermitteln Sie den genauen Wert der Schwellwertspannung! Beobachten Sie die Leuchtstärke!

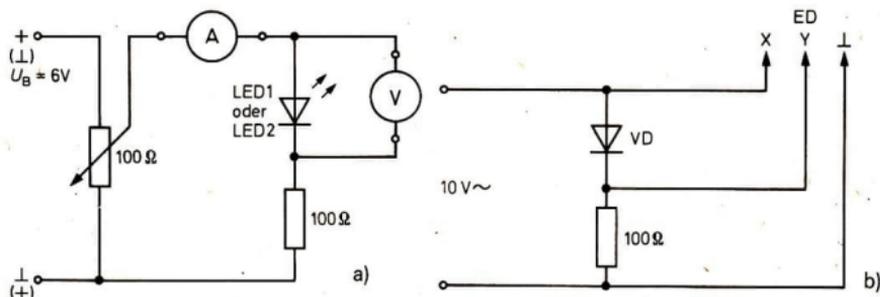


Bild 3.45 Experimentierschaltungen
a) zur Aufnahme der Kennlinie einer Lichtemitterdiode
b) zur oszillografischen Darstellung

Da die Lichtemitterdiode in Durchlaßrichtung betrieben wird, muß ihr stets ein Widerstand zur Strombegrenzung vorgeschaltet werden. Der Vorwiderstand R_v läßt sich einfach berechnen, wenn die Schwellwertspannung U_f bekannt ist. Betriebsspannung U_B und Diodenstromstärke I_f sind festzulegen.

$$R_v = \frac{U_B - U_f}{I_f}$$

■ Berechnungsbeispiel (LED 1)

Festlegungen: $U_B = 4,5 \text{ V}$; $I_f = 30 \text{ mA}$

$$R_v = \frac{4,5 \text{ V} - 1,8 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = 0,09 \text{ k}\Omega \text{ oder } 90 \Omega$$

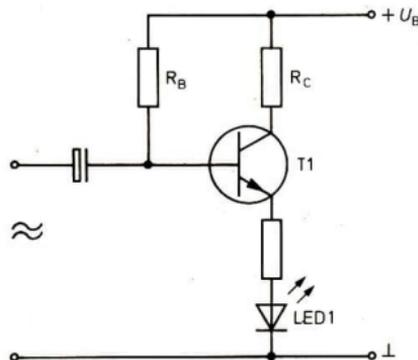


Bild 3.46
Helligkeitsmodulation mit Lichtemitterdiode

Die Leuchtstärke einer LED hängt von der Durchlaßstromstärke ab. Sie reagiert praktisch trägeheitslos und ist daher für eine Modulation bis zu hohen Frequenzen als Lichtsender gut geeignet. Für die Modulation wird ein Transistor eingesetzt (Bild 3.46). Auch in diesem Fall ist der Strom durch die Leuchtdiode zu begrenzen, der ja gleichzeitig der Kollektorstrom I_C des Transistors ist. Dieser wird durch den Kollektorwiderstand R_C und den Basiswiderstand R_B begrenzt.

Als Grundlage für die Berechnung von R_C und R_B gelten folgende Näherungsformeln:

$$R_C = \frac{U_B - U_f}{I_C} ; \quad R_B = B \cdot R_C$$

$B = \frac{I_C}{I_B}$ ist die Großsignal-Stromverstärkung des Transistors.

3.5.3. Fotowiderstand, Fotodiode und Fototransistor als Signalempfänger

- Als Lichtempfänger wurde in dem Experiment nach Bild 3.42 ein Fotowiderstand eingesetzt. Sein elektrischer Widerstand verändert sich mit der Beleuchtungsstärke. Man unterscheidet den Dunkelwiderstand R_D und den Hellwiderstand R_H bei einer genormten Beleuchtungsstärke.
 - Ermitteln Sie den Dunkelwiderstand eines Fotowiderstandes und seine Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke, indem Sie eine Lampe in unterschiedlichem Abstand (x) vor dem Fotowiderstand aufstellen (Bild 3.47)!
- Beachten Sie die höchstzulässige elektrische Leistung für den Fotowiderstand (Richtwert: $P = U \cdot I = 100 \text{ mW}$)!

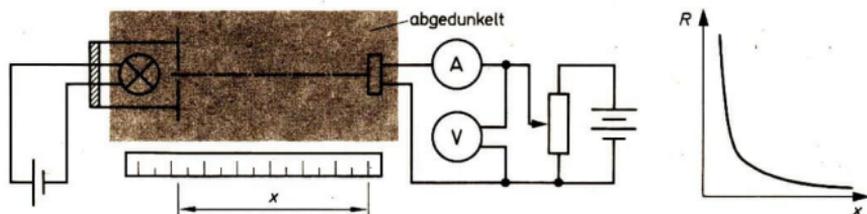


Bild 3.47 Experimentieranordnung und Widerstandsdiagramm für einen Fotowiderstand

Fotowiderstände reagieren verhältnismäßig träge auf Änderungen der Beleuchtungsstärke, dafür haben sie eine große Lichtempfindlichkeit. Nicht so empfindlich, aber dafür reaktionsschneller sind *Fotodioden* und *Fototransistoren* (Bild 3.48).

Die Fotodiode wird in Sperrrichtung betrieben. Der pn-Übergang ist dabei frei von beweglichen Ladungsträgern. Fällt nun Licht auf diesen Übergang, so werden in ihm Ladungsträger freigesetzt, die dann zu den Elektroden strömen. Beim Fototransistor befindet sich diese lichtempfindliche Sperrschicht zwischen Basis und Kollektor. Der Lichteinfall verursacht den Basisstrom, mit dem im Fototransistor ein (verstärkter) Kollektorstrom gesteuert wird.

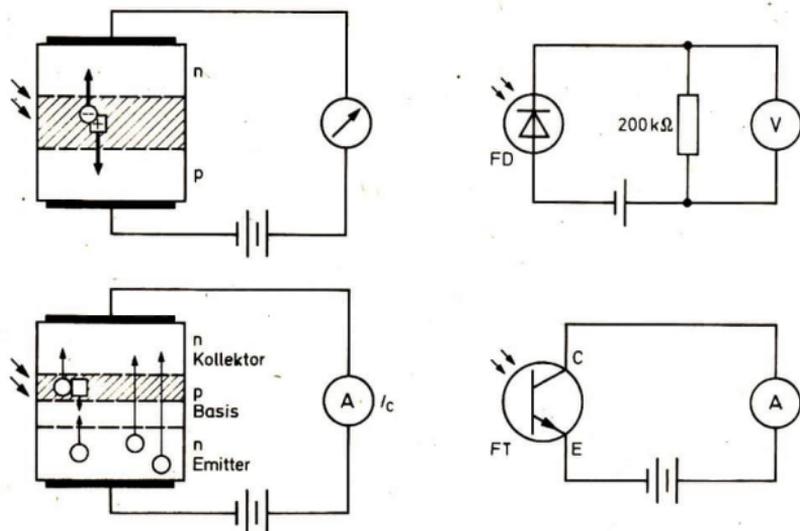


Bild 3.48 Stromentstehung in einer Fotodiode und einem Fototransistor

- ▼ Bauen Sie einen optoelektronischen Empfänger nach Bild 3.49! Überzeugen Sie sich von der Funktionstüchtigkeit beim Anlegen eines NF-Signals an die Modulatorstufe! Verändern Sie die Entfernung und die Lage der optoelektronischen Bauelemente zueinander!

Die in Bild 3.49 dargestellte Schaltung ist ein Lichtempfänger mit einem Lautsprecher als akustischem Signalaufnehmer. Die Demodulation erfolgt automatisch durch den Fototransistor, weil dieser den schnellen Änderungen der hohen Lichtfrequenz nicht folgen kann, sondern nur den wesentlich langsameren Schwankungen der Amplitude, die ja das

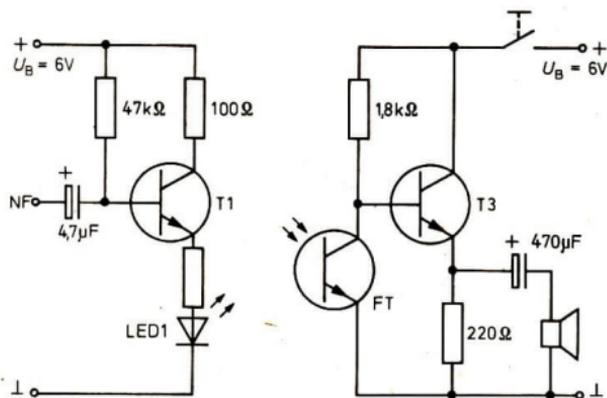


Bild 3.49
Experimentierschaltung
zum optoelektronischen
Empfänger

Signal darstellen. Der Transistor T3 dient zur Anpassung an den Lautsprecherwiderstand.

Ein Bauelement zur rückwirkungs-freien Signalübertragung ist der *Optokoppler*. Hier sind Lichtemitterdiode und Fotodiode bzw. Fototransistor in einem Bauelement vereinigt (Bild 3.50).

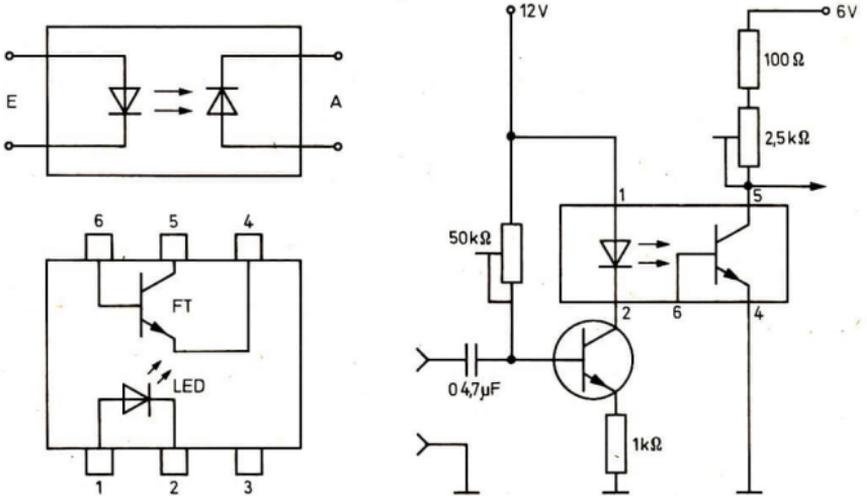


Bild 3.50 Aufbau eines Optokopplers und seine Anwendung in einer Verstärkerschaltung

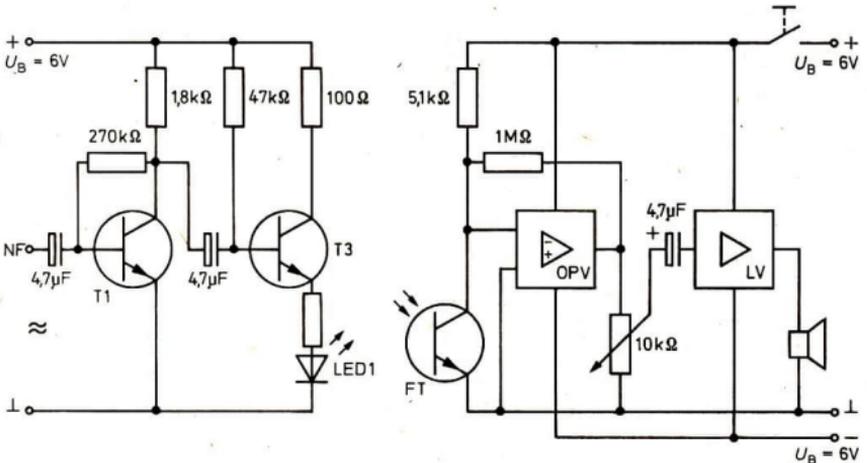


Bild 3.51 Experimentierschaltung zur optoelektronischen Sprach- und Musikübertragung

- Entwerfen Sie eine Schaltung zur optoelektronischen Übertragung von akustischen Signalen! Vergleichen Sie Ihren Entwurf mit Bild 3.51! Benutzen Sie zur optischen Kopplung sowohl das Lichtleitkabel, als auch eine mit Hilfe von Elementen des SEG Optik aufgebaute Strahlbündelung und -übertragung! Als Signalquelle kann ein Recorder oder ein Plattenspieler genutzt werden.

3.5.4. Überblick über optoelektronische Bauelemente

Optoelektronische Bauelemente werden nach ihrer Funktion in drei Klassen eingeteilt:

- *Lichtemitterelemente* (Lichtemitterdiode, Laserdiode, Zifferntableau; siehe Abschnitt 4.)
- *Lichtabsorptionselemente* (Fotowiderstand, Fotodiode, Fototransistor)
- *Lichtübertragungselemente* (Lichtleitkabel, Flüssigkristallanzeige).

Laserdioden werden in der Nachrichtentechnik und Vermessungstechnik als Erzeuger von Richtstrahlen eingesetzt. Sie arbeiten wie Lichtemitterdioden, sind jedoch anders konstruiert und mit halbverspiegelten Oberflächen versehen. Sie senden einen scharf gebündelten Lichtstrahl mit einer genau definierten Wellenlänge aus.

Die Flüssigkristallanzeige (LCD, englisch: liquid crystal display) ist von Taschenrechnern und Uhren her bekannt. Sie beruht darauf, daß eine bestimmte Flüssigkeit mit stäbchenförmigen Molekülen im spannungslosen Zustand klar ist und bei Anlegen einer elektrischen Spannung getrübt wird. Die Segmente der LCD-Anzeige sind winzige Küvetten von 20 bis 50 μm Tiefe, in die beiderseits Elektroden hineinreichen.

4. Elektronik in der Digitaltechnik

4.1. Einführung

4.1.1. Elektronische Informationsverarbeitung

Die elektronische Gewinnung, Übertragung, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung von Informationen gehört zu den wichtigsten Anwendungen der Mikroelektronik. Die immer komplizierter werdenden gesellschaftlichen, ökonomischen und technischen Prozesse und Zusammenhänge erfordern zu ihrer effektiven Beherrschung diese moderne elektronische Technik. Die Mikroelektronik ist ein wesentlicher Produktivitätsfaktor und wird daher als eine Schlüsseltechnologie bezeichnet. Informationsverarbeitung und Informationsverarbeitungstechnik müssen so gestaltet und eingesetzt werden, daß sie wesentlich

- zur weiteren Beschleunigung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts
- zur Steigerung der Arbeitsproduktivität und zur Erhöhung der Effektivität der Produktion
- zur besseren Nutzung von Material und Energie
- zur umfassenden sozialistischen Rationalisierung
- zur Leistungssteigerung der Volkswirtschaft durch intensiv erweiterte Reproduktion

beitragen.

Der schrittweise Übergang zu einer stärkeren Einbeziehung der elektronischen Informationsverarbeitung in alle gesellschaftlichen Bereiche ist in der DDR und in anderen sozialistischen Staaten ein charakteristisches Merkmal der weiteren Entwicklung bis zum Jahr 2000. Er ist eine wesentliche Voraussetzung für die erforderliche Leistungssteigerung, die sich aus der Erfüllung der Hauptaufgabe und der Einheit von Wirtschafts- und Sozialpolitik ergibt.

4.1.2. Informationsverarbeitung mit dem Computer

Seit Beginn der achtziger Jahre vollzieht sich auf dem Gebiet der Informationsverarbeitung eine wesentliche Weiterentwicklung. Bedingt durch die gesellschaftlichen Erfordernisse werden Geräte der modernen Rechentechnik immer mehr unmittelbar am Arbeitsplatz wirksam.

Mit Mikrorechnern als Büro- oder Personal-Computer erfolgt die Datenverarbeitung in vielen neuen Einsatzgebieten. Eine große Anzahl solcher Computer, die planmäßig weiter anwächst, ist bereits in der sozialistischen Volkswirtschaft im Einsatz. Die effektive Anwendung solcher hochleistungsfähigen Schlüsseltechnologien wie die Mikroelektronik setzt also voraus, daß in großer Breite die Werktätigen zum Umgang mit dieser moder-



Bild 4.1
Personalcomputer PC 1715

nen Technik qualifiziert werden. Grundkenntnisse der Informatik und der Rechentechnik werden daher immer mehr zum Bestandteil der Allgemeinbildung.

Als Büro- und Personalcomputer (Bild 4.1) werden allgemein elektronische Hilfsmittel zur Informationsverarbeitung bezeichnet, die unmittelbar am Arbeitsplatz in den Arbeitsprozeß einbezogen sind. Mit ihnen können unterschiedliche Aufgaben der Datenverarbeitung im Dialogbetrieb gelöst werden. Die Geräte lassen sich als selbständige Einheit betreiben, können aber auch mit anderen informationsverarbeitenden Systemen gekoppelt werden.

Die hohe Anpassungsfähigkeit an die unterschiedlichsten Aufgaben in der Produktionsvorbereitung, der Produktion, Planung usw. wird durch die Möglichkeit der Programmierung dieser Geräte durch den Nutzer erreicht.

Der Computer bildet aus eingegebenen Informationen nach bestimmten Regeln neue Informationen, die als Ergebnis ausgegeben werden. Dabei werden die Informationen, die als Ein- und Ausgangswerte auftreten, als *Daten* bezeichnet. Die Informationen, die die Regeln beinhalten, nach welchen die Daten miteinander verknüpft werden sollen, bezeichnet man als *Befehle*. Alle zusammengehörigen Befehle bilden ein *Programm*.

Der Mikrorechner oder Computer ist eine gerätetechnische Einheit mit folgenden typischen Bestandteilen:

- Mikroprozessor (hochintegrierter Schaltkreis) als zentrale Verarbeitungseinheit
- Halbleiterspeicher zur Datenspeicherung (RAM) und Programmspeicherung (ROM)
- Ein- und Ausgabeeinheiten für digitale Signale
- Taktgenerator zur Synchronisation der Arbeitsabläufe
- Energieversorgung und Gefäßsystem.

Diese als *Hardware* bezeichnete Grundgerätetechnik wird durch die zur Bedienung und Kommunikation notwendige *Peripherie* ergänzt. Dazu zählen Ein- und Ausgabegeräte, wie Tastatur, Bildschirm, Drucker, externe Speicher und Datenfernübertragungsanlüsse.

Die Informationen, die das Zusammenwirken der Einzelteile der Hardware steuern (Betriebssystem) und die Programme zur Verknüpfung der Ein- und Ausgabedaten des spe-

ziellen Anwendungsfalls bilden die sogenannte *Software*. Sie werden auf Magnetfolienspeichern (Disketten) oder Magnetbändern in Form von Impulsfolgen gespeichert. Der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Modulen des Rechners und der Peripherie erfolgt über integrierte Leitungsbündel (interner BUS). Das Zusammenwirken von Hardware und Software bezeichnet man als Mikrorechnersystem (Bild 4.2). Nach der grundlegenden Einführung in die Digitaltechnik im Abschnitt 1.4. sollen die digitale Informationsverarbeitung und einige grundlegende Schaltungen und Verarbeitungsmethoden näher dargestellt werden, die zum Aufbau und zur Arbeitsweise von Computern gehören.

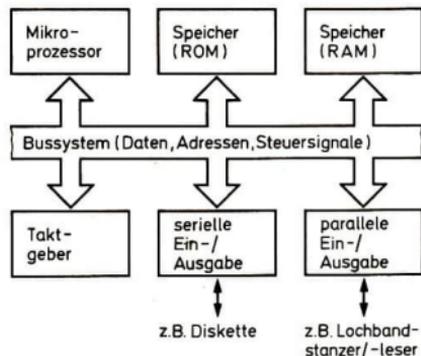


Bild 4.2
Mikrorechnersystem (Prinzipdarstellung)

4.2. Kodierung, Dekodierung und Datenanzeige

4.2.1. Binäres System

Grundlage für die Informationsverarbeitungsvorgänge in einem Computer ist die Zweiwertlogik oder binäre Logik. Diese besagt, daß nur mit 2 Zuständen gearbeitet wird, nämlich „logisch 0“ und „logisch 1“. Diese Zustände kann man technisch entweder mit Schaltern (0 – Schalter offen, 1 – Schalter geschlossen) oder mit Gattern realisieren (siehe Abschnitt 1.4.). Systeme, die mit diskreten Logikzuständen arbeiten, nennt man *digitale Systeme*, das Prinzip der Verarbeitung heißt digitale Informationsverarbeitung. Arbeitet das System mit einer Zweiwertlogik, so ist es ein *binäres System*. Die Computer sind im allgemeinen mit binären Funktionselementen aufgebaut.

Die beiden Zustände, die ein binäres Signal einnehmen kann, werden mit

Nullsignal L (low) entsprechend logisch 0 und

Einssignal H (high) entsprechend logisch 1

bezeichnet. Der Begriff für beides ist die Bezeichnung Bit (aus englisch: binary digit). Ein Bit kann zwei Signalzustände darstellen.

Das Arbeiten mit der Zweiwertlogik erfordert einiges Umdenken. Man ist gewohnt, Zahlenwerte im Dezimalsystem darzustellen, indem wir Ziffern 0 bis 9 aneinanderreihen, die als Faktor von Zehnerpotenzen in abfallender Folge gelten, wie z. B.:

$$139 = 1 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 9 \cdot 10^0$$

$$40,25 = 4 \cdot 10^1 + 0 \cdot 10^0 + 2 \cdot 10^{-1} + 5 \cdot 10^{-2}$$

Der Zweiwertlogik ist das Dualsystem angepaßt, in dem nur die Ziffern 0 und 1 vorkommen. Es hat die Potenzen mit der Basis 2 zur Grundlage.

$$2^0 = 1; 2^1 = 2; 2^2 = 4 \text{ usw.}$$

- Vervollständigen Sie die Reihe der Potenzen von 2 bis 2^{10} und prägen Sie sich die Zahlenwerte ein!
Im Dualsystem ist z. B.

$$110101 = 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Wie lautet diese Zahl im Dezimalsystem?

Stellen Sie die Dezimalzahlen 21; 234; 518 und 1215 als Dualzahlen dar, entwickeln Sie eine effektive Methode zum Umrechnen!

Die einzelne Stelle einer binären Zahlenfolge kann immer nur mit 1 oder 0 (bzw. H oder L) belegt sein (1 Bit). 8 Bit können $2^8 = 256$ verschiedene Zustände beinhalten. Die Dateneinheit von 8 Bit wird als Byte bezeichnet. Die Speicherkapazität eines Computers wird in kByte angegeben (1 kByte = 2^{10} Bytes = 1024 Bytes). **Im folgenden werden alle logischen Zustände durch die Angabe der Pegel „L“ bzw. „H“ dargestellt.**

4.2.2. Kodierung

Die Darstellung von Buchstaben oder Ziffern in einer Folge von binären Signalen bezeichnet man als Kodierung. Wird eine dezimale Ziffer binär dargestellt, wendet man den BCD-Kode (binär codierter Dezimal-Kode) an.

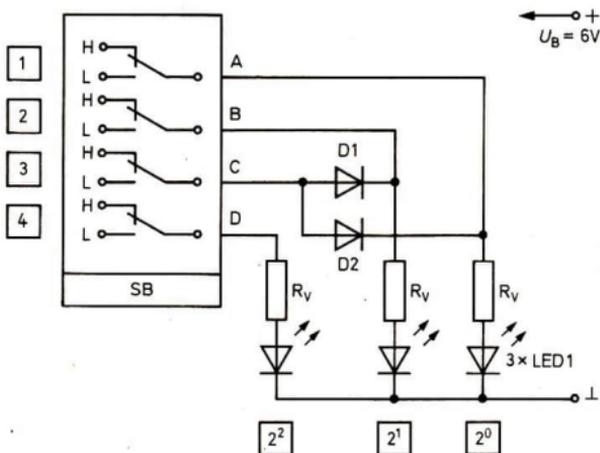


Bild 4.3
Experimentierschaltung zur
Kodierung

- ▼ Bauen Sie zur praktischen Durchführung einer Kodierung die Experimentierschaltung nach Bild 4.3 auf! Die Schalter des Setzbausteines sind den Dezimalziffern, die Lichtemitterdioden den Binärstellen zugeordnet. Betätigen Sie die Schalter einzeln und beobachten Sie die Lichtemitterdioden! Erklären Sie die Wirkungsweise der Schaltung und die Aufgabe der Dioden D1 und D2!

Das im Experiment untersuchte Prinzip liegt dem im Bild 4.4 dargestellten einfachen Dezimal-Dual-Kodierer für die Ziffern 0 bis 9 zugrunde.

Man ordnet parallelen Leitungen die Ziffern 0 bis 9 zu und legt rechtwinklig darüber (isoliert) 4 Leitungen A bis D, die die Dualzustände mit Hilfe von Lichtemitterdioden (LED) anzeigen. Die entsprechenden Erzeugungspunkte werden dann durch Dioden verbunden. So sind z. B. bei 7 = LHHH die Leitungen A, B und C anzuschließen.

Die Leitungen A bis D bezeichnet man auch als *Bitleitungen*. Sie zeigen nämlich nur die

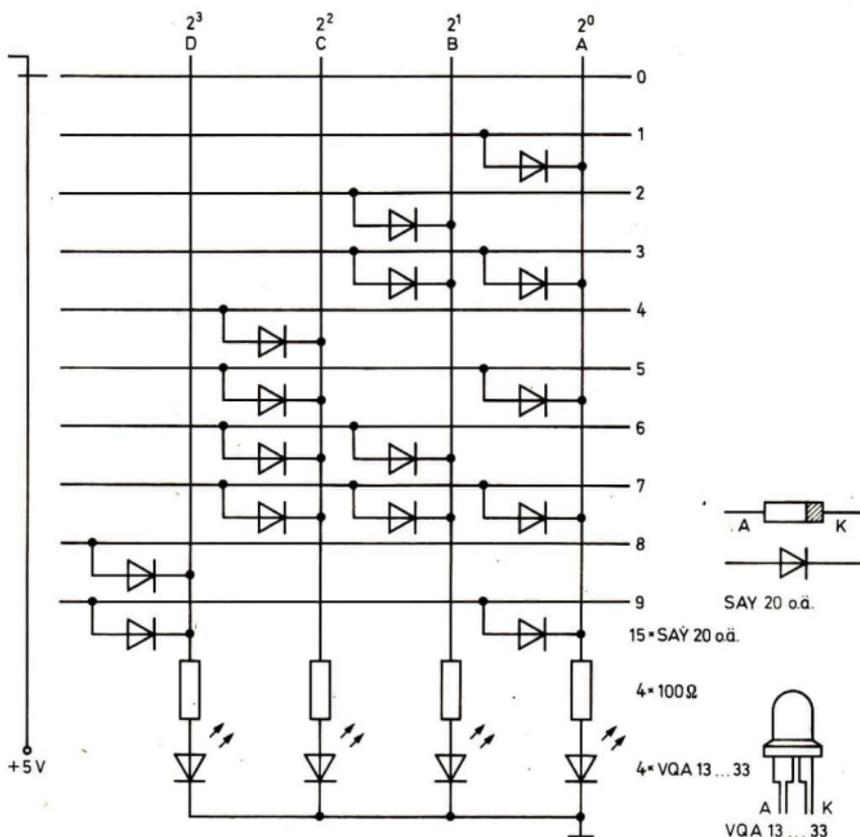


Bild 4.4 Einfacher Dezimal-Dual-Kodierer mit Diodenmatrix (BCD-Kodierer)

Zustände „Strom fließt“ oder „Strom fließt nicht“ an. Das entspricht einem Informationsinhalt von 1 bit. Der angezeigte 4stellige Binärwert ist eine *Tetrade*.

Die 4 Bitleitungen lassen aber noch mehr Zustände zu, nämlich insgesamt 16 (0 bis 15). In der Mikrorechentechnik werden die über 9 hinausgehenden Tetraden (nämlich 10 bis 15) *Pseudotetraden* genannt und mit Buchstaben des Alphabets bezeichnet (HLHL – A, HLHH – B, HLLL – C, HLLH – D, HHHL – E und HHHH – F).

- Erweitern Sie die Schaltung nach Bild 4.4 so, daß auch die Pseudotetraden mit angezeigt werden!

4.2.3. Dekodierung

Die in einem Computer verarbeiteten binären Signale müssen im allgemeinen zur Ausgabe von Ziffern oder Zeichen wieder in die Form der Eingabe zurückverwandelt (dekodiert) werden.

- ▼ Bauen Sie zur Dekodierung eine Experimentierschaltung nach Bild 4.5 auf! Die Schalter am Eingang sind den Binärstellen, die Lichtemitterdioden den Dezimalziffern zugeordnet. Stellen Sie verschiedene Kombinationen für Binärzahlen ein und beobachten Sie die Anzeige! Ermitteln Sie die Wirkungsweise der Schaltung und die Funktion der einzelnen Gatter!

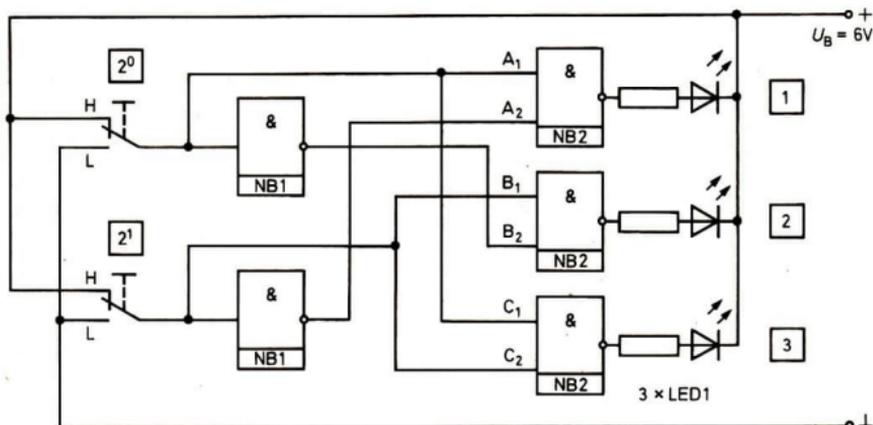


Bild 4.5 Experimentierschaltung zur Dekodierung

Der Aufbau eines Dekoders ist mit einem erheblichen Schaltungsaufwand an Gattern verbunden. Für die Dekodierung werden deshalb integrierte Schaltkreise eingesetzt, die die gesamte Verknüpfungslogik vom binären Eingang bis zum dezimalen Ausgang enthalten.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung eines integrierten Dekoders eine Experimentierschaltung

nach Bild 4.6 auf! Die Schalter des Setzbausteines dienen zur Eingabe der Binärzahlen am Dekoderbaustein (A, B, C, D). An den Ausgängen a bis g des Dekoderbausteines sind Lichtemitterdioden zur Zustandsanzeige angeschlossen. Geben Sie nacheinander die Binärziffern 2^0 und 2^3 ein und notieren Sie, welche Ausgänge a bis g jeweils aktiv sind! Bilden Sie alle mit den Binärstellen 2^0 bis 2^3 möglichen Kombinationen!

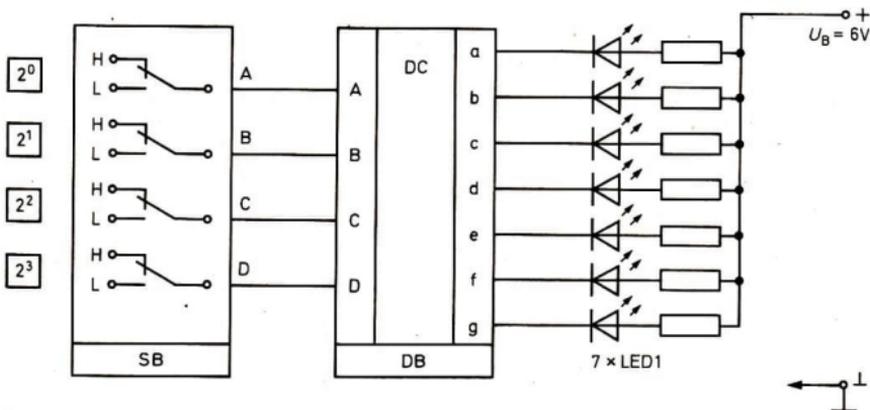


Bild 4.6 Experimentierschaltung zum Dekoderschaltkreis

4.2.4. Datenanzeige

Bereits in der Schaltung nach Bild 4.4 erfolgt die Anzeige der Bitzustände mit Lichtemitterdioden. Das ist aber noch recht unanschaulich. Will man Dezimalziffern (und Buchstaben der Pseudotetraden) anzeigen, so benötigt man ein *Ziffernanzeigetableau*.

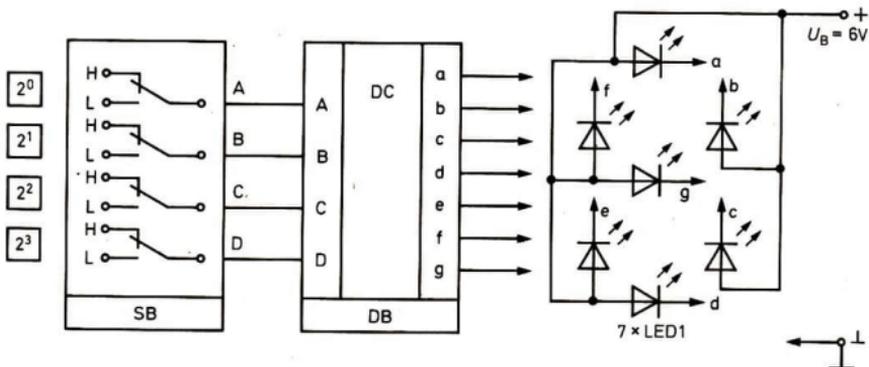


Bild 4.7 Experimentierschaltung zum Dekoder mit Ziffernanzeigetableau (bei den Lichtemitterdioden wird die Verwendung von Vorwiderständen vorausgesetzt)

- ▼ Ordnen Sie zur Zifferndarstellung die Lichtemitterdioden nach Bild 4.7 an und wiederholen Sie das vorangegangene Experiment! Begründen Sie die Vorteile dieser Schaltung gegenüber Bild 4.5!

Für die praktische Anwendung in der Informationsverarbeitung werden die zur Anzeige dezimaler Ziffern notwendigen Lichtemitterdioden in einem Bauelement vereinigt (7-Segment-Anzeige).

- ▼ Bauen Sie eine Experimentierschaltung mit 7-Segment-Anzeige nach Bild 4.8a auf! Betätigen Sie die Schalter des Setzbausteines und beobachten Sie die Anzeige am Ziffernanzeigebaustein! Verbinden Sie den Ziffernanzeigebaustein nach Bild 4.8b mit dem Dekoderbaustein und erläutern Sie die Wirkungsweise dieser Schaltung!

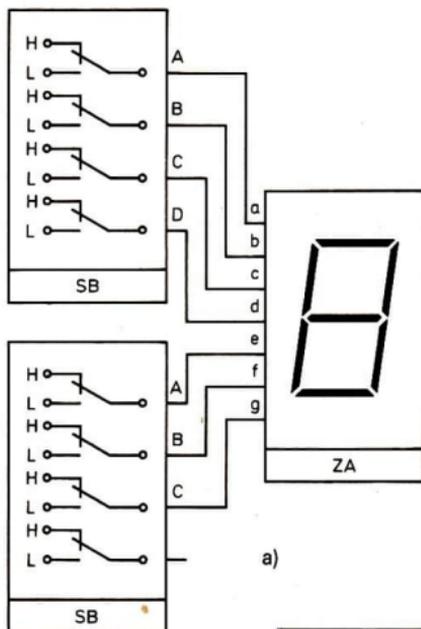
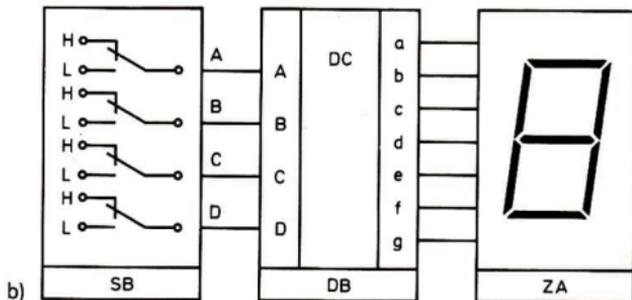
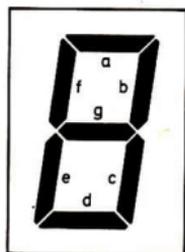


Bild 4.8
Experimentierschaltungen zur 7-Segment-Anzeige





		012	---	PAUSE
a	X	X		X
b	X	X	X	X
c	X	X		
d	X	X		
e	X	X		X
f	X			X
g		X		X

Bild 4.9
7-Segment-Anzeige

Mit der 7-Segment-Anzeige können durch entsprechende Ansteuerung der Eingänge a bis g Ziffern, Zeichen oder auch Buchstaben dargestellt werden (Bild 4.9).

Die 7-Segment-Anzeige läßt sich auch als Flüssigkristallanzeige verwirklichen, wie sie insbesondere bei Taschenrechnern und Digitaluhren angewendet wird.

Eine weitere Möglichkeit der Datenausgabe ist die Darstellung von Ziffern, Zeichen und Buchstaben auf einem Bildschirm. Die Zeichen werden durch einen Zeichengenerator erzeugt. Für jedes Zeichen ist auf dem Bildschirm ein Feld von z. B. 10×5 Punkten vorgesehen, die in einem Speicher vorgespeichert sind. Über eine entsprechende Adresse wird das jeweils gewünschte Zeichen angewählt. Bei 6 Adreßeingängen (A0 bis A5) gibt es $2^6 = 64$ Möglichkeiten. Das sind alle Buchstaben des Alphabets, alle Ziffern und weitere Sonderzeichen. Den Grundaufbau eines Zeichengenerators zeigt Bild 4.10.

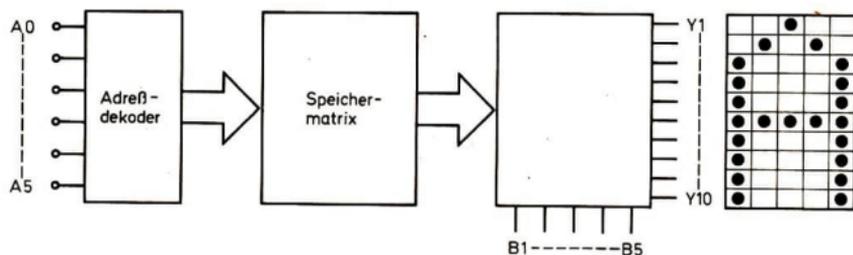


Bild 4.10 Generierung von Zeichen für die Bildschirmdarstellung

4.3. Logische Verknüpfungsschaltungen

Die Funktionsteile eines Mikrorechners sind aus einer Vielzahl von Grundgattern (NEGATION, UND, ODER) zusammengesetzt. Diese Gatter sind auf den Chips der einzelnen Schaltkreise auf kleinstem Raum so kombiniert, daß sie die vorbestimmten Funktionen erfüllen. Ohne auf den Gesamtaufbau eines Mikroprozessor- oder eines Speicherschaltkreises einzugehen, werden im folgenden einige Grundelemente von Rechnerschaltungen behandelt.

4.3.1. Gatterfunktionen

Die prinzipielle Funktion und das Betriebsverhalten eines TTL-NAND-Gatters wurden im Abschnitt 1.4. ausführlich untersucht. Dabei ergab sich, daß für eine bestimmte Größe der Eingangssignale ($U_e > 1,4 \text{ V}$) eine Umschaltswelle überschritten wird. Eingangsspannungswerte von 0 ... 0,7 V werden vom Gatter als „L“ und von 2,1 ... 5 V als „H“ erkannt und verarbeitet.

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung eines Gatters eine Experimentierschaltung nach Bild 4.11 auf! Stellen Sie den Schleifer des Einstellwiderstandes zunächst so ein, daß er am Masseanschluß anliegt!

Verändern Sie nach dem Anlegen der Betriebsspannung langsam die Stellung des Schleifers und beobachten Sie die Meßgeräte! Stellen Sie den Zusammenhang $U_y = f(U_x)$ (Übergangskennlinie) grafisch dar und vergleichen Sie das Ergebnis mit der Darstellung in Bild 4.12!

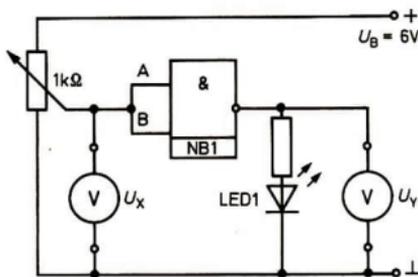


Bild 4.11
Experimentierschaltung zur Aufnahme der Übergangskennlinie

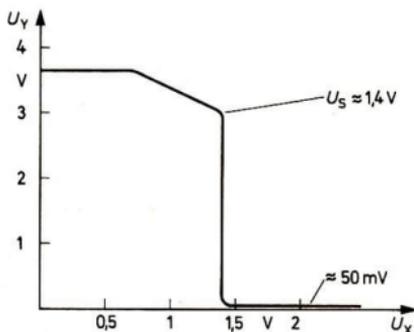


Bild 4.12
Übergangskennlinie eines TTL-Gatters

Die *Übergangskennlinie* verdeutlicht den Sprung von „H“ auf „L“. Der Verlauf der Übergangskennlinie zeigt einen kritischen Bereich, in welchem das Gatter zur Instabilität neigt, wenn dieser zu langsam durchlaufen wird. Zur sicheren Umschaltung der TTL-Gatter werden deshalb möglichst steile Eingangsimpulse ($t \leq 1 \mu\text{s}$) benötigt.

- Ermitteln Sie den Verlauf der Übergangskennlinie bei Belastung am Gatterausgang mit $R_L = 1 \text{ k}\Omega, 330 \Omega, 220 \Omega, 100 \Omega$!

Durch das Zusammenschalten mehrerer NAND-Gatter lassen sich unterschiedliche logische Funktionen realisieren (Bild 4.13).

Bei der Zusammenschaltung von Gattern ist zu beachten, daß die Zahl der Eingänge, die an einen Ausgang angeschlossen werden können, begrenzt ist. Eine wichtige Angabe ist daher der *Ausgangslastfaktor*. An einem Ausgang mit dem Ausgangslastfaktor $N_L = 10$ können z. B. zehn Eingänge mit dem Eingangslastfaktor $N_L = 1$ angeschlossen werden. Der Ausgangslastfaktor gibt eine obere Grenze der Belastbarkeit des Gatters an.

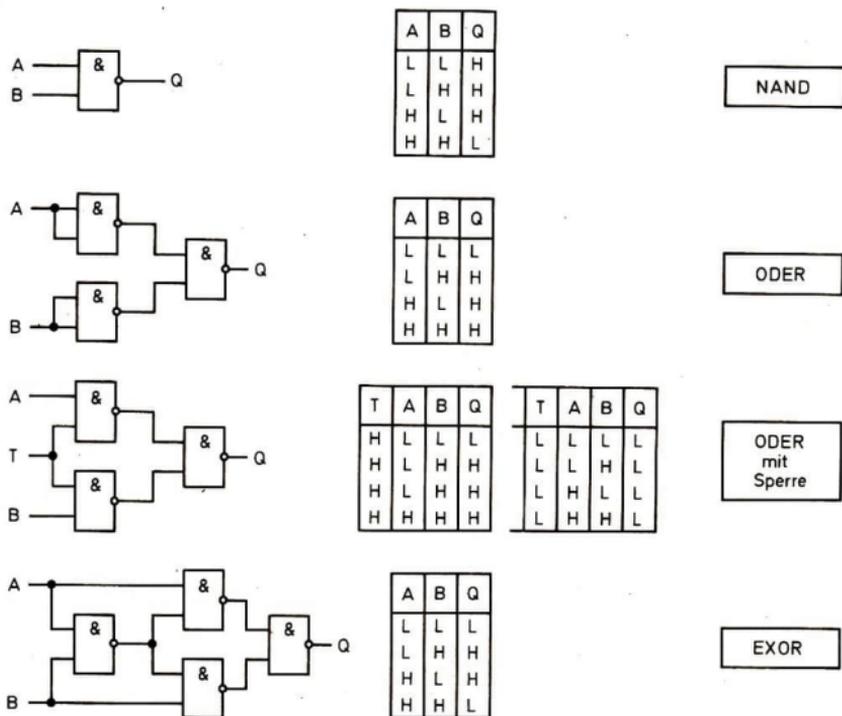


Bild 4.13 Logische Verknüpfungen mit NAND-Gattern

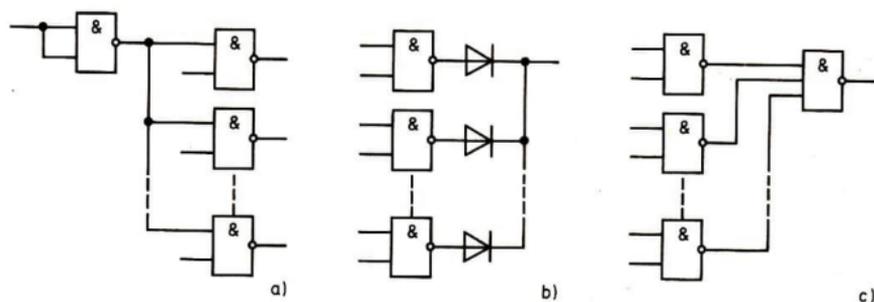


Bild 4.14 Gatterverknüpfungen; a) Parallelschaltung von Gattereingängen, b) und c) Parallelschaltung von Gatterausgängen

Während man Gattereingänge beliebig zusammenschalten kann, **dürfen Gatterausgänge niemals direkt miteinander verbunden werden**, da dadurch die Gatter zerstört würden. Gatterausgänge können entweder über Dioden oder über ein weiteres Gatter miteinander verknüpft werden (Bild 4.14).

4.3.2. Elektronisches Rechnen mit Dualzahlen

Der große Vorteil des Dualzahlensystems liegt in seinen einfachen Rechenregeln. Für die Addition von zwei einstelligen Dualzahlen gibt es die folgenden Additionsregeln:

$$A + B = S \cdot 2^0 + \ddot{U} \cdot 2^1$$

$L + L = L$	L
$H + L = H$	L
$L + H = H$	L
$H + H = L$	H

S – Summe, \ddot{U} – Übertrag

Die Spaltenspalte (S) zeigt die Funktion eines EXOR (Exklusiv-ODER), die Übertragungsspalte (\ddot{U}) die eines UND. Das Funktionselement ist ein Halbaddierer (Halbadder, Bild 4.15).

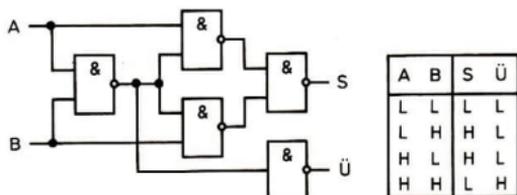


Bild 4.15 Halbaddierer

- ▼ Bauen Sie zur binären Addition eine Experimentierschaltung nach Bild 4.16 auf! Die Anzeige von Summe und Übertrag erfolgt durch die Lichtemitterdioden. Betätigen Sie die Umschalter entsprechend der Additionstabelle und überprüfen Sie das Ergebnis!

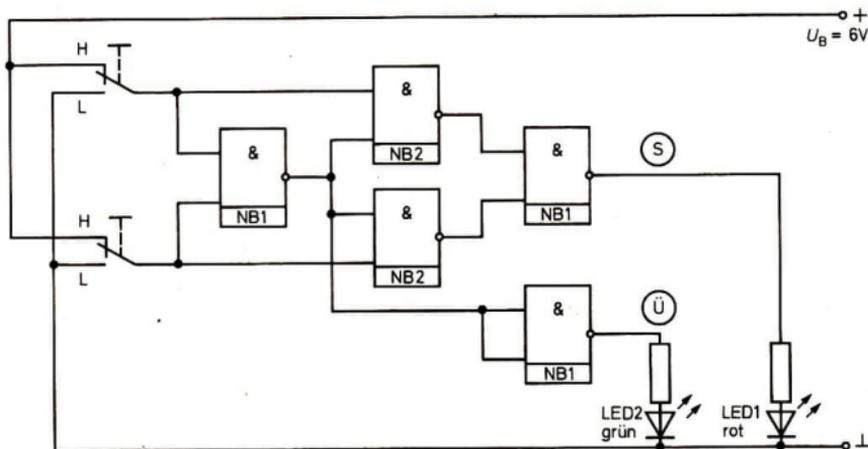


Bild 4.16 Experimentierschaltung zur Addition von Dualzahlen

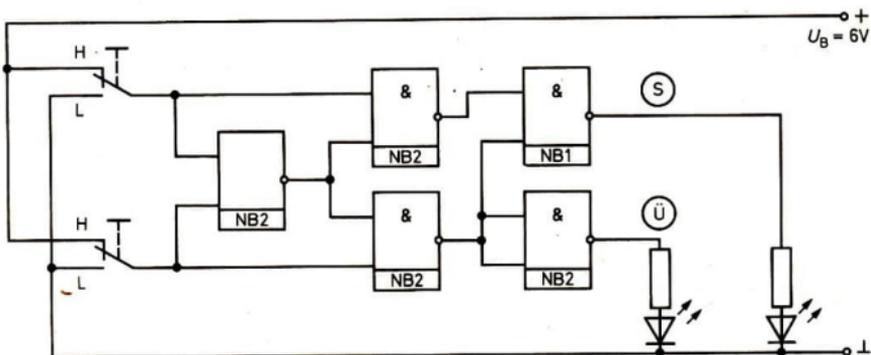


Bild 4.18 Experimentierschaltung zum Halbsubtrahierer

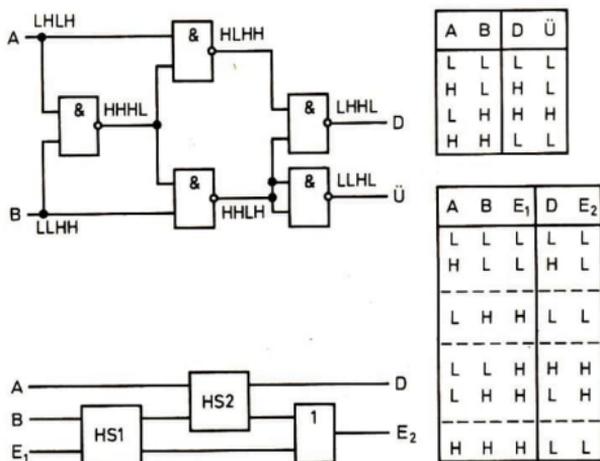


Bild 4.19 Aufbau eines Halbsubtrahierers aus NAND-Gattern und Blockschaltbild eines Vollsubtrahierers

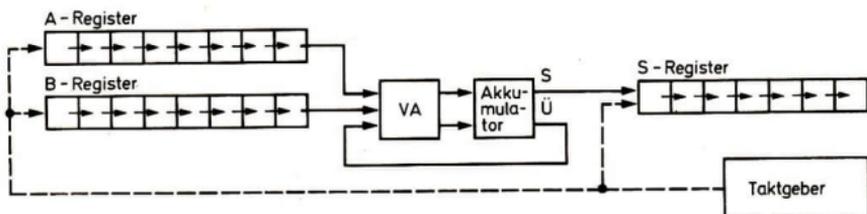


Bild 4.20 Addierwerk zur seriellen Addition zweier mehrstelliger Dualzahlen

Die anderen Grundrechenarten lassen sich auf einfachere zurückführen, so die Multiplikation auf eine fortlaufende Addition und die Division auf eine fortlaufende Subtraktion.

Bild 4.20 zeigt den Grundaufbau eines Addierwerkes, mit dem zwei mehrstellige Dualzahlen addiert werden können. Um den technischen Aufwand gering zu halten, werden die Ziffern der eingegebenen Zahlen nacheinander (seriell) spaltenweise addiert, die Zwischenergebnisse in einem Akkumulator gespeichert und dann in ein Ausgaberegister „hineingeschoben“. Dieses Prinzip wird z. B. beim Taschenrechner angewendet.

4.3.3. Praktische Schaltungen mit NAND-Gattern

Nachfolgend soll die vielseitige Anwendung von NAND-Gattern für digitale Schaltungen untersucht werden.

Überwachungseinrichtung

Für die Überwachung eines Lagerraumes soll eine elektronische Kontrolleinrichtung eingesetzt werden, die drei Signalgeber (z. B. Rauchmelder, Temperaturwächter, Lichtmelder) enthält. Sie soll dann ansprechen, wenn zwei der drei Signalgeber aktiv sind.

- Entwerfen Sie eine entsprechende Schaltung mit NAND-Gattern (an die Stelle der Signalgeber können Taster treten)!
Vergleichen Sie Ihre Schaltung mit der Experimentierschaltung in Bild 4.21! Überprüfen Sie experimentell die Funktion der Überwachungseinrichtung!

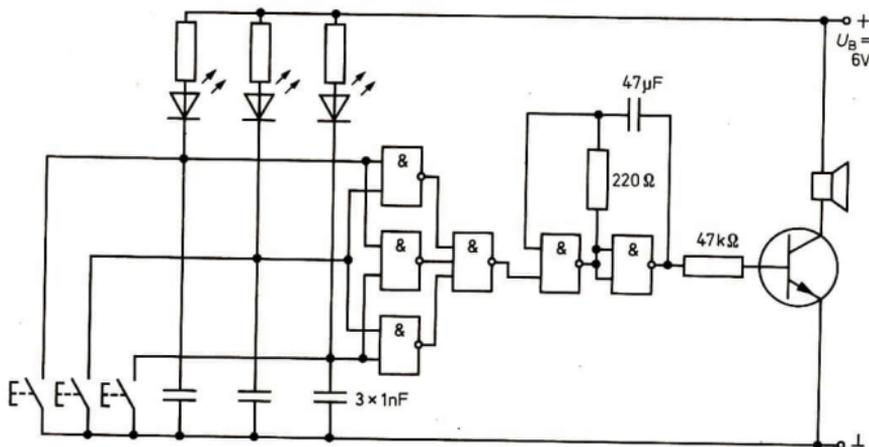


Bild 4.21 Experimentierschaltung zur Überwachungseinrichtung

Das Prinzip dieser Anlage entspricht einer Auswahl-schaltung „2 aus 3“ (Bild 4.22). Zur Steuerung von Anlagen werden Schwellwert-schalter, Impuls-generatoren und Zeit-schalter eingesetzt. Diese Funktionssysteme können auf einfache Art mit NAND-Gattern aufgebaut werden.

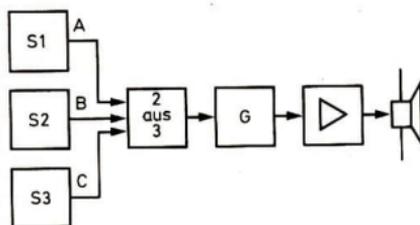
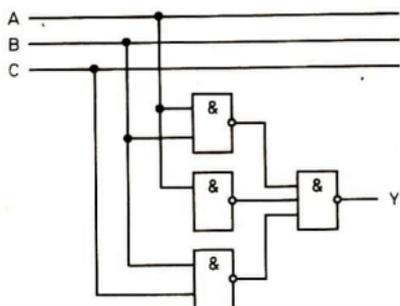


Bild 4.22
Auswahlschaltung „2 aus 3“ mit NAND-Gattern

Schwellwertschalter

Die Auslösung der Signale in der vorstehenden Überwachungseinrichtung soll erst nach Überschreitung des maximal zulässigen Wertes der Alarmgröße erfolgen. Ein geeignetes Funktionselement ist der Schwellwertschalter, ein elektronisches Relais, dessen Einschaltspannung größer ist als die Abschaltspannung. Dieser Schalter läßt sich mit 2 NAND-Gattern realisieren.

- ▼ Bauen Sie eine Experimentierschaltung mit Schwellwertschalter (Trigger) nach Bild 4.23 auf! Messen Sie die Einschaltspannung U_{ein} und die Ausschaltspannung U_{aus} bei $R_2 = 1,8 \text{ k}\Omega$ und $R_1 = 0,1 \text{ k}\Omega$; $0,33 \text{ k}\Omega$; $1 \text{ k}\Omega$; $1,8 \text{ k}\Omega$ und $5,1 \text{ k}\Omega$!

Hinweis

Der Widerstand des Einstellwiderstandes geht in den Widerstandswert von R_1 mit ein. Er muß also hochohmig gewählt werden (z. B. $100 \text{ k}\Omega$).

Erläutern Sie anhand des Ergebnisses das Betriebsverhalten und die Funktion des Triggers!

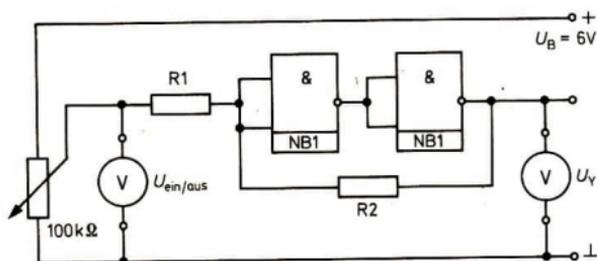


Bild 4.23
Experimentierschaltung
zum Schwellwertschalter
(Trigger)

- Berechnen Sie die Einschalt- und die Ausschaltspannung nach den Gleichungen

$$U_{\text{ein}} = U_{\text{XS}} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{und} \quad U_{\text{aus}} = U_{\text{ein}} - U_{\text{YH}} \frac{R_1}{R_2} !$$

Verwenden Sie dazu die Meßwerte aus dem vorhergehenden Experiment!

Zeitschalter

Einen einfachen Zeitschalter mit 2 NAND-Gattern zeigt Bild 4.24. Wird der Taster (X) kurzzeitig geschlossen, so lädt sich der Kondensator über den Widerstand auf, das zweite Gatter springt auf L-Pegel und verbleibt dort solange (Haltezeit t_H), bis die Spannung am Widerstand unter die Schwellenspannung U_{XS} abgesunken ist.

Berechnungsbeispiel:

$$R = 10 \text{ k}\Omega \quad C = 500 \text{ }\mu\text{F}$$

$$t_H = 10^4 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}} = 5 \text{ s}$$

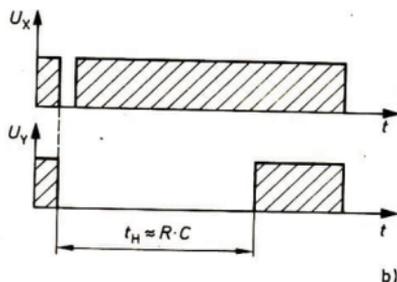
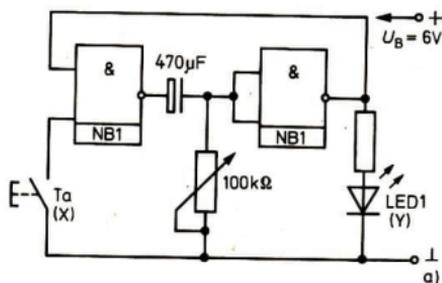


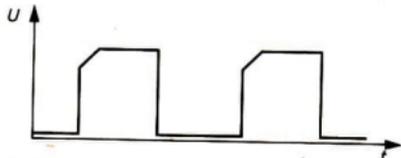
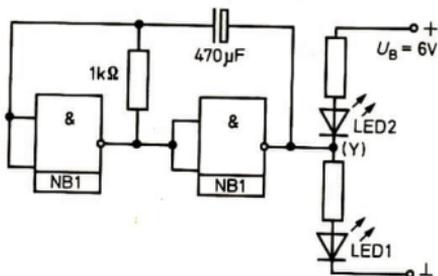
Bild 4.24 Zeitschalter mit NAND-Gattern

- a) Experimentierschaltung
b) Schaltcharakteristik

- Erproben Sie die Schaltung nach Bild 4.24 experimentell! Entwerfen Sie das Modell eines Belichtungszeitgebers für ein Fotolabor für unterschiedliche Belichtungszeiten (2 s bis 20 s)! Wie müßte der Eingangsteil des Zeitgebers aufgebaut sein, damit jeweils nur ein kurzzeitiger Startimpuls erforderlich ist?

Impulsgenerator

Bild 4.25 zeigt den Schaltungsaufbau eines Impulsgenerators mit NAND-Gattern. Die Rechteckschwingung kommt durch die Rückkopplung vom Ausgang des zweiten auf den



$$R = 200 \dots 300 \text{ }\Omega$$

$$C = 300 \text{ pF} \dots 1000 \text{ }\mu\text{F}$$

$$f \approx \frac{1}{3RC}$$

Bild 4.25 Impulsgenerator mit NAND-Gattern und Rechteckschwingung

Eingang des ersten Gatters zustande. Die Schwingungsfrequenz wird durch das Aufladen des Kondensators über den Widerstand bestimmt.

- Erproben Sie die Schaltung nach Bild 4.25 experimentell!

Durch Kombination zweier Impulsgeneratoren läßt sich auch ein Zeitzeichengenerator aufbauen (Bild 4.26).

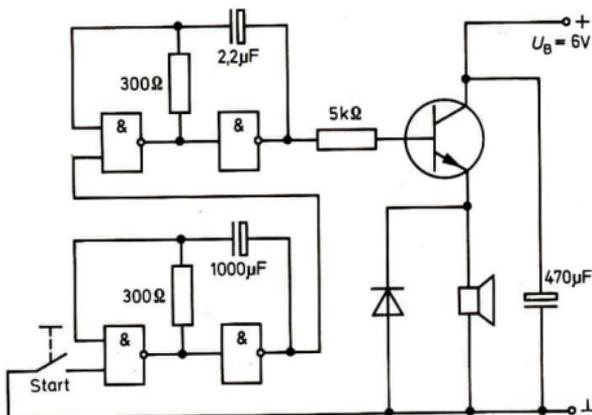


Bild 4.26
Zeitzeichengenerator

4.4. Bistabile Schaltungen

Die einfachen *kombinatorischen Schaltungen* aus Grundgattern (NAND, NOR) sind dadurch gekennzeichnet, daß die Ausgangsgrößen vom momentanen Zustand der Eingangsgrößen abhängig sind. Für die Verarbeitung von Informationen werden jedoch auch Schaltungen benötigt, deren Ausgangsgrößen sowohl von den momentan anliegenden, als auch von den vorherigen Eingangsgrößen abhängig sind.

Schaltungen, die Eingangssignale speichern und mit nachfolgenden Eingangssignalen verknüpfen, bezeichnet man als *sequentielle* Schaltungen.

4.4.1. RS-Flip-Flop

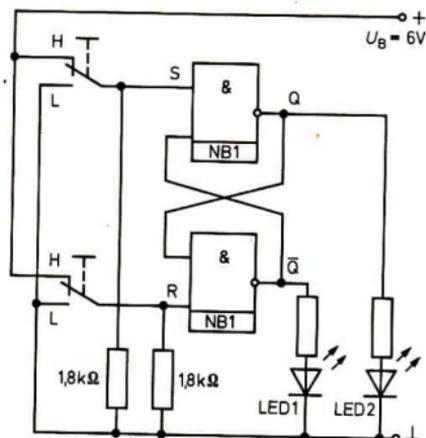
Die direkte Rückkopplung zweier Gatter führt zu einer besonderen Übertragungseigenschaft: Man kann damit ein zuvor eingegebenes Signal speichern. Das soll am Beispiel der einfachsten Speicherschaltung, eines *RS-Flip-Flop*, untersucht werden.

- ▼ Bauen Sie eine Speicherschaltung nach Bild 4.27 auf! Legen Sie mit Hilfe der Schalter an die Schaltungseingänge die Kombinationen LL, LH, HL und HH an! Die Ausgangszustände werden an den Lichtemitterdioden angezeigt.

Stellen Sie eine Schaltbelegungstabelle nach folgendem Muster auf!

S	R	Q	\bar{Q}
L	L		
L	H		
H	L		
H	H		

Bild 4.27
Experimentierschaltung zum RS-Flip-Flop



Die Eingänge dieser einfachen Speicherschaltung werden als Setzeingang S (von englisch: set) und als Rücksetzeingang R (von englisch: reset) bezeichnet. Das Ausgangssignal Q ist von der zeitlichen Reihenfolge der Eingangssignale abhängig (Bild 4.28). \bar{Q} ist das entsprechende negierte Signal.

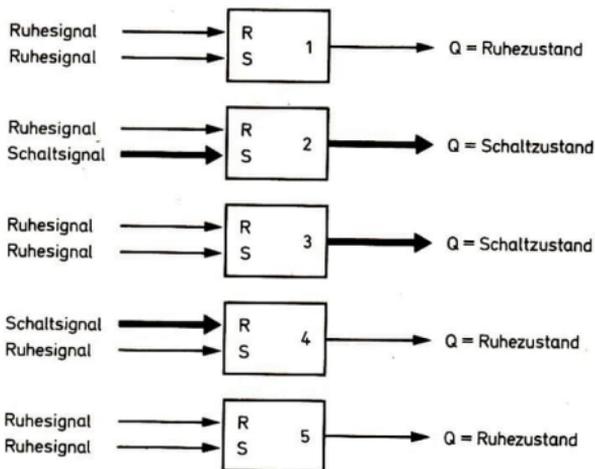


Bild 4.28
Funktionsprinzip eines
1-Bit-Speichers

Der im Ruhezustand befindliche Speicher wird durch ein Schaltsignal am Setzeingang S in den Schaltzustand versetzt. Dieser Schaltzustand bleibt auch erhalten, wenn das Signal nicht mehr einwirkt. Erst ein Schaltsignal am Rücksetzeingang R führt zur Umschaltung in den Ruhezustand. Dieser bleibt nach Wegfall des Signals ebenfalls erhalten. Eine Wieder-

holung des Schaltsignals am gleichen Eingang ändert den Zustand des „gesetzten“ Speichers nicht mehr.

Liegen die Eingänge gleichzeitig auf H-Pegel, so schaltet das Flip-Flop in einen nicht vorherbestimmbaren Zustand. Das ist durch den Umstand bedingt, daß einer der beiden Ausgangstristoren der NAND-Gatter schneller leitend wird und damit den anderen sperrt.

Wechselt der Pegel von einem Eingang zum anderen, schaltet das Flip-Flop um. Das Flip-Flop ist also in der Lage, einen eingegebenen Zustand zu speichern. Es ist die Grundeinheit einer Speicherzelle und speichert die Information 1 Bit, nämlich $Q = H$ (logisch 1) oder $Q = L$ (logisch 0). Damit erfüllt die einfache Speicherschaltung eine wesentliche Voraussetzung für das Zählen; sie hat ein „Gedächtnis“.

- ▼ Bauen Sie ein RS-Flip-Flop mit einer Experimentierschaltung nach Bild 4.29 auf! Führen Sie mit Hilfe des Umschalters abwechselnd dem Eingang S bzw. dem Eingang R ein L-Signal zu! Beobachten Sie die entsprechenden Zustände am Ausgang Q (bzw. \bar{Q})! Begründen Sie, warum bei jedem Einschalten der Ausgang Q auf H und beim Umschalten wieder auf L gesetzt wird!

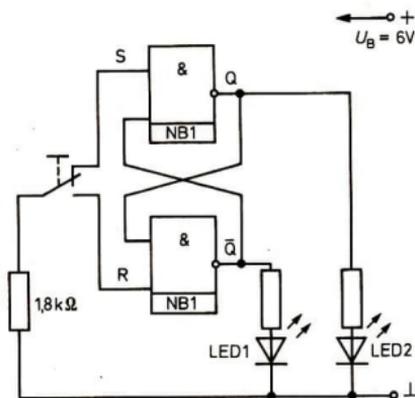


Bild 4.29
Experimentierschaltung zum statischen RS-Flip-Flop

Für die Anwendung in Zählschaltungen sind *dynamisch gesteuerte Flip-Flops* erforderlich. Sie unterscheiden sich vom statischen RS-Flip-Flop durch die Zusammenfassung der Eingänge in Verbindung mit RC-Gliedern.

- ▼ Bauen Sie ein dynamisches Flip-Flop mit einer Experimentierschaltung nach Bild 4.30 auf! Die Eingangsimpulse werden dem Taktgeneratorbaustein entnommen. Beobachten Sie die Impulsfrequenz am Taktgenerator und am Ausgang Q! Durch Betätigen des Tasters können die Impulse auch von Hand eingegeben werden.

Durch die RC-Glieder wird bewirkt, daß sich der Schaltzustand des Flip-Flops bei jeder Änderung des Eingangsimpulses von H nach L (Taktflanke) ändert. Die Frequenz des Ausgangssignales (LED 1) hat nur den halben Wert der Taktfrequenz. Das Flip-Flop *teilt* die

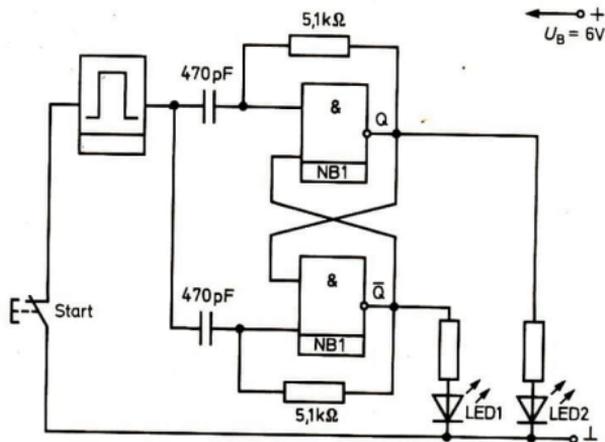


Bild 4.30
Experimentierschaltung
zum flankengetriggerten
Flip-Flop

Frequenz der Eingangsimpulse im Verhältnis 2:1. Die Schaltung arbeitet als sogenannter 2:1-Teiler.

4.4.2. D-Flip-Flop

Das einfache RS-Flip-Flop ist für den Einsatz in Speicherschaltungen nur bedingt geeignet. Oft ist es notwendig, die zu speichernden logischen Zustände erst dann in das Flip-Flop einzugeben, wenn dieses mit Hilfe eines Taktsignals dafür freigegeben wird. Ein solches Verhalten kann durch schaltungstechnische Erweiterungen des RS-Flip-Flops erreicht werden. Das getaktete RS-Flip-Flop (Bild 4.31) besitzt einen zusätzlichen Takteingang T.

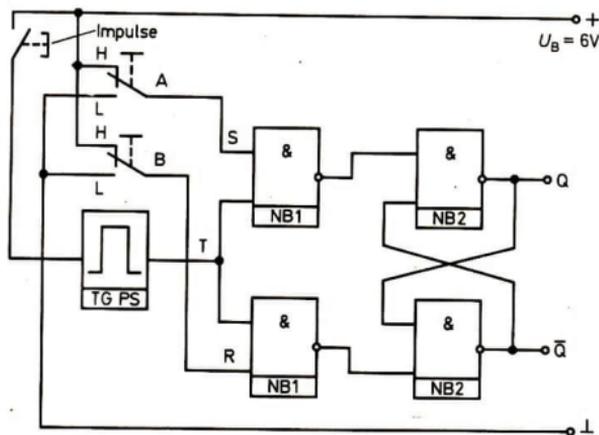


Bild 4.31
Experimentierschaltung
zum getakteten RS-Flip-
Flop

- Erproben Sie die Schaltung des getakteten RS-Flip-Flops (Bild 4.31) experimentell! Erfassen Sie die Ergebnisse in einer Schaltbelegungstabelle!

T	R	S	Q	\bar{Q}
H	H	L		
H	L	H		
L	H	L		
L	L	H		

Es ergibt sich, daß das Flip-Flop nur freigegeben wird, wenn am Takteingang T ein H-Signal anliegt. Ein L-Signal am Takteingang trennt das Flip-Flop von den Signaleingängen. Solange der Takt die Schaltung „öffnet“, können die Eingangsimpulse den logischen Zustand verändern. Gespeichert wird der Zustand, der am Ende des Taktes vorlag.

Aus dieser Schaltung läßt sich das sogenannte D-Flip-Flop (von englisch: delay – verzögern) entwickeln, das nur einen Signaleingang und einen Takteingang hat.

- Bauen Sie mit der Experimentierschaltung nach Bild 4.32 ein D-Flip-Flop auf! Geben Sie mit Hilfe des Setzbausteines Impulse bei geöffnetem und geschlossenem Taktswitcher ein! Beobachten Sie die Ausgangszustände! Tragen Sie die Beobachtungsergebnisse in eine Schaltbelegungstabelle ein!

T	D	Q	\bar{Q}
H	L		
H	H		
L	L		
L	H		

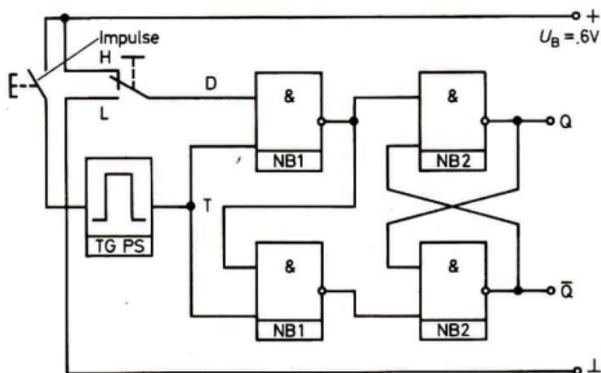


Bild 4.32
Experimentierschaltung
zum D-Flip-Flop

Das D-Flip-Flop speichert die am Eingang D auftretenden Informationen immer nur dann, wenn am Takteingang ein H-Pegel anliegt. Am Ausgang wird das Signal gespeichert, das am Eingang D zu dem Zeitpunkt anlag, an dem der Takt endete.

4.4.3. JK-MS-Flip-Flop

Dieses Flip-Flop wird am häufigsten für Zehlschaltungen eingesetzt. Es besteht aus zwei RST-Flip-Flops, dem Master M und dem Slave S (Bild 4.33). Während M den Zählimpuls

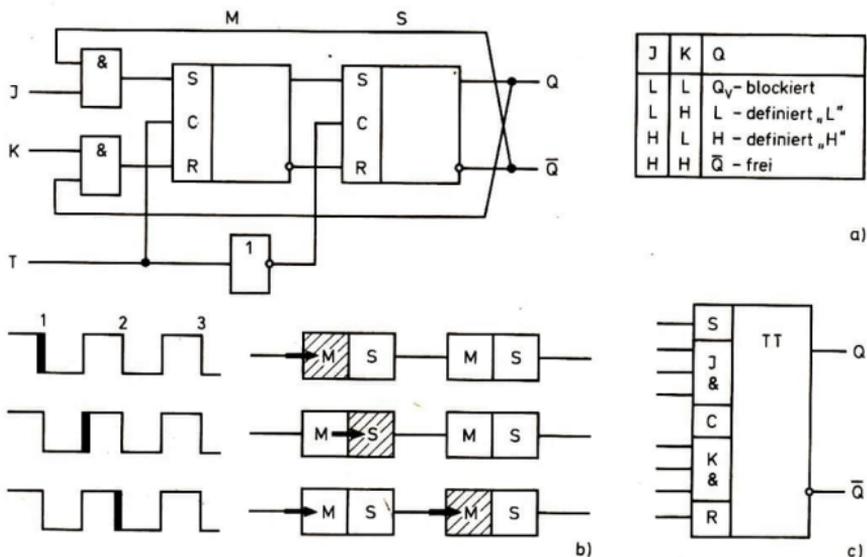


Bild 4.33 JK-MS-Flip-Flop
 a) Schaltung und Schaltbelegungstabelle
 b) Impulsübernahme und -weitergabe
 c) Symbol

übernimmt, wird das vorhergehende Signal an S weitergegeben. So können Impulsübernahme und -weitergabe in einem Takt erfolgen. Das ist vorteilhaft für Zählketten.

- Überprüfen Sie mit der Experimentierschaltung nach Bild 4.34 experimentell die Schaltbelegungstabelle!

Wenn an J und K L-Pegel liegt, ist das Flip-Flop blockiert, d. h. der Zustand nach dem Taktimpuls Q_n ist gleich dem Zustand vor dem Taktimpuls Q_v , also $Q_n = Q_v$. Liegt dagegen an J und K H-Pegel (das ist schon der Fall, wenn beide nicht angeschlossen sind), dann ist $Q_n = \bar{Q}_v$, d. h. der Ausgangszustand wird durch den Taktimpuls umgekehrt. Diese Eigenschaft wird bei Zehlschaltungen angewendet (Anwendungsbeispiel siehe Abschnitt 4.5.).

4.4.4. Prellfreier Schalter

Die Eingangsimpulse für Digitalschaltungen müssen eine möglichst hohe Flankensteilheit aufweisen. Erfolgt die Impulseingabe mit einfachen mechanischen Schaltern, so kann es durch das Prellen der Kontakte zur mehrmaligen Eingabe kommen. Um in den Experimentierschaltungen auch mit den von Hand eingegebenen Einzelpulsen mit Sicherheit nur den gewollten Impuls einmalig zu erzeugen, verwendet man ein RS-Flip-Flop als „prellfreien Schalter“ (Bild 4.35).

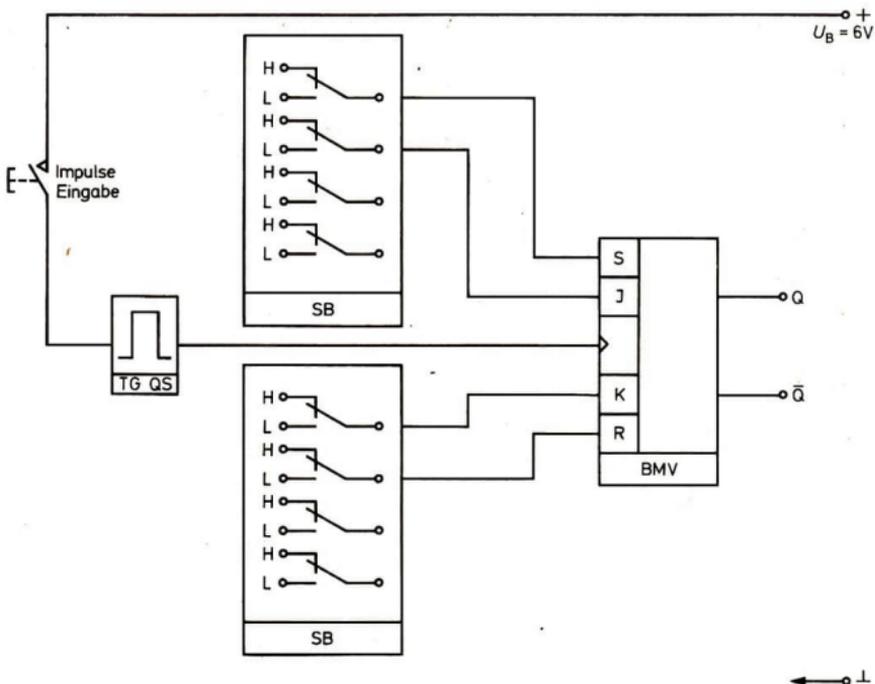


Bild 4.34 Experimentierschaltung zum JK-MS-Flip-Flop

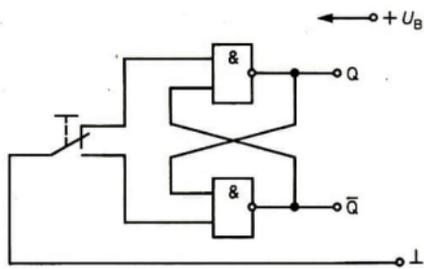


Bild 4.35 Prelfreier Schalter

Bei der ersten Kontaktgabe kippt das RS-Flip-Flop in den stabilen Zustand. Weitere durch das Schalterprellen verursachte Impulse haben keinen Einfluß mehr. Erst nach dem Rückstellen mit Hilfe des Umschalters ist eine neue Impulseingabe möglich.

4.5. Zähler und Speicher

4.5.1. Zähler, Speicher, Register

Das RS-Flip-Flop, das D-Flip-Flop und das JK-Flip-Flop sind Funktionseinheiten, die einen einmal eingegebenen Setz- bzw. Rücksetzzustand speichern können. Sie speichern wie schon dargestellt, die *Informationseinheit 1 bit*, was soviel bedeutet wie „gesetzt“ oder „nicht gesetzt“. Die Informationseinheit 1 bit ist also die Information über die Auswahl zwischen 2 Zuständen (0 oder 1). Das Bit hingegen ist eine Stelle im Dualsystem, häufig auch übertragen auf die Funktionseinheit, die 1 bit speichert. Schaltet man der einfachen Zählstufe des Experiments nach Bild 4.30 noch drei gleichartige Stufen nach, so erhält man einen 4-Bit-Zähler (Bild 4.36). Der Pegelzustand der Ausgänge wird mit Lichtemitterdioden angezeigt.

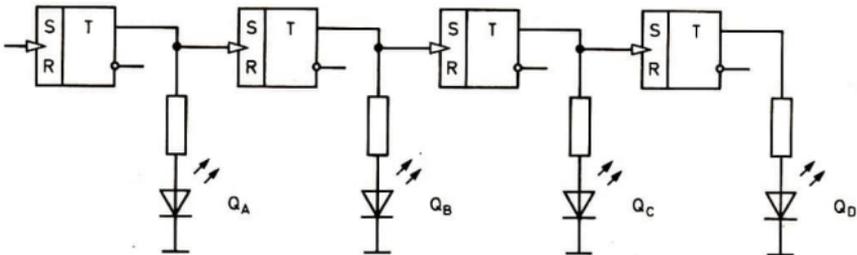


Bild 4.36 4-Bit-Zähler

- Ermitteln Sie experimentell die Pegelzustände an den Ausgängen Q_A , Q_B , Q_C , Q_D für die Impulse von 1 bis 16, die am Eingang eingegeben werden. Stellen Sie vor Beginn des Experiments alle Ausgänge auf L, indem Sie den Eingang R kurzzeitig mit dem Massepotential (L) verbinden!

Vergleichen Sie das Ergebnis mit der nachfolgenden Tabelle der Zählzustände (S. 155)!

An den Ausgängen Q_A bis Q_D kann die Anzahl einer Folge von Zählimpulsen an dem Zustand der einzelnen Flip-Flop-Stufen abgelesen werden. Mit dem 4-Bit-Zähler können also 15 Zählzustände gespeichert werden, bevor der Anfangszustand wieder eingenommen wird. Der *Zählumfang* beträgt $Z = 2^4 - 1 = 15$.

Allgemein gilt: Bei n Flip-Flop-Stufen beträgt der größtmögliche Zählumfang $X = 2^n - 1$.

Der Aufbau der Zählstufen aus einzelnen Grundgattern ist sehr aufwendig und unübersichtlich.

- Bauen Sie die Experimentierschaltung einer Binärzählkette nach Bild 4.37 auf! Stellen Sie die Zählerausgänge auf L und geben Sie langsam die Einzelimpulse ein! Vergleichen Sie die Anzeige der Ausgangszustände mit den Angaben in der vorher ermittelten Tabelle!

Die Zählkette aus JK-Flip-Flops zeigt bereits einen einfacheren Schaltungsaufbau. Für die Erweiterung des Zählumfangs sind mehrere 4-Bit-Ketten erforderlich. Dabei wird der

Impulsfolge Dezimal	Ausgänge Tetrade				Übertrag
	Q _D	Q _C	Q _B	Q _A	
0	L	L	L	L	
1	L	L	L	H	
2	L	L	H	L	
3	L	L	H	H	
4	L	H	L	L	
5	L	H	L	H	
6	L	H	H	L	
7	L	H	H	H	
8	H	L	L	L	
9	H	L	L	H	
.....					
10	H	L	H	L	
11	H	L	H	H	
12	H	H	L	L	
13	H	H	L	H	
14	H	H	H	L	
15	H	H	H	H	
.....					
16	L	L	L	L	H

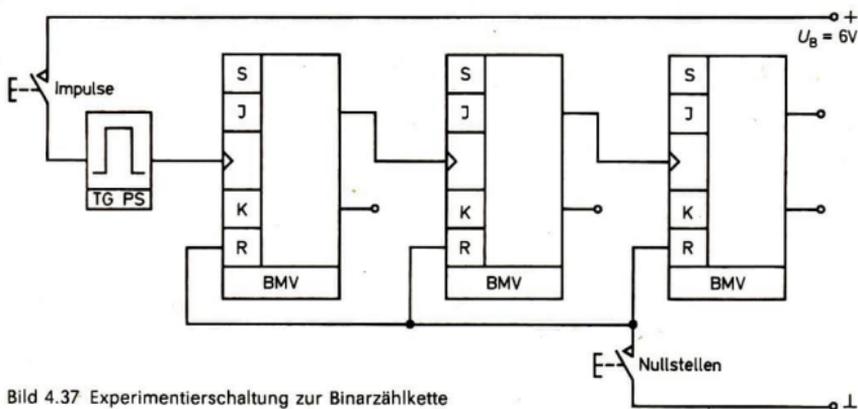


Bild 4.37 Experimentierschaltung zur Binarzählkette

Übertrag der vorhergehenden Kette immer an die nachfolgende weitergegeben (Bild 4.38).

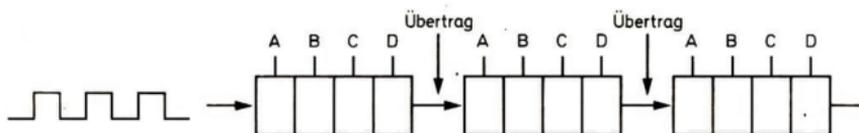


Bild 4.38 Aufbau eines Dualzählers aus mehreren 4-Bit-Stufen

Zähler werden auch als *Untersetzer* verwendet. So erscheint der erste Übertragungsimpuls erst nach dem 16. Zählimpuls. Die Zählfrequenz ist auf 1:16 untersetzt worden.

Das *Register* ist eine besondere Form des Speichers und im wesentlichen nicht anders aufgebaut als ein Dualzähler. Eine Anwendung wurde bereits in Bild 4.20 angedeutet. Es besitzt einen Dateneingang und einen Taktimpulseingang. Ein am Dateneingang anliegender Zählzustand kann mit Hilfe der Taktimpulse auf die Flip-Flop-Stufen des Registers übertragen, dort gespeichert und ebenfalls mit Hilfe der Taktimpulse wieder abgerufen werden.

Während ein Register nur aus einer Bitkette besteht, also eindimensional ist, können Speicher auch in mehreren Richtungen Informationen aufnehmen und wieder abgeben. Ein Beispiel dafür ist die zweidimensionale Speichermatrix in Bild 4.10, die den Zeichencode eines Zeichengenerators speichert.

4.5.2. Anwendung von Zählerschaltungen

Bisher wurden Dualzähler betrachtet (z. B. Bild 4.36). Die Anzahl der eingegebenen Zählimpulse wird an den Zählzuständen der Ausgänge Q_A bis Q_D abgelesen und kann danach als Dualzahl aufgeschrieben werden. Der 16. Zählimpuls wird als Übertrag von Q_D weitergegeben (Bild 4.38). Der Zählumfang beträgt $Z = 2^4 - 1 = 15$. In praktischen Anwendungsfällen benötigt man aber oft einen anderen Zählumfang. So ist der Grundumfang bei einer elektronischen Uhr $M = 3$ und bei einem dekadischen Zähler $M = 5$. Durch Vorschalten von dualen Untersetzerstufen kann man den Grundumfang erweitern.

Zählumfang:

$$\begin{array}{ll}
 6 = 2 \cdot 3 & 10 = 2 \cdot 5 \\
 12 = 2 \cdot 2 \cdot 3 & 100 = 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5 \\
 24 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 & 1000 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 \\
 60 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 &
 \end{array}$$

- ▼ Bauen Sie zur Untersuchung des Zählumfangs eine Experimentierschaltung nach Bild 4.39 auf! Überprüfen Sie experimentell, nach wieviel Eingangsimpulsen der Zählumfang erreicht ist! Erläutern Sie das Funktionsprinzip der Schaltung!
- Entwerfen Sie die Schaltung für eine Binärzählkette mit dem Zählumfang $M = 3!$

Eine weitere Anwendung ist der *Ringzähler*. Hier wird der Übertrag wieder auf den Eingang zurückgeführt, so daß immer eine Flip-Flop-Stufe schaltet und die Zählung nach Durchlaufen der Zählkette wieder von vorn beginnt.

- Überprüfen Sie mit einer Experimentierschaltung nach Bild 4.40 das Funktionsprinzip des Ringzählers!

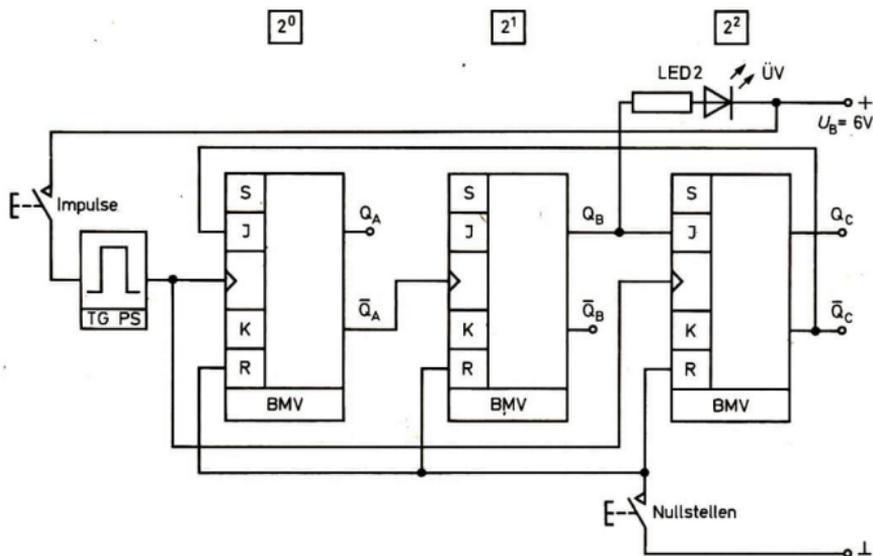


Bild 4.39 Experimentierschaltung zur Binärzählkette mit begrenztem Zählumfang

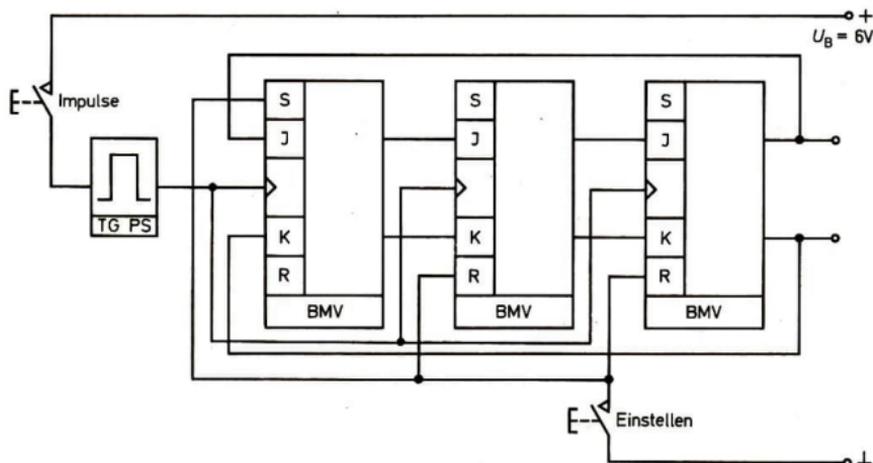


Bild 4.40 Experimentierschaltung zum Ringzähler

Eine beliebige Anwendung des Ringzählers ist die laufende Lichterkette (Bild 4.41). Hauptanwendungsgebiet allerdings ist das Schieberegister (Bild 4.42), bei dem ein Signal mit

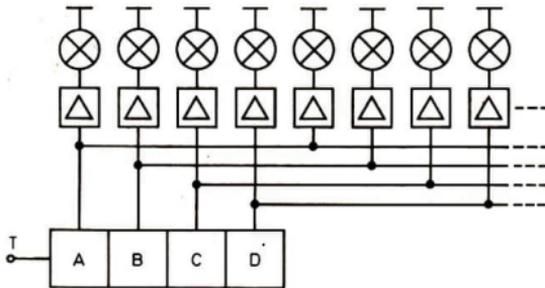


Bild 4.41
Ringzähler als „laufendes Licht“

Hilfe der Taktimpulse „hineingeschoben“ wird. Schieberegister werden u. a. in Mikrorechnern eingesetzt.

- ▼ Bauen Sie ein Schieberegister mit einer Experimentierschaltung nach Bild 4.42 auf! Mit Hilfe der Dateneingabe kann ein bestimmter Pegelzustand gesetzt werden. Führen Sie langsam Taktimpulse zu und beobachten Sie die Zählerausgänge! Erläutern Sie das Funktionsprinzip des Schieberegisters!

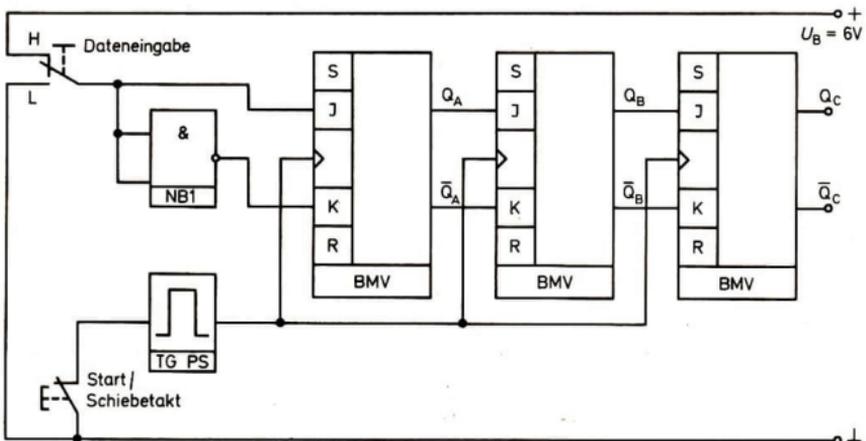


Bild 4.42 Experimentierschaltung zum Schieberegister

4.5.3. Dekadischer Zähler mit Ziffernanzeige

In den vorangegangenen Experimenten wird deutlich, daß auch der Aufbau eines Zählers aus JK-Flip-Flops noch mit erheblichem Schaltungsaufwand verbunden ist. Der hohe Integrationsgrad der modernen Mikroelektronik ermöglicht es, diese Funktionen in einem Schaltkreis zu vereinigen.

- ▼ Bauen Sie die Experimentierschaltung eines integrierten Zählers nach Bild 4.43 auf! Schließen Sie den prellfreien Schalter zuerst am Eingang ZV (Zählen vorwärts) an und geben Sie Impulse ein! Beobachten Sie die Ausgänge mittels der Lichtemitterdioden! Wiederholen Sie den Vorgang am Eingang ZR (Zählen rückwärts)!

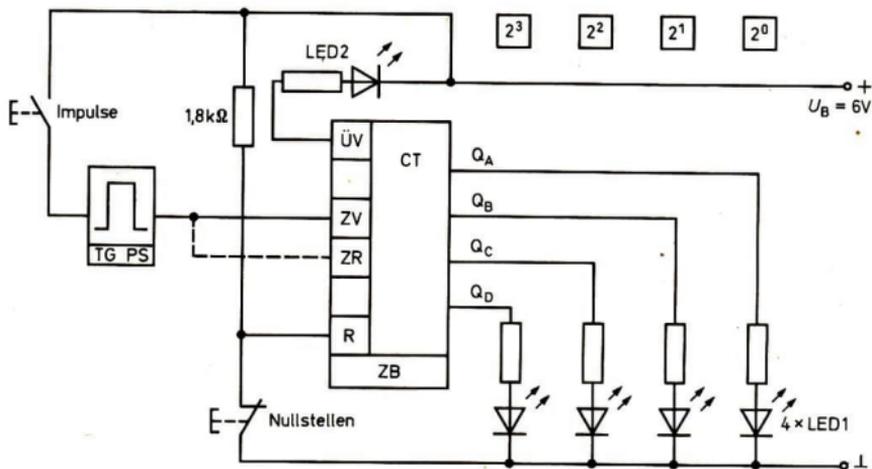


Bild 4.43 Experimentierschaltung zum Zählerbaustein

Im untersuchten Zählerschaltkreis sind die Zählstufen zusammengefaßt. Sie sind so angeordnet, daß noch weitere Funktionen ausgeführt werden können, wie das Vorwärts- und Rückwärtszählen, die Eingabe eines Anfangswertes sowie das Rücksetzen des Zählzustandes. Der Zähler schaltet auf der L-H-Flanke der Zählimpulse. Der Rücksetzeingang R liegt beim Zählen auf L. Wird kurzzeitig R = H gesetzt, also die Masseverbindung unterbrochen, so wird Q_A bis $Q_D = L$. Am Übertragsausgang (ÜV bzw. ÜR) erscheint nach dem 15. Zählimpuls ein Impuls, mit dem z. B. eine nachfolgende Zählstufe angesteuert werden kann. Der Zählstand wird an den Ausgängen Q_A bis Q_D als Binärzahl angezeigt. Für die praktische Anwendung soll das Zählergebnis aber im allgemeinen als Dezimalzahl angezeigt werden.

- Überlegen Sie, wie der Zählerbaustein mit der in Bild 4.8b dargestellten Kombination von Dekoder und Ziffernanzeige verbunden werden kann! Entwerfen Sie eine entsprechende Schaltung und vergleichen Sie diese mit Bild 4.44! Erproben Sie die Schaltung experimentell!

Der von der Lichtemitterdiode angezeigte Impuls ÜV wird zur Ansteuerung des nächsten Zählers genutzt. Durch Zusammenschaltung mehrerer Zählerschaltkreise werden so mehrstellige Zähler aufgebaut (Bild 4.45).

Mit Hilfe des Zählers läßt sich auch ein elektronischer Würfel aufbauen.

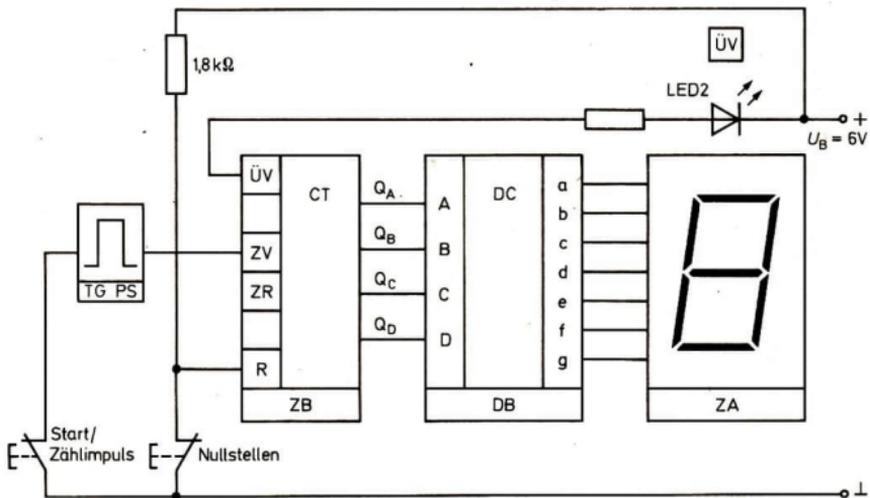


Bild 4.44 Experimentierschaltung zum Binärzähler mit Ziffernanzeige

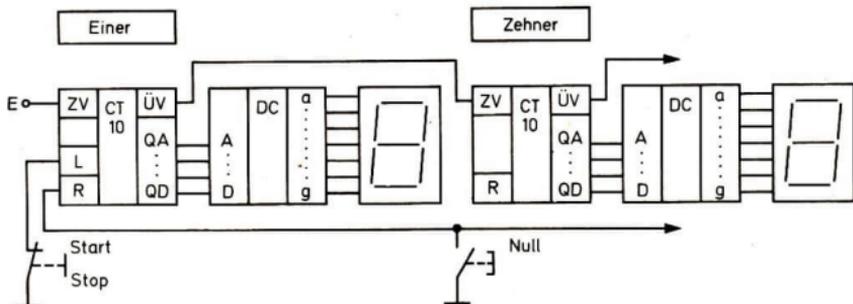


Bild 4.45 Mehrstelliger Zähler

- ▼ Bauen Sie einen elektronischen Würfel mit einer Experimentierschaltung nach Bild 4.46 auf! Die Steuerung des Würfels erfolgt durch das Inbetriebsetzen und Stoppen des Taktgenerators. Der angezeigte Wert ist zufällig.

Nachdem der Taktgenerator gestartet wurde, zählt der Zähler fortlaufend. Durch die Dioden erfolgt jeweils nach Erreichen der Zahl „6“ die Rückstellung. Wird der Taktgenerator gestoppt, erscheint eine Zahl zwischen 1 und 6.

Das Experiment zeigt das Prinzip: Will man den Zählumfang verändern, so muß man den Zähler noch mit einer Erkennungslogik versehen, die dafür sorgt, daß der Zähler bei ei-

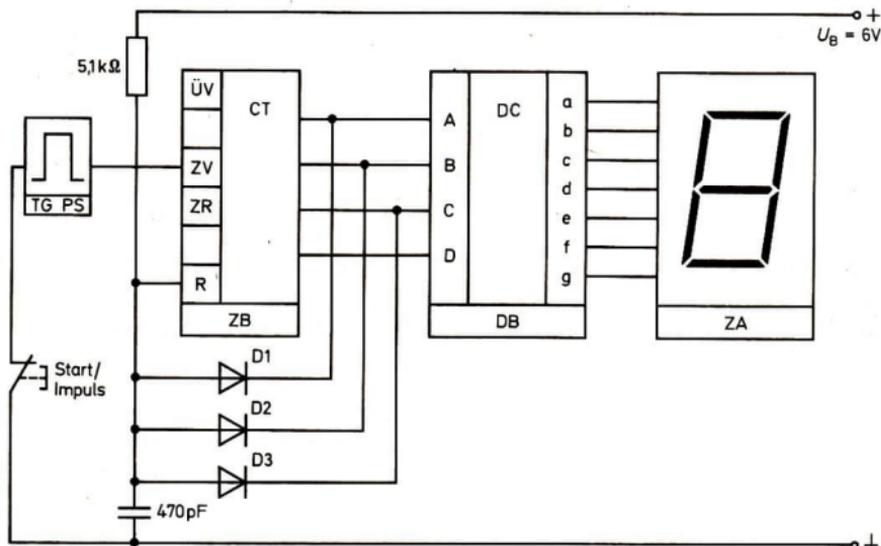


Bild 4.46 Experimentierschaltung zum elektronischen Würfel

nem Zählzyklus von n nach dem $(n+1)$ ten Impuls wieder auf den Ausgangszustand zurückschaltet (Bild 4.47). Dazu sind die in der Tabelle angekreuzten Schalter zu schließen. Der Übertrag zur folgenden Zählstufe wird nun nicht mehr vom ÜV-Anschluß, sondern von R aus weitergeleitet.

Das Einspeichern einer Zahl in den Zähler erfolgt mit einer Schaltung nach Bild 4.48. Dazu werden die der Dualziffer entsprechenden Schalter geschlossen und der Ladetaster

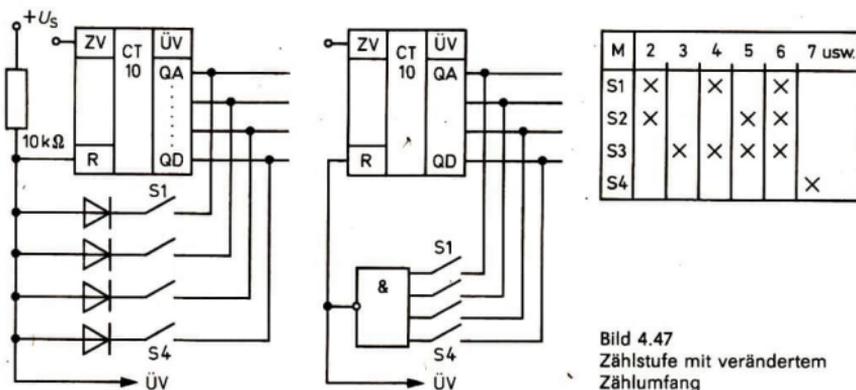


Bild 4.47
Zählstufe mit verändertem
Zählumfang

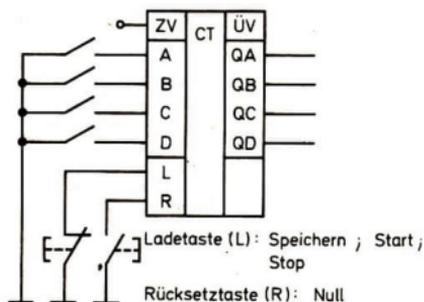


Bild 4.48
Speichern eines Anfangswertes in den Zähler

(L) kurzzeitig betätigt. Dieser Taster wird auch für die Signale „Start“ (Taster geschlossen) und „Stop“ (Taster geöffnet) eingesetzt.

- Entwerfen Sie die Schaltung eines dreistufigen dekadischen Zählers mit den Funktionen „Start“ und „Stop“! Versehen Sie die Schaltung mit einem Zeitschalter nach Bild 4.24! Eichen Sie den Zeitschalter auf $t_{\text{Z}} = 1 \text{ s}$ und setzen Sie die Schaltung für Frequenzmessungen ein!
Wie müßte der Zähler einer elektronischen Uhr mit Ziffernanzeige (60 Sekunden, 60 Minuten, 24 Stunden) mit den beschriebenen Schaltkreisen aufgebaut sein? Versehen Sie die Schaltung mit einem 1-Hz-Impulsgenerator nach Bild 4.25 und verwenden Sie diese als elektronische Uhr! Die Uhrzeit wird durch Einspeichern von Zählstartwerten bzw. durch Anlegen des Zählimpulses wahlweise an die einzelnen Zählstufen eingestellt.
- Entwickeln Sie experimentell eine elektronische Stoppuhr mit Zehntelsekunden-, Sekunden- und Minutenanzeige!

5. Anhang

5.1. Hinweise zur Technologie der Leiterplattenherstellung

Eine *Leiterplatte* ist das Trägermaterial, auf dem die *Leiterzüge* mit allen dazugehörigen Durchbrüchen vorhanden sind. Daraus entsteht nach dem Bestücken die *gedruckte Schaltung* als funktionsfähige Einheit. Das *Basismaterial* ist die unbearbeitete kupferkaschierte Platte aus Hartpapier (Pertinax) oder Epoxidglashartgewebe (Cevausit).

5.1.1. Kopiervorlagen

In allen Fällen, ganz gleich auf welche Weise Leiterplatten hergestellt werden, ist eine Kopiervorlage erforderlich. Daraus muß hervorgehen, wie das Schaltbild als *Leiterbild* mit allen erforderlichen Anschlußpunkten und Durchbrüchen für die Montage der Bauelemente verwirklicht werden soll. Das Spiegelbild des Leiterbildes ist der *Bestückungsplan*.

Für den Entwurf eines Leiterbildes nimmt man kariertes Papier mit einem 5-mm-Raster. Alle Bohrungen für die Montage der Bauelemente müssen auf Kreuzungspunkten des Rasters liegen. Für einfache Schaltungen mit diskreten Bauelementen hat das Leiterbild die Originalgröße im Maßstab 1:1. Die Abstände für die Bohrungen ergeben sich aus den geometrischen Abmessungen der einzusetzenden Bauelemente. Diese Maße können den Tafeln des Anhangs entnommen werden. Dem Schaltbild folgend wird nun versucht, kreuzungsfreie Verbindungen zu finden. Gelingt das nicht, müssen Drahtbrücken vorgesehen werden. Die Leiterstrukturen werden zunächst nur als Verbindungslinien, ohne Berücksichtigung der Leiterbreite, gezeichnet. Es kommt darauf an, die Lösung mit den kürzesten Verbindungen und den wenigsten Brücken zu finden. Ist das gelungen, werden die Trennlinien eingezeichnet, wenn die Leiterplatte nach der Ritz- oder Frästechnik entstehen soll.

Sollen die Leiterbahnen mit Abdecklack gezeichnet werden, muß geprüft werden, ob die zwischen zwei Lötäugen hindurchgehenden Leiterbahnen noch genügend Platz haben. Gegebenenfalls muß das Leiterbild umkonstruiert werden. Weitere Hinweise findet man in [1] und [2].

Die Übertragung auf das Basismaterial erfolgt am günstigsten mit Hilfe einer Lochrasterplatte, auf der die Bohrungen nach dem Raster der Zeichnung mit Faserschreiber gekennzeichnet sind. Auf einem Anschlagbrett mit rechtwinklig zueinander aufgesetzten 5 mm starken Leisten wird zuerst das Basismaterial (Kupferseite nach oben) mit seitlich eingeschlagenen Drahtstiften arretiert; darauf in gleicher Weise die Lochrasterplatte. Die künftigen Löcher werden nur angebohrt oder gekörnt. Dann kann man nach dem Entfernen der Lochrasterplatte die Lötäugen mit dem Nullenzirkel und die Leiterbahnen mit der Ziehfeder zeichnen. Die 5 mm hohen Leisten dienen zur Auflage eines Lineals.

Bei zunehmendem Einsatz von integrierten Schaltungen (IS), kleineren Bauelementen und

größerer Dichte sind die oben genannten Methoden nicht mehr möglich, weil das Grundraster nur noch 2,5 mm beträgt. Durch einfaches Zeichnen mit Abdecklack können derartige Leiterplatten nicht mehr betriebssicher und ästhetisch ansprechend hergestellt werden. Eine Möglichkeit besteht im Übergang zum *photomechanischen Verfahren*.

Beim Entwerfen des Leiterbildes bedient man sich auch hierbei des karierten Schreibpapiers mit dem 5-mm-Raster. Das entstehende Leiterbild hat dann aber den Maßstab 2:1. Alle Kreuzungspunkte haben demzufolge auf der späteren Leiterplatte einen Abstand von 2,5 mm. Der fertige Entwurf wird nunmehr nicht auf das Basismaterial übertragen, sondern es wird eine Reinzeichnung mit Tusche angefertigt. Der größere Maßstab hat vor allem den Vorteil, daß mit Tusche auf Papier genauer gezeichnet werden kann als mit Lack auf der Leiterplatte im Maßstab 1:1. Wenn eine Klein- oder Tischzeichenmaschine zur Verfügung steht, verbessert sich die Qualität der Zeichnung erheblich. Neben dem Skribent kommen die Ziehfeder und der Nullenzirkel zur Anwendung. Die Strichbreite sollte höchstens 0,5 mm betragen. Demzufolge werden damit hauptsächlich die Außenkonturen gezeichnet. Auch zum Ausfüllen der Leiterstruktur eignet sich die Ziehfeder, die wie ein Pinsel geführt wird, weil die Tusche auch gut deckend aufgetragen werden muß. Mit dem Nullenzirkel werden bei Lötäugen zuerst alle Innenkreise, dann alle Außenkreise gezeichnet. Für das Zeichnen von Kreisen ist Korrektostat-Karton mit grünem 5-mm-Rasteraufdruck besonders geeignet. Dabei handelt es sich um eine beiderseitig mit Papier kaschierte Alu-Folie, bei der der Einstich jedesmal wieder exakt getroffen wird. Ein weiterer Vorteil besteht noch darin, daß dieses Material nicht wellig wird.

Beim Einsatz von Transparentpapier wird die letzte Entwurfszeichnung unter den Transparentbogen gelegt und danach die Reinzeichnung angefertigt. Bei allen Leiterbildzeichnungen müssen die Schneidekanten und Maßlinien mit eingezeichnet werden, die bei der fotografischen Verarbeitung zur Festlegung des Maßstabes 1:1 benötigt werden. Außerhalb dieser Fläche angebrachte Mittellinien erleichtern das verzerrungsfreie Einstellen der Kamera bei der Reproduktion der Leiterbildvorlage.

Den weiteren Weg bis zur fertigen Leiterplatte übernimmt das photomechanische Verfahren.

5.1.2. Fotomechanisches Negativverfahren

Vom Hersteller der dafür erforderlichen Chemikalien werden ausführliche Verarbeitungs-Informationen geliefert [3]. Für das photomechanische Verfahren eignen sich neben den selbsthergestellten auch in der Literatur veröffentlichte Kopiervorlagen. Der Maßstab der Druckvorlage spielt dabei zunächst keine Rolle, weil die Reproduktion mit einer Kleinbildkamera erfolgt. Für die anschließende Vergrößerung müssen die angegebenen Abmessungen berücksichtigt werden, um zum Originalmaßstab zu gelangen.

Zur Reproduktion wird der Mikro-Aufnahmefilm MA 8 eingesetzt. Bei richtiger Belichtung, die zu erproben ist, sind Rasterlinien nicht mehr sichtbar. Von dem Negativ wird ein Papierpositiv (extrahart) im Maßstab 1:1 hergestellt. Dabei ist es ratsam, mehrere Kopien mit einer Abweichung von bis zu $\pm 2\%$ zu fertigen. Das Papier quillt beim Entwickeln und schrumpft beim Trocknen. Das maßhaltige Bild wird weiterverarbeitet. Auf das Bild wird Planfilm FU 5 (Schicht auf Schicht) gelegt und kontaktiert. Auf engen Kontakt ist unbedingt zu achten, damit keine Unschärfen an den Leiterkonturen entstehen.

Das so entstandene Negativ ist die Vorlage zum Aufbringen des Leiterbildes auf das Basismaterial. Im Gegenlicht oder auf dem Lichtkasten muß noch überprüft werden, ob alle schwarzen Stellen auch wirklich lichtdicht sind. Gegebenenfalls wird mit Retuschierfarbe abgedeckt.

Von dieser Kopiervorlage können nunmehr beliebig viele Leiterplatten gleicher Güte hergestellt werden. Das Basismaterial wird ringsherum um etwa 1 cm größer gehalten, als die Leiterplatte werden soll. Das Prinzip des fotomechanischen Negativverfahrens zeigt Bild 5.1. Es wird wie folgt vorgegangen:

1. Lackschicht mit ORWO-FK 1 aufbringen
2. Kopiervorlage auflegen und mit UV-Lampe belichten
3. Entwickeln der Lackschicht mit ORWO-L 101
4. Ätzen der Platine mit handelsüblichen Chemikalien
5. Entschichten der geätzten Platine mit ORWO-L 131 oder durch Abschleifen.

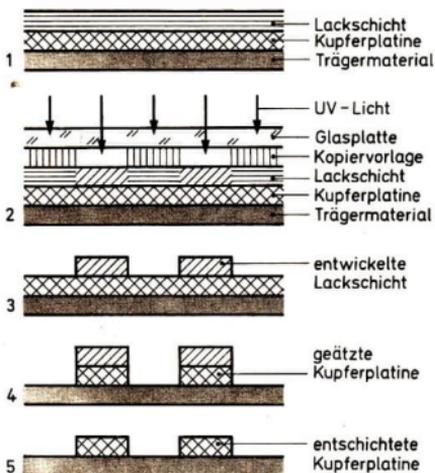


Bild 5.1
Fotomechanisches Negativverfahren

Arbeitsschutz: Die Chemikalien enthalten organische Lösungsmittel. In Räumen, in denen damit gearbeitet wird, ist für ausreichende Belüftung zu sorgen. Längerer Hautkontakt mit den Chemikalien ist zu vermeiden. Beim Umgang mit dem Entschichter ORWO-L 131 ist das Tragen einer Schutzbrille verbindlich. Insbesondere sind Arbeitsschutzbestimmungen für den Bereich Volksbildung zu berücksichtigen. In Gruppen darf ohne Aufsicht durch ausgebildete Personen nicht gearbeitet werden.

5.2. Hinweise zur Montage elektronischer Bauelemente

Elektronische Bauelemente sind aufgrund ihrer geringen geometrischen Abmessungen und den eingesetzten Gehäusewerkstoffen (Glas, Keramik, Plast) gegen mechanische Beanspruchungen empfindlich. Das muß im Interesse einer hohen Betriebssicherheit berücksichtigt werden. Ausführlichere Hinweise findet man in [1]. Es kommt darauf an, die mechanische Belastung am Bauelement selbst und an der Leiterbahn zu vermeiden. Deshalb ist folgendes zu beachten (Bild 5.2a):

- Anschlußdrähte vorerst möglichst lang lassen
- zum Abbiegen den Anschlußdraht mit einer Zange halten; muß kurz abgewinkelt werden, ist eine entsprechend schmale Flach- oder Rundzange zu verwenden
- nicht scharfkantig und nur einmal so biegen, daß die Beschriftung nach dem Einsetzen lesbar ist und keine mechanischen Belastungen bleiben
- der Mindestabstand der ersten Abbiegung beträgt 1,5 mm, bei Glasdurchführungen (GA 100; SZX 18 usw.) und bei plastverkappten Typen 3 mm
- nach dem Biegen sind Anschlußdrähte so zu kürzen, daß sie nach dem Montieren 1,5 mm hindurchragen.
- größere Bauelemente (z. B. Kondensatoren) sind so vorzubereiten, daß die Leiterbahn zug- und druckentlastet wird, es kommt sonst leicht zu Leiterbahnabhebungen
- bei kleinen Bauelementen ist die Entlastung gewährleistet, wenn sie aufliegend montiert werden.

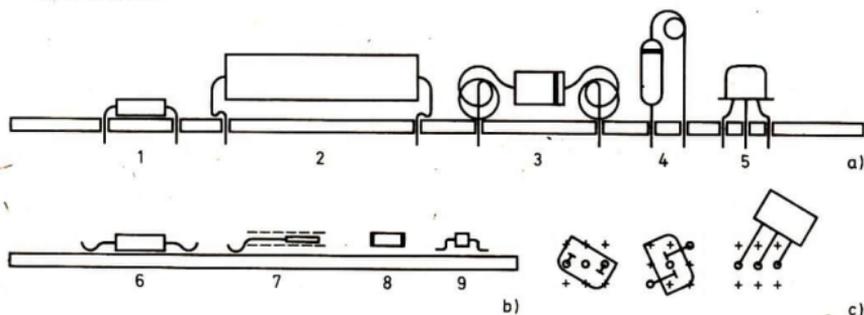


Bild 5.2 Richtiges Vorbereiten und Montieren ausgewählter elektronischer Bauelemente

- Bestückung auf der Montageseite
- Bestückung auf der Leiterseite
- Abwinkeln von Miniplasttransistoren

Bild 5.2b (Ziffern 6 und 7) zeigt die Vorbereitung kleiner Bauelemente, wenn sie auf der Leiterseite montiert werden müssen, während SMD-Bauelemente (siehe Abschnitt 5.9.) nach Ziffer 8 bzw. 9 keiner Vorbereitung bedürfen. Für sie muß die Leiterseite entsprechend gestaltet sein.

Im Bild 5.2c werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, wie Miniplasttransistoren vorbereitet werden müssen. Die Anschlüsse haben ein geteiltes Rastermaß (1,25 mm) und dürfen axial nicht gedreht werden. Sie können daher zur Montage nur so oder ähnlich abgewinkelt werden, damit sie zum normalen Rastermaß (2,5 mm) passen.

5.3. Hinweise zur Technologie des Weichlötens

Das *Weichlötens* ist ein Verfahren, bei dem zwei meist aus Kupfer bestehende Teile durch eine geschmolzene Zinn-Blei-Legierung metallisch fest verbunden werden. Bei technisch einwandfreier Anwendung ist der Übergangswiderstand sehr klein, die mechanische Stabilität gewährleistet, die Korrosions- und Alterungsanfälligkeit gering. Aggressive *Flußmittel* wie Lötfett und Lötinktur verschlechtern diese Eigenschaften erheblich und führen im Laufe der Zeit zu Funktionsstörungen. In der Elektronik müssen die Flußmittel unschädlich und leicht entfernbar sein. Im Amateurbereich wird für Lötarbeiten von Hand Kolophonium eingesetzt (fest oder in Spiritus gelöst).

Die LötKolben für 220 V müssen einen Schutzleiter haben (Schutzklasse I ohne Kennzeichnung) oder mit einer Schutzisolierung (Schutzklasse II mit dem Kennzeichen \square) versehen sein. LötKolben für Schutzkleinspannungen von 6 V bis 24 V müssen erdfrei über einen Schutztransformator der Schutzklasse II betrieben werden. Sie gehören zur Schutzklasse III mit dem Kennzeichen \diamond . Die Schutzgüte muß jedes halbe Jahr von einer autorisierten Werkstatt überprüft und verbindlich gekennzeichnet werden.

Für Löttaugen bis zu 2 mm Durchmesser sind LötKolben mit einer Leistung bis zu 30 W angemessen. Müssen größere Kupferflächen oder dickere Anschlußdrähte gelötet werden, wird kleineren LötKolbenspitzen zu viel Wärme entzogen. Dann müssen entsprechend größere LötKolben eingesetzt werden, um die erforderliche Fließtemperatur des Lotes zu erreichen.

Im Laufe der Zeit verزندert der Lötensatz einschließlich der Lötspitze. Der Einsatz muß herausgenommen, von Zunder befreit und die Lötspitze mit einer Feile bearbeitet werden, bis alle Narben verschwunden und eine metallisch blanke Oberfläche hergestellt ist. Unmittelbar danach wird beim Erwärmen des LötKolbens sofort Flußmittel zugegeben und mit Lot gerieben, damit die Oberfläche nicht oxidieren kann. Eine bereits zu heiße Lötspitze nimmt kein Lot mehr an. LötKolbeneinsätze mit veredelter Oberfläche (auch als Dauerlötspitze bezeichnet) dürfen mechanisch nicht bearbeitet werden, weil sonst die Schutzschicht zerstört wird. Derartige Lötspitzen sind für Arbeiten auf Leiterplatten besser geeignet. Die Lötspitze wird vor dem Lötvorgang auf einem feuchten Viskoseschwamm, der sich in einer flachen Blechschale befindet, abgezogen. Dabei wird verkohltes Kolophonium entfernt und die Spitze etwas abgekühlt. Die in festes Kolophonium gedrückte Spitze benetzt sich. Noch flüssig wird es wie mit einer Pipette übertragen, wenn die Spitze am Bauelementenanschluß kurz über oder gleichzeitig am Lötauge ange-setzt wird. Nach dem Erwärmen wird Lot hinzugegeben. Es umschließt den Bauelementenanschluß allseitig und treibt das Flußmittel vor sich her, bis das Lötauge bedeckt ist. Die LötKolbenspitze wird am Bauelementenanschluß nach oben weggezogen. Auf diese Weise können eng benachbarte Anschlüsse ohne Brückenbildung einwandfrei gelötet werden. Das Flußmittel beseitigt störende Schichten durch Reduktion, benetzt die Metalloberfläche und schützt vor Oxydation, verringert die Oberflächenspannung des Lotes (macht es fließfähiger) und ermöglicht so die gute metallische Verbindung.

Als *Lot* eignet sich Fadenlot (Löt draht) mit Kolophonium als Flußmittelseele am besten. Die Lotarten sind standardisiert. LSn 40 ist im Handel am häufigsten anzutreffen. LSn 60 hat den niedrigsten Schmelzpunkt bei 183 °C. LSn Cu 1,5 ist ein Kupferschutzlot (1,5% Cu-Anteil). Es verhindert Auflösungserscheinungen an der Lötspitze.

Brückenbildungen und Leiterbahnabhebungen sind oft die Folge von Mangel an Flußmit-

tel oder von oxidierten Oberflächen der Kontaktwerkstoffe. Deshalb sollten Leiterplatten schon vor der ersten Bearbeitung gründlich gereinigt, erforderlichenfalls mit sehr feinem Naßschleifpapier oder Scheuerpulver bearbeitet werden. Das Reinigen gilt auch für Anschlüsse von Bauelementen, die sehr lange gelagert wurden oder einer Wiederverwendung zugeführt werden. Frisch verzinnzte Anschlüsse geben Sicherheit beim Löten und ersparen Ärger. Gibt es dennoch Probleme, weil die Lötung nach 3 bis 5 Sekunden nicht ordentlich ausgeführt werden kann, muß der Vorgang abgebrochen und die Ursache beseitigt werden. Ursachen sind z. B. ungenügende Erwärmung und Bewegen der zu verbindenden Teile beim Erstarren. Der Ungeübte beendet den Lötvorgang oft schon dann, wenn das Lot zu fließen beginnt. Dann haben aber die zu verbindenden Teile noch nicht die gleiche Temperatur.

Zum Verzinnen von Anschlußdrähten und Kabelenden eignet sich das „Minilötbad“, das als Lötkolbeneinsatz im Handel angeboten wird. Die vorbereiteten Enden werden in flüssiges Kolophonium und danach so weit in das Lötbad getaucht, wie verzinnt werden soll. Anschließendes Abkühlen in Wasser verhindert den Wärmeübergang auf die Isolierung.

Muß entlotet werden, leistet eine sehr feindrätige Kupferlitze bzw. Abschirmungshülle gute Dienste. Sie wird auf die betreffende Stelle gelegt und mit dem lotfreien LötKolben erwärmt. Durch Kapillarwirkung saugt die Litze geschmolzenes Lot auf.

Zum Auslöten von integrierten Schaltkreisen (IS) hat sich der als LötKolbeneinsatz im Handel erhältliche „IS-Auslöter“ bewährt. Sein Einsatz ist bei Einebenenleiterplatten problemlos. Dazu spannt man sich die Leiterplatte senkrecht ein. Die eine Hand hält mit einer Pinzette mit umgebogenen Spitzen den IS. Die Aufmerksamkeit richtet sich aber auf die andere Hand, die den IS-Auslöter richtig ansetzen muß. Alle Anschlüsse erwärmen sich gleichzeitig. Die IS läßt sich leicht ziehen. (Achtung, Leiterplatte nicht überhitzen!)

Für einreihige Bauelemente arbeitet man einen größeren gebogenen Löteinsatz vom Bogen an zu einer messerähnlichen Schneide aus, die ganz verzinnt wird. Durch Schrägansetzen lassen sich in Reihe liegende Anschlüsse leicht auslöten (z. B. Hybrid-Schaltkreise, Mehrfachdioden).

Bei der Oberflächenmontage sind die beiden zu verbindenden Teile vorher zu beloten, mindestens jedoch die Leiterbahnstellen. Beim Erwärmen mit und ohne Lotzugabe schließt das Lot den Bauelementenanschluß schnell ein (Rückfluß- oder Aufschmelzlöten). Diese Bauelemente dürfen aber wegen der Gefahr der Leiterbahnabhebung nachträglich nicht mehr gerichtet werden.

Zu allen hier genannten Techniken mit Amateurmitteln gehört natürlich auch eine gewisse praktische Erfahrung, die man sich beim Löten an ausgesonderten Geräteteilen recht gut aneignen kann. Weitere Hinweise können [1] entnommen werden.

5.4. Schichtwiderstände

5.4.1. Feste Schichtwiderstände

Das Leitermaterial für Widerstände besteht aus metallischen Drähten unterschiedlicher Legierungen für Widerstände größerer Leistungen ($P > 2 \text{ W}$). Für kleinere Leistungen werden auf stabförmigen keramischen Körpern Metall- oder Kohleschichten aufgebracht.

Durch gewendeltes Ausschleifen der Schicht entstehen unterschiedlich lange Streifen auf dem Trägermaterial. Die Enden werden durch Kappen mit Anschlußdrähten leitend verbunden (Bild 5.3).

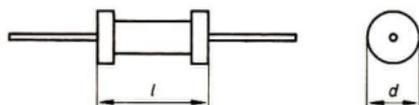


Bild 5.3
Widerstände in bekappter Ausführung

Die Stufung der Nennwerte (siehe Tafel 2) ist so gewählt, daß alle bei der Produktion anfallenden Bauelemente nach Nennwert, Toleranz und Temperaturkoeffizient eingeordnet werden können. Diese Verfahrensweise ist aus ökonomischen Gründen unerlässlich. In vielen Anwendungsfällen erfüllen Bauelemente der Reihen E 6 und E 12 die Anforderungen in der Amateurelektronik. Werden geringere Toleranzen gefordert (z. B. in Schaltungen für meßtechnische Zwecke), können die erforderlichen Widerstandswerte durch Ausmessen gefunden werden. Dabei muß der Meßfehler des verwendeten Meßgerätes berücksichtigt werden. Die Stufung ist jeweils so gewählt, daß sich benachbarte Nennwerte in der Toleranz berühren. Im Toleranzbereich liegt der genaue Widerstandswert.

■ 2 Widerstände der Reihe E 6, Toleranz 20%

$$1 \text{ k}\Omega \triangleq (1 \pm 0,2) \text{ k}\Omega \triangleq 0,8 \dots 1,2 \text{ k}\Omega$$

$$1,5 \text{ k}\Omega \triangleq (1,5 \pm 0,3) \text{ k}\Omega \triangleq 1,2 \dots 1,8 \text{ k}\Omega$$

Die Reihenbezeichnung gibt an, wieviel Stufen im Bereich von 1 bis 10 untergebracht sind. Die jeweiligen Stufungszahlen werden mit ganzen Potenzen von 10 multipliziert (siehe Tafel 2). Dadurch ergibt sich immer ein Zahlenwert zur Einheit Ohm.

Über die schon genannte Einteilung hinaus werden Widerstände nach einsatzspezifischen Anforderungen in Baureihen und hinsichtlich ihrer Nennlast (P_N in W) nach Nenngrößen untergliedert. Für die Arbeit im Amateurbereich sind vorwiegend zwei Baureihen von Interesse, die nachfolgend vorgestellt werden.

Schichtwiderstände der Baureihe 25 sind Kohleschichtwiderstände für die Konsumgüterindustrie und den allgemeinen Gebrauch in der Elektronik. Sie eignen sich für Schaltungen, in denen es nicht auf eine hohe zeitliche Konstanz des Nennwiderstandes ankommt, und Toleranzen sowie Temperaturkoeffizienten keinen wesentlichen Einfluß auf die Schaltung ausüben (Farbe: graubeige bzw. grün).

Nenngröße	P_N in W	U_{grenz}	d	l	Minimal zulässiges Rastermaß in mm
	bei 40°C	in V			
25.207	0,25	250	2,4	7,3	10
25.311	0,33	250	2,5	11,1	15
25.412	0,66	350	4,4	11,9	17,5
25.518	1,0	500	5,1	17,9	22,5
25.732	1,5	750	7,2	31,9	37,5
25.948	2,5	750	9,4	47,8	52,5

Schichtwiderstände der Baureihe 23 sind Metallschichtwiderstände, die sich für Schaltungen eignen, bei denen es auf eine hohe zeitliche Konstanz des Nennwiderstandes, auf gute Klimafestigkeit und die Verwendbarkeit bei höheren Umgebungstemperaturen ankommt. In meßtechnischen Schaltungen sollten sie nicht bei voller Verlustleistung betrieben werden.

Kennzeichnung: blauer Farbring vor der Beschriftung

Nenngröße	P_N in W bei 70°C	U_{grenz} in V	d in mm	l in mm	Minimal zulässiges Rastermaß in mm
23.207	0,3	150	2,45	7,0	10
23.309	0,35	250	3,5	9,3	12,5
23.412	0,5	350	4,4	11,7	15
23.617	0,8	500	5,3	16,6	20
23.922	1,4	750	9,1	21,7	25

Die in den obigen Übersichten enthaltenen Daten sind wichtig für den Entwurf von Schaltungen auf Leiterplatten. Neben dem minimal zulässigen Rastermaß muß auch die Fläche berücksichtigt werden, die der Widerstand auf der Leiterplatte einnimmt ($A = d \cdot l$).

■ **Nenngrößenbildung:** Widerstand der Nenngröße 23.412

Die Nenngröße ergibt sich aus $d = 4,4$ mm und $l = 11,7$ mm, einzeln gerundet zu 4 bzw. 12 und zusammengesetzt 412. Die Baureihen 23 und 25 sind Bauelemente in bekappter Ausführung (Bild 5.3).

Innerhalb einer Nenngröße werden die Widerstände nochmals untergliedert. Dafür soll ein Beispiel stehen. Es zeigt, mit welchen Temperaturkoeffizienten TK und Toleranzen einzelne Widerstandswerte lieferbar sind. Der Amateur, der zumeist auf vorhandene Widerstände zurückgreifen muß, hat dennoch die Möglichkeit, aus dem Aufdruck und den geometrischen Abmessungen abzuschätzen, ob das vorhandene Bauelement den geforderten Eigenschaften entspricht oder nicht.

Widerstände der Nenngröße 23.207

Nennwiderstände in Ω		Temperaturkoeffizient TK in $\pm TK \cdot 10^{-6} K^{-1}$			Nennwiderstands- toleranz in $\pm\%$	
von	bis				von	bis
0,68	< 1	50	100	200	5	10
1	< 3,21	50	100	200	2	10
3,21	< 10	50	100	200	1	10
10	< 24,9	50	100	200	0,5	10
24,9	< 100 k	15	25		0,5	10
		50	100	200		
100 k	< 562 k	50	100	200	0,5	10
562 k	5,11 M			200	1	10

Im Betriebszustand jeder elektronischen Schaltung wird sowohl durch die Widerstände selbst als auch durch andere Bauelemente elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Dadurch erhöht sich die Umgebungstemperatur an den Widerständen. Je nach den eingesetzten Widerstandsmaterialien (Metall, Glanzkohle, Graphit) ändert sich dabei die elektrische Leitfähigkeit und damit auch der Widerstand, der herstellerseitig für eine Temperatur von 23°C gilt.

Deshalb wird der Temperaturkoeffizient (TK) als Maß für die Widerstandsänderung $\Delta R_N = \pm |TK| \cdot \Delta\theta \cdot R_N$ angegeben.

Beispiele zur temperaturabhängigen Änderung des Nennwiderstandes

Baureihe	Nennwiderstand R_N bei 23°C in k Ω	Temperaturänderung $\Delta\theta$ in grd	Temperaturkoeffizient TK in 10^{-6} K^{-1}	Widerstandsänderung ΔR_N in Ω
23	100	27	± 15	$\pm 40,5$
23	100	27	± 200	± 540
25	100	27	+ 200	+ 540
			-1000	-2700
25	100	27	+ 200	+ 540
			-3000	-8100

Überall da, wo Widerstände in meßtechnisch wichtigen Schaltungszweigen liegen, können nur Metallschichtwiderstände mit niedrigem TK sinnvoll eingesetzt werden. Der TK wird auf dem Bauelement immer verschlüsselt angegeben.

Schlüsselzeichen für Temperaturkoeffizienten

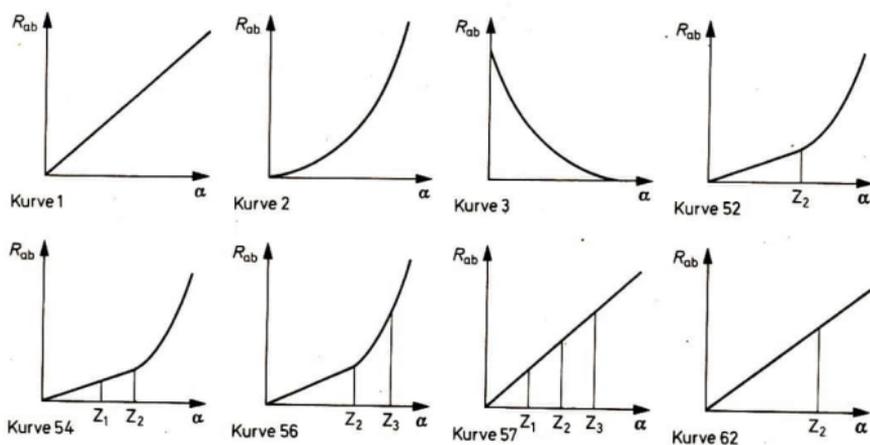
TK in 10^{-6} K^{-1}	Schlüsselzeichen	Farbring oder Farbpunkt (an 5. Stelle)
± 10		weiß
± 15	---	orange
± 25	----	gelb
± 50		rot
± 100		braun
± 200		schwarz

- Widerstand 2,2 k Ω , 2%, 1987, TK 50:
Stempelaufdruck: 2k2 G V | |
Farbringe: rot-rot-rot-rot-rot

5.4.2. Veränderbare Schichtwiderstände

Veränderbare Schichtwiderstände können innerhalb ihres Gesamtwiderstandes auf jeden beliebigen Wert geändert werden. Der Widerstandswert wird durch Drehen des Schleifers b eingestellt. Dabei gleitet der Schleifer auf einer kreisförmigen Widerstandsbahn zwischen dem Anfangs- und Endanschluß a bzw. c. Der Drehbereich beträgt 240° bis 300°. Für eine besonders feinfühligke Einstellmöglichkeit gibt es Typen, die den Schleifer überdrehsicher über einen Spindelantrieb mit 18 Umdrehungen von Anfangs- bis Endstellung bewegen. Darüber hinaus sind auch Bauformen als Schiebewiderstand üblich, bei denen sich der Schleifer auf einer geradlinigen Widerstandsbahn bewegt.

Die Stufung erfolgt nach der Reihe E 3, in der es nur die Stufenwerte 1,0 – 2,2 – 4,7 gibt. Gebräuchlich sind Nennwerte von 100 Ω bis 4,7 MΩ. Die Nennwerttoleranzen betragen meist 10% bzw. 20%. Der Zusammenhang zwischen Gesamtwiderstand R_{ab} und Drehwinkel α ist in Bild 5.4 dargestellt. Der Parameter ist der zugehörige Teilwiderstand. Am häu-



Anschlußbezeichnungen	Nennwiderstandsstufungen			
A oder a – Anfangslötfläche	Zahlenwerte nach Reihe E 3			
S oder b – Schleiferlötfläche	Zahlenwert	Einheit		
E oder c – Endlötfläche	100	220	470	Ω
Z – Anzapflötfläche	1	2,2	4,7	kΩ
⊥ – Erdlötfläche	10	22	47	kΩ
	100	220	470	MΩ
	1	2,2	4,7	MΩ
	Nennverlustleistung:			
	typabhängig 50...200 mW			

Bild 5.4 Veränderbare Schichtwiderstände; Kurvenformen, Anschlußbezeichnungen und Nennwiderstandsstufungen

figsten eingesetzt sind Bauelemente mit den Kurven 1 bis 3. Die übrigen Kurven beziehen sich auf speziellere Einsatzfälle.

Die Kennzeichnung veränderbarer Widerstände erfolgt unverschlüsselt oder nach dem Zahlen-Buchstaben-Kode (siehe Tafel 3).

- 2,2 k 1 oder 2k21 4,7 k 2 oder 4k72
4,7 M 57 oder 4M757 100 k 3

Die Kurvenform steht hinter dem Widerstandswert.

Einstellbare Widerstände (Einstellregler) werden in Schaltungszweigen eingesetzt, in denen durch exemplarbedingte Toleranzen anderer Bauelemente ein bestimmter Widerstandswert nur in Grenzen festgelegt werden kann, der bei Inbetriebnahme der Schaltung auf den Sollwert eingestellt wird.

Verstellbare Widerstände besitzen generell einen Wellenanschluß zur Bedienung von außen (z. B. Lautstärkeregler). Die Wellen (\varnothing 4 mm bzw. 6 mm) können in mehreren Längen und unterschiedlichen Formen am Wellenende geliefert werden. Schichtdrehwiderstände sind zur Zentralbefestigung mit einer Gewindebuchse versehen. Die Anschlüsse sind als Lötösen für Freiverdrahtung oder als Stifte für gedruckte Schaltungen ausgebildet. Letztere sind zusätzlich noch mit einem Montagebügel zur Befestigung auf der Leiterplatte versehen. Darüber hinaus werden einzelne Typen auch mit Zug- oder Drehschalter gefertigt. Mit der Baureihe 250 (\varnothing 12,4 mm) ist auch bei diesen Bauelementen eine weitere Miniaturisierung eingetreten. In der Bauform davon abweichend sind die sogenannten Knopfregler (z. B. für Kleinstempfänger) mit gerändeltem Stellrad.

Wendepotentiometer sind Präzisionsbauelemente, die den Schleifer mit 10 Umdrehungen von Anfangs- bis Endanschluß bewegen. Sie können zusätzlich mit Merkskala und Feststellvorrichtung komplettiert werden.

Tandempotentiometer sind zwei hintereinander angeordnete verstellbare Schichtwiderstände mit einer gemeinsamen Welle.

Doppelpotentiometer sind wie Tandempotentiometer angeordnet. Mit einer Hohlwelle und einer darin geführten zweiten Welle können die Widerstände unabhängig voneinander verändert werden (z. B. bei älteren Fernsehgeräten).

5.5. Kondensatoren

5.5.1. Feste Kondensatoren

Ungepolte Festkondensatoren sind Wickelkondensatoren, die hauptsächlich nach der Art des Dielektrikums bezeichnet werden, weil davon wesentliche Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten abhängen. Wickelkondensatoren ist gemeinsam, daß die beiden Metallfolien, zwischen denen sich ein biegsames Dielektrikum (Papier, Polyester, Polystyrol, Polycarbonat) befindet, zu einem Wickel geformt sind und in einer Hülse (Kunststoff, Keramik, Aluminium) untergebracht werden. Typabhängig sind die Anschlüsse unterschiedlich herausgeführt. Die Stirnseiten sind mit Isoliermasse vergossen (siehe Tafel 4).

Gepolte Festkondensatoren sind Elektrolyt-Kondensatoren. Diese Bauelemente haben nur eine Metallelektrode aus Aluminium. Die Gegenelektrode ist ein Elektrolyt in flüssiger

oder eingedickter Form, der mit der Aluminiumhülle in Kontakt ist. Das Dielektrikum bildet eine sehr dünne isolierende Oxidschicht auf der Al-Elektrode. Dadurch können große Kapazitäten bei relativ kleinem Volumen hergestellt werden. Ein Nachteil besteht darin, daß die Durchschlagfestigkeit der Oxidschicht gegen Überspannungen empfindlich ist. Die Al-Elektrode muß immer am Pluspol der Spannungsquelle liegen, damit die Oxidschicht erhalten bleibt. Bei Falschpolung wird der Elektrolyt zersetzt und die Oxidschicht abgetragen. Das äußert sich sehr schnell durch großen Stromfluß und Erwärmung bis zur Explosionsgefahr. Für überlagerte Wechselspannungsanteile sind Elektrolyt-Kondensatoren nur dann einsetzbar, wenn die Gleichspannung so groß ist, daß keine negativen Spannungswerte auftreten.

Tantal-Elektrolyt-Kondensatoren sind prinzipiell genauso aufgebaut wie Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren. Die Oxidschicht der aus Tantal (Ta) bestehenden Anode (Drahtspirale, dünn gewalzte Tantalfolie oder mit Tantal gesinterter Festkörper) hat gegenüber der aus Aluminium eine um 50% größere Dielektrizitätskonstante. Daraus resultieren wesentliche Vorteile. Sie bestehen vor allem in geringem Platzbedarf, großer Konstanz der Kapazität, unbedeutenden Änderungen durch Alterung und Betriebstemperatur, geringen Restströmen, hoher Güte und Spannungsfestigkeit. In der DDR werden Ta-Kondensatoren mit Sinterkörperanode und festem Elektrolyten in zylindrischen Metallhülsen mit axialen Anschlüssen und Kapazitäten von 1 μF bis 10 μF für Nennspannungen bis 30 V hergestellt. Beim Löten sind sie wie Halbleiterbauelemente zu behandeln.

Keramische Festkondensatoren haben als Gemeinsamkeit eine Oxidkeramik als Dielektrikum. Die kapazitätsbestimmenden Elektroden bestehen aus beiderseits aufgedampften Metallschichten, die mit Anschlußdrähten und Schutzlackierung versehen sind. Keramische Kondensatoren werden nach den elektrischen Eigenschaften ihres Dielektrikums in 2 Hauptgruppen unterteilt:

Typ I: NDK-Kondensatoren (niedrige Dielektrizitätskonstante $E = 13 \dots 130$; Kapazitätsangabe C in pf)

Wesentliche Eigenschaften: Annähernd lineare Temperaturabhängigkeit, hoher Isolationswiderstand, hohe Kapazitätsstabilität, geringe Verluste auch bei hohen Frequenzen, enge Kapazitätstoleranzen, Spannungsabhängigkeit der Kapazität

Typ II: HDK-Kondensatoren (hohe Dielektrizitätskonstante $E = 2000 \dots 10000$; Kapazitätsangabe C in nF).

Wesentliche Eigenschaften: große Kapazitätswerte bei kleinen Abmessungen, nichtlineare Abhängigkeit der Kapazität von Temperatur und Spannung, hoher Isolationswiderstand, größere Verluste und geringere Kapazitätsstabilität als Typ I.

Die Herstellung beider Typen erfolgt in runder bzw. eckiger Scheibenform (mit Anschlußdrähten) in den Abmessungen von 6...13,5 mm und Stufungen nach Reihe E 6 und E 12.

Keramische Vielschicht-Chipkondensatoren besitzen aufgrund ihrer Konstruktion ein großes spezifisches Kapazitäts-Volumen-Produkt und hohe Zuverlässigkeitswerte. Durch ihre spezielle Ausführung mit Anschlußmetallisierung (ohne Anschlußdrähte) und wegen ihrer geringen Abmessungen sind sie als oberflächenmontierbare Bauelemente (auf der Leiterseite) einsetzbar.

5.5.2. Veränderbare Kondensatoren

Einstellbare Kondensatoren werden als Miniatur-Scheibentrimmer in Keramikausführung zum Abstimmen an Schwingkreisen und Schwingquarzen eingesetzt. Der Aufdruck (z. B. 6/30) gibt den Regelbereich in pF an, der mittels Schraubendreher eingestellt wird.

Verstellbare Kondensatoren (Drehkondensatoren) sind zum Verstellen der Kapazität mit Wellenanschluß zur Bedienung von außen ausgeführt. Die gebräuchlichsten Typen haben als Dielektrikum Luft oder Kunststoffscheiben. Das Volumen ist sehr groß im Verhältnis zur Kapazität (30 pF...500 pF). Eine Anordnung von parallelen Platten steht fest (Stator), die andere Anordnung (Rotor) ist drehbar gelagert. Die wirksame Kapazität wird jeweils durch die Größe der sich gegenüberstehenden Plattenflächen bestimmt [5].

5.6. Kennzeichnung von Dioden und Transistoren

Für Widerstände und Kondensatoren besteht international weitgehende Übereinstimmung in der Kennzeichnung der Bauelemente. Bei Halbleiterbauelementen aller Art ist diese Übereinstimmung nicht gegeben. Für Importbauelemente müssen Vergleichslisten zur Identifizierung herangezogen werden. Sehr viele Importbauelemente sind in den elektrischen Daten und Anschlußbelegungen übereinstimmend oder ähnlich, haben aber völlig andere Bezeichnungen.

Entsprechend dem vorgesehenen Verwendungszweck schreibt die Typenliste der DDR für Einkristall-Bauelemente folgende Bezeichnungen vor:

1. Buchstabe

G – Germanium

S – Silicium

2. Buchstabe

A – Diode

C – NF-Transistor

D – NF-Leistungstransistor

E – Tunnelodiode

F – HF-Transistor

M – MOS-Transistor

P – Strahlungsempfindliche
Bauelemente

Q – Strahlungsquelle

R – Halbleiterbauelemente mit
Durchbruchkennlinie

S – Schalttransistor

T – Thyristor

U – Leistungsschalttransistor

X – Verbindungshalbleiter

Y – Halbleiterdiode (bis 10 A)

Z – Referenzdiode

Metallverkappte Halbleiterbauelemente haben einen ungekürzten Aufdruck. Bei plastverkappten Typen reicht der Platz dafür nicht aus. Unzweideutige Symbole werden weggelassen. Bei plastverkappten Dioden fehlen die ersten beiden Buchstaben oder man wendet einen Farbkode an (z. B. bei SAY 12...20). Weitere Symbole sind für den Anwender ohne Bedeutung. (Bild 5.5).

Bei Transistoren mit Plastikgehäuse (Miniplasttypen) entfallen der erste Buchstabe und die erste Ziffer. Bei Feldeffekttransistoren wird nur der erste Buchstabe weggelassen (Bild 5.6).

SAY 30



SAM 42



SAY 12

 Farbkennzeichnung:
orange


SC 206 E



SF 216 D



SCE 238 E



SMY 103



Bild 5.5

Kennzeichnung von Dioden

Bild 5.6

Kennzeichnung von Miniplasttransistoren

Alle bei der Produktion anfallenden funktionsfähigen Transistoren einer Typenreihe werden nach bestimmten Parametern ausgemessen und gekennzeichnet. Für die sich überlappenden Stromverstärkungsgruppen gilt:

Silicium-Transistoren	Germanium-Transistoren
A 18...35	A 18...35
B 28...71	B 28...56
C 56...140	C 45...90
D 112...280	D 71...140
E 224...560	E 112...224
F 450...1120	

Z-Dioden werden zur Begrenzung von Spannungen auf den Z-Wert zwecks Spannungsstabilisierung und zur Erzeugung von Vergleichsspannungen eingesetzt. Neben der Typenbezeichnung ist der Wert der Z-Spannung angegeben.

Daten und Kennzeichnung ausgewählter Z-Dioden

Typ	SZX 18	SZX 19	SZX 21	SZ 600
P_{tot} in mW	250	250	400	1000
Toleranz	10%	5%	5%	5%
U_Z in V nach von...bis	E 12 5,6...22	E 24 5,1...24	E 24 5,1...24	E 24 5,1...22
Beschriftung	schwarz	rot		
Gehäusematerial	Glas	Glas	Plast	Metall
Bauform	1	1	2	3

Aus der Schriftfarbe, der Gehäuseform und dem Gehäusematerial lassen sich die genannten Typen im Zusammenhang mit dem Zahlenwert der Z-Spannung identifizieren. Vor dem Einlöten sollten jedoch die Z-Spannungen unter Betriebsbedingungen bzw. mit $I_Z = 5$ mA gemessen werden.

5.7. Optoelektronische Bauelemente

Lichtemitterdioden (LED) und Lichtemitteranzeigen (LEA) sind Strahlungsquellen (Lichtsender). Sie müssen immer mit einem Vorwiderstand betrieben werden. Alle bei der Produktion anfallenden Bauelemente werden ausgemessen und nach Lichtstärkegruppen in den Grundtyp und die Gruppen B...F sortiert. Die Helligkeit kann durch Variieren des Vorwiderstandes bei Einhaltung der maximal zulässigen Stromstärke I_F eingestellt werden. Die Flußspannung U_F beträgt 1,8...3,0 V in Abhängigkeit von Typ und eingestellter Stromstärke.

Kennzeichnung von LED und LEA

1. Buchstabe: V – Verbindungshalbleiter

2. Buchstabe: Q – Strahlungsquelle

3. Buchstabe: A – Einzeldiode

B – einstellige Anzeige

C – alphanumerische Anzeige

D – hybride Anzeigeeinheit

E – mehrstellige Anzeige

F – Anzeigenzeile

1. Ziffer: Kennzeichnung der Lichtfarbe

1 – rot

2 – grün

3 – gelb

4 – orange

2. und 3. Ziffer: Kennzeichnung der Bauform

5.7.1. Lichtemitterdioden (LED)

Lichtfarbe				$I_{F \max}$ in mA	Bauform
rot	grün	gelb	orange		
VQA 10	–	–	–	50	a
VQA 13–1	–	–	–	50	a
VQA 13 ¹⁾	VQA 23	VQA 33	–	50	a
VQA 14	VQA 24	VQA 34	–	30	b
VQA 15 ¹⁾	VQA 25	VQA 35	VQA 45	30	c
VQA 16	VQA 26	VQA 36	VQA 46	30	a
VQA 17	VQA 27	VQA 37	VQA 47	30	d
VQA 18	VQA 28	VQA 38	–	30	e2
VQA 19	VQA 29	VQA 39	VQA 49	30	f
VQA 101	VQA 201	VQA 301	–	30	e1
VQA 60 ²⁾	VQA 80 ²⁾	VQA 70 ²⁾	–	30	g
rot/grün	grün/gelb	gelb/rot			

1) LED ist weiß ohne Einfärbung

2) Zweifarben-LED ohne Einfärbung

5.7.2. Infrarotemitterdioden (IRED)

Typ	λ_s in nm	$rw^{1)}$ in Grad	$I_{F \max}$ in mA	$P_{\text{tot}}^{2)}$ in mW	Einfärbung	Bauform
VQ 110 B	940	/	50	0,8	rauchfarben rauchfarben	h
VQ 121	940	30	50	5,3		c
VQ 123 B	940	50	100	4		d
VQ 125	940	50	100	14		a

1) rw – Raumwinkel der Farbabstrahlung

2) Strahlleistung bei $I_{F \max}$

5.7.3. Lichtemitteranzeigen (LEA)

Anschlußbelegung ausgewählter Lichtschachtbauelemente

$I_{F \max} = 20 \text{ mA}$; U_F bei $I_{F \max}$: 2,0 ... 2,6 V

Zeichen- höhe	12,7 mm, zweistellig				19,6 mm, einstellig			
	o		p		r ²⁾	s ¹⁾		
Stift- Nr.	VQE 11 VQE 21	VQE 12 VQE 22	VQE 13 VQE 23	VQE 14 VQE 24	VQB 16 VQB 26	VQB 17 VQB 27	VQB 18 VQB 28	
1	nb ³⁾		C1		x	x ⁴⁾		
2	F1		E1		Ak ⁵⁾	A		
3	B1		D1		Da	F		
4	k1	a1	k1 a1		Dk	k a		
5	k2	a2	k2 a2		Ck	E		
6	D2		D2		Bk	k a		
7	E2		E2		Ea	nb		
8	C2		C2		x	x		
9	H2		H2		x	x		
10	G2		G2		Fa	H		
11	A2		A2		Fk	D		
12	F2		F2		Bk	k a		
13	B2		B2		Ba	C		
14	A1		B1		Ca	G		
15	D1		F1		Aa	B		
16	C1		A1		x	x		
17	E1		G1		Ak ⁵⁾	k a		
18	nb		H1		x	x		

1) Alle Anoden- bzw. Katodenanschlüsse sind intern verbunden

2) Anoden- bzw. Katodenanschlüsse jedes Segments sind getrennt herausgeführt

3) nb: nicht belegte Anschlußstelle

4) x: die Anschlußstelle ist ohne Stift

5) Die Katode des Segments A hat zwei intern verbundene Anschlußstellen

Lichtemitteranzeigen haben zumeist die Anoden (a) oder die Katoden (k) als einen gemeinsamen Anschluß für alle Segmente. Abweichungen davon können der vorstehenden Übersicht entnommen werden. Lichtschachtbauelemente haben gegenüber anderen Typen (VQB 71) nur eine Lichtemitterdiode je Segment, die von unten das oben befindliche Segment beleuchtet.

5.7.4. Fotodioden und Fototransistoren

Fotodioden und Fototransistoren (Lichtempfänger) sind optoelektronische Bauelemente, die bei Lichteinfall ihre Halbleitereigenschaften ändern. Der Sperrwiderstand wird kleiner.

Fotodioden

Typ	Grenzdaten					Bauform
	P_{tot} in mW	$U_{R \text{ max}}$ in V	$I_{R \text{ max}}$ $E > 0 \text{ lx}$ in mA	I_{R0} $E = 0 \text{ lx}$ in nA	$\lambda_s^{1)}$ in nm	
SP 101	10	25	1	100	820	i
SP 102	30	25	0,1	4	820	k
SP 103	10	25	3	150	820	i

Fototransistoren

Typ	Grenzdaten		Informationsdaten			Anwendung	Bauform
	P_{tot} in mW	U_{CE} in V	I_C bei in mA	U_{CE} in V	$\Delta_s^{1)}$ in nm		
SP 201	50	32	>0,25	5	780	universell	h
SP 201 D	50	32	7	5	780	universell	h
SP 212	100	50	1,0	5	850	Fototransistor- zellen, siehe ²⁾	c
SP 213	100	50	2	5	850	siehe ²⁾	d
SP 215	100	50	8	5	850	IR-Lichtschran- ken, siehe ²⁾	a

1) Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit

2) Fernsteuerung, Konsumgüterindustrie, Spielwaren und Industrieanwendungen

5.7.5. Optoelektronische Koppler

Optoelektronische Koppler (Optokoppler) vereinigen einen Lichtsender mit einem Lichtempfänger zu einer Kombination, die in einem geschlossenen oder halboffenen Gehäuse untergebracht ist. Sie dienen zur Informationsübertragung mittels Licht zwischen zwei unterschiedlichen Systemen, die auch galvanisch voneinander getrennt sein können.

Grenzwerte ausgewählter optoelektronischer Koppler

Typ	Lichtsender			Lichtempfänger		Bauform
	P_{tot} in mW	I_f in mA	U_R in V	Koppel- element ¹⁾	U_{CE} in V	
MB 104/5C	200	40	6	T	20	l
MB 105/5C	150	60	6	T	35	l
MB 105/6C	150	60	6	T	70	l
MB 110	50	100	3	D	50 (U_R)	l
MB 111	150	30	3	D	siehe ²⁾	m
MB 123 ³⁾	100	50	2	T	15	n

1) Koppellement: Transistor (T) oder Diode (D)

2) Der MB 111 besitzt eine Diode als Koppellement mit nachfolgender integrierter Verstärkerschaltung, ist TTL-kompatibel und realisiert die logische Funktion $Y = \bar{A}$ (positive Logik). Der Kollektor des Ausgangstransistors ist offen.

$$U_s = 5 \text{ V}; I_{\text{qL}} = 16 \text{ mA}$$

3) Der MB 123 ist ein halboffener Gabelkoppler.

5.8. Kennzeichnung von integrierten Schaltkreisen

Die Kennzeichnung erfolgt durch einen Stempelaufdruck. Bei Basteltypen wird der erste Buchstabe durch den in der Klammer stehenden ersetzt. Eine drei- bzw. vierstellige Zahl kennzeichnet den Typ.

Buchstaben vor der Kennzahl	Buchstaben hinter der Kennzahl
(R) A – Analog-Schaltkreis	D – Plastikgehäuse, zweireihig
(R) B – Operationsverstärker	C – Keramikgehäuse, zweireihig
(N) C – Wandler	E – mit Kühlfahne
(P) D – TTL-Standardreihe	K – mit Kühlkörper
(PL) DL – Low-power-Schottky-Reihe	H – horizontaler Einbau
E – TTL-Schaltkreis mit erweitertem Temperaturbereich	V – vertikaler Einbau
(S) U – MOS-Schaltkreis	m – für höhere Anforderungen
() V – CMOS-Schaltkreis	p – für höchste Anforderungen
	t – für den erweiterten Temperaturbereich

5.9. SMD-Bauelemente

SMD-Bauelemente (englisch: **surface mounted devices**) sind auf der Leiterseite montierbare Bauelemente, die mit üblichen Lötverfahren befestigt werden können. Von der Entwicklung her sind sie hauptsächlich für den Einsatz in verkappten Hybridschaltkreisen

vorgesehen, die bislang mit herkömmlichen diskreten Bauelementen bestückt wurden. Transistoren der Bauform Y sind Typen, die sich von den gleichlautenden Typen ohne „E“ nur dadurch unterscheiden, daß ihre Leistung P_{tot} auf 150 mW herabgesetzt ist (siehe Tafel 7). Es gibt sie in den Stromverstärkungsgruppen C, D und E. Die Gruppe D ist nicht gekennzeichnet.

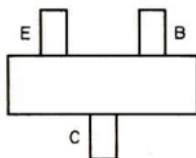
Keramische Vielschicht-Chipkondensatoren haben keine Anschlußdrähte. Die Stirnseiten ihrer Quaderform sind zum Anlöten metallisiert. Entsprechend ihrer Kapazität von 1,2 pF bis 1000 nF werden sie in verschiedenen Nenngrößen nach der internationalen Bauform in den Reihen E 6 und E 12 produziert. Die Nennspannung U_N beträgt 50 V.

Chipwiderstände sind ebenfalls ohne Anschlußdrähte. Das vorläufige Programm sieht die Produktion von Widerständen mit Nennwerten von 10 Ω bis 1 M Ω nach der Reihe E 12 bzw. E 24 für eine Leistung von 0,125 W in der Bauform 815.1 vor.

Bauformen von SMD-Bauelementen

Bauform Y

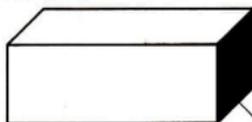
Gehäuseabmessungen in mm (L x B x H)
2,9 x 1,3 x 0,9



Transistor

Bauform 1206

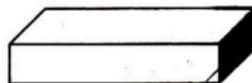
3,2 x 1,6 x 1,2



Kondensator

Bauform 815.1

3,2 x 1,6 x 0,6



metallisierte Stirnflächen

Widerstand

5.10. Tafeln

Tafel 1: Internationaler Farbkode

Farbe	Zahlenwert			Toleranz	TK in 10^{-6} K^{-1}
	1. Ring	2. Ring	3. Ring		
silber	–	–	10^{-2}	$\pm 10\%$	–
gold	–	–	10^{-1}	$\pm 5\%$	–
schwarz	–	0	10^0	–	± 200
braun	1	1	10^1	$\pm 1\%$	± 100
rot	2	2	10^2	$\pm 2\%$	± 50
orange	3	3	10^3	–	± 15
gelb	4	4	10^4	–	± 25
grün	5	5	10^5	$\pm 0,5\%$	± 5
blau	6	6	10^6	$\pm 0,25\%$	–
violett	7	7	10^7	$\pm 0,1\%$	–
grau	8	8	10^8	–	–
weiß	9	9	10^9	–	± 10

Der in Leserichtung 1. Farbring ist deutlich erkennbar näher an dem einen Ende des Widerstandes angebracht. Die ersten 3 Farbringe enthalten den Widerstandswert in Ohm. Der 4. Farbring gibt die Toleranz an. Widerstände mit einer Toleranz von 20% erhalten keinen 4. Farbring. Bei Widerständen, die 5 Farbringe tragen, dient der 5. Farbring zur Angabe des Temperaturkoeffizienten.

- braun/schwarz/braun/silber = 100 Ω – 10%
- gelb/violett/orange/rot = 47 k Ω – 2%
- rot/rot/rot = 2,2 k Ω – 20%
- rot/gelb/braun/braun/braun = 240 Ω – 1% – TK 100

Tafel 2: Stufungstabelle nach den internationalen E-Reihen

E-Reihe	Toleranz	Nennwert						
E 3	$\pm 50\%$	1,0		2,2		4,7		
E 6	$\pm 20\%$	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
E 12	$\pm 10\%$	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
		1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
E 24	$\pm 5\%$	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
		1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	
		1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
		1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	
E 48	$\pm 2\%$	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
(E 96)	$\pm 1\%$	1,05	1,55	2,3	3,45	4,9	7,15	
(E 192)	$\pm 0,5\%$	1,1	1,6	2,4	3,6	5,1	7,5	
		1,15	1,7	2,55	3,75	5,35	7,85	
		1,2	1,8	2,7	3,9	5,6	8,2	
		1,25	1,9	2,85	4,1	5,9	8,6	
		1,3	2,0	3,0	4,3	6,2	9,1	
		1,4	2,1	3,15	4,5	6,5	9,55	

Tafel 3: Zahlen-Buchstaben-Kode

Wird zur Kennzeichnung des Nennwertes ein Stempelaufdruck verwendet, so kommt anstelle des Kommas ein Schlüsselbuchstabe (1: Buchstabe) zur Anwendung, der gleichzeitig Multiplikator zur Einheit Ohm ist. Ein 2. Buchstabe kennzeichnet die Toleranz, der 3. Buchstabe das Herstellungsjahr, und gegebenenfalls folgt der verschlüsselte Temperaturkoeffizient.

1. Buchstabe Multiplikator	2. Buchstabe Toleranz	3. Buchstabe Herstellungsjahr	
R – 10 ⁰ (Ohm)	X – ±0,05%	K – 1978	V – 1987
k – 10 ³ (Kiloohm)	B – ±0,1%	L – 1979	W – 1988
M – 10 ⁶ (Megaohm)	C – ±0,25%	M – 1980	X – 1989
G – 10 ⁹ (Gigaohm)	D – ±0,5%	N – 1981	A – 1990
T – 10 ¹² (Teraohm)	F – ±1%	P – 1982	B – 1991
	G – ±2%	R – 1983	C – 1992
	J – ±5%	S – 1984	D – 1993
	K – ±10%	T – 1985	E – 1994
	ohne – ±20%	U – 1986	F – 1995

- 100RJR = 100 Ω – 5% – 1983 1k6FT = 1,6 kΩ – 1% – 1985
- 4k7KS = 4,7 kΩ – 10% – 1984 4M7U = 4,7 MΩ – 20% – 1986

Tafel 4: Kennzeichnung von Kondensatoren

Die Kennzeichnung der Kapazität erfolgt immer unverschlüsselt, die der Kapazitätstoleranz auch mit dem Buchstabenkode und die der Nennspannung auch mit dem Farb- oder Buchstabenkode.

Kapazitäts- toleranz	Nennspannung	
	Gleichstrom	Wechselstrom
C – ±0,25 pF	a – 50 V	u – 250 V
D – ±0,5 pF	b – 225 V	v – 350 V
F – ±1%	c – 160 V	w – 500 V
C – ±2%	d – 250 V	Gleich- und Wechselstrom
H – ±2,5%	e – 350 V	
J – ±5%	ohne 400 V	blau – 25 V
K – ±10%	f – 500 V	gelb – 63 V
M – ±20%	g – 750 V	rot – 160 V
S – +50%	h – 1000 V	grün – 250 V
–20%	i – 630 V	braun – 400 V
W – +80%	m – 10 V	schwarz – 630 V
–20%	t – 63 V	orange – 1000 V
Z – +100%		
–20%		

Kennzeichnung der Dielektrika

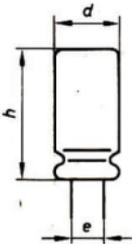
Kennzeichnung	Dielektrikum	Einsatzgebiete
ohne	Papier	Siebung und Kopplung
MP	Papier mit einseitig aufgedampfter Metallschicht (selbstheilend)	Siebung und Kopplung
KC, MKC	Polykarbonatfolie mit einseitig aufgedampfter Metallschicht (selbstheilend)	NF-Schwingkreise, Ladekondensator in Zeitgliedern
KL, MKL MKL1: normal MKL2: dicht MKL3: prismatisch	Speziallackfolie	für allgemeine Anwendungen
KS, MKS	Polystyrolfolie (Farbring auf der Seite des Schirmbelags)	HF-Schwingkreise, Ladekondensator in Zeitgliedern für höhere Ansprüche
KT, MKT (oder „Punkt“)	Polyesterfolie (Einfärbung einer Stirnseite)	Siebung, Kopplung, Meßkondensator
KP, MKP	Polypropylenfolie	

„M“ bezeichnet die Kontaktierung der gesamten Wicklung an den Stirnseiten. Dadurch ist die Eigeninduktivität sehr gering und begünstigt HF-Eigenschaften.

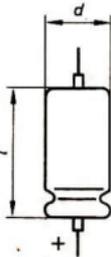
Tafel 5: Miniatur-Elektrolyt-Kondensatoren

Radiales Standardprogramm		Gehäusegröße	Axiales Standardprogramm	
Rastermaß e in mm	Nennmaße $d \times h$ in mm		Nennmaße $d \times l$ in mm	Minimales Rastermaß in mm
2,5	5×11	1	$3,2 \times 10$	15
2,5	6×11	2	4×15	20
3,5	$8 \times 12,5$	3	$6,5 \times 16$	22,5
5	$10 \times 12,5$	4	$6,5 \times 21$	27,5
5	$10 \times 20,5$	5	$8,5 \times 16$	22,5
5	$13 \times 25,5$	6	$8,5 \times 21$	27,5
7,5	$16 \times 25,5$	7	10×26	32,5
7,5	$16 \times 35,5$	8	12×31	37,7
Die Seite des Minuspols ist gekennzeichnet		9	14×36	42,5
		10	16×40	50
		11	18×40	50

Radiales Standardprogramm

Kapazität in μF	Nennleichspannung in V							Bauform
	6,3	10	16	25	40	63	80	
Gehäusegröße								
0,47	-	-	-	-	-	-	1	
1	-	-	-	-	-	-	1	
2,2	-	-	-	-	-	-	1	
4,7	-	-	-	-	-	1	2	
10	-	-	-	-	1	2	3	
22	-	-	-	1	2	3	4	
47	-	1	2	2	3	4	5	
100	-	2	3	3	4	5	6	
220	-	3	4	5	6	6	7	
470	4	5	5	6	6	7	8	
1000	5	6	6	7	8			
2200	6	6	7	8				
4700	-	8						

Axiales Standardprogramm

Kapazität in μF	Nennleichspannung in V							Bauform
	6,3	10	16	25	40	63	80	
Gehäusegröße								
0,47	-	-	-	-	-	-	1	
1	-	-	-	-	1	2	2	
2,2	-	-	-	1	-	2	3	
4,7	-	-	1	-	2	-	3	
10	-	1	-	-	-	-	3	
22	-	2	-	-	3	4	5	
47	2	3	-	3	5	6	7	
100	-	3	3	5	6	7	8	
220	4	5	6	6	7	8	9	
470	6	7	7	7	8	9		
1000	7	8	8	9	11			
2200	8	9	11					
4700	10							

Tafel 6: Grenzwerte ausgewählter Si-Halbleiterdioden

Typ/Farbkennzeichnung	P_{tot} in mW	U_R in V	I_{Fmax} in mA	U_F bei I_F in V	I_F in mA	Bauform
<i>Schaltdioden</i>						
SAY 12/orange	430	50	300	1	200	2
SAY 16/grün	430	30	300	1	200	2
SAY 17/rot	300	50	175	1	100	2
SAY 18/gelb	300	25	115	1	30	2
SAY 20/schwarz	300	15	75	1	10	2
SAY 30	150	15	20	0,81	3	2
SAY 32	150	25	50	1	15	2
SAY 40	150	15	20	0,84	3	2
SAY 42	150	15	30	1	10	2
SA 403/rot	100	25	30	0,8	3	4
SA 412/gelb	100	20	100	1,2	100	4
SA 418/grün	100	80	100	1,2	100	4

Typ	U_R in V	I_{Fmax} in A	U_F in V	Bauform
<i>Gleichrichterioden</i>				
SY 320	70...1000	0,95	1,2	5
SY 351	35...1400	3	1,2	5
SY 360	50...700	0,95	1,2	6
<i>Schnelle Gleichrichterioden</i>				
SY 330	100...1800	0,48...0,1	2,4	6
SY 345	35...700	1,4...1,1	1,2	6
SY 356	50...1000	3...1,5	1,2	5

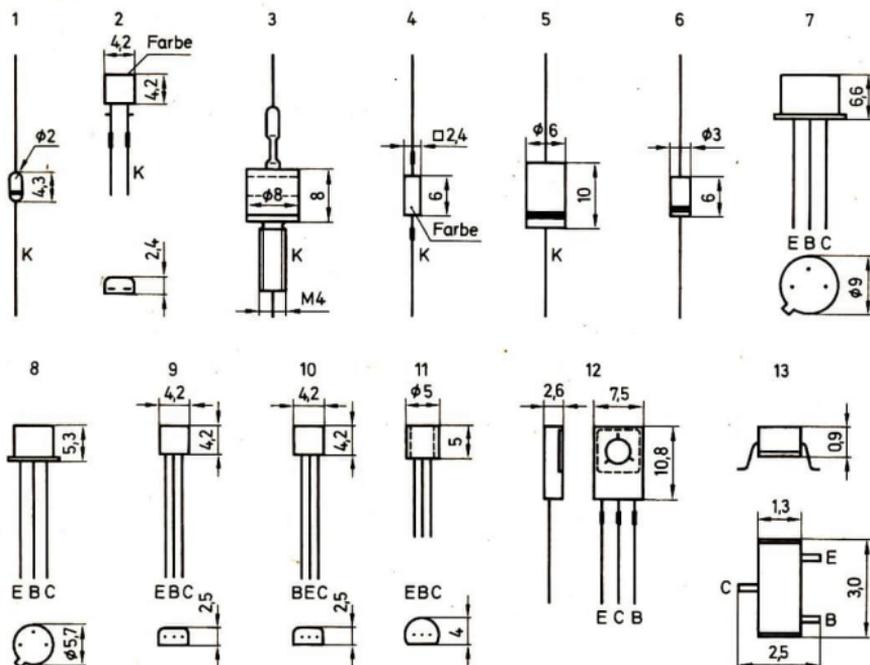
Die Zahl hinter der Typenbezeichnung gibt die Sperrspannung U_R in 10^2 V an, z. B. SY 360/2

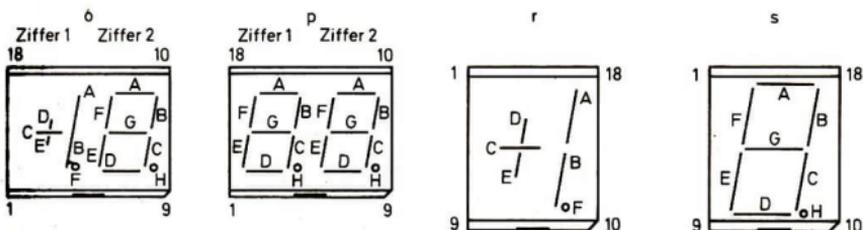
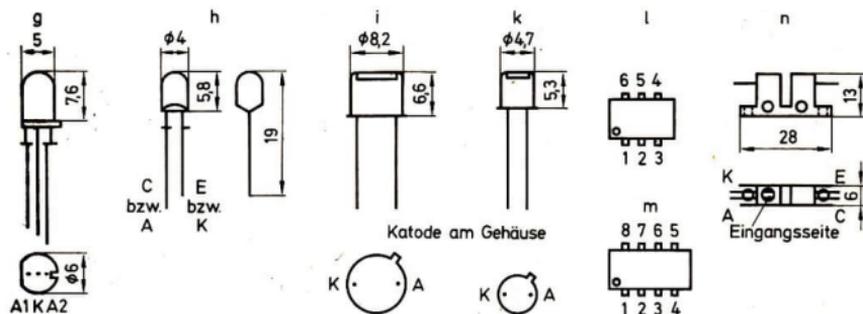
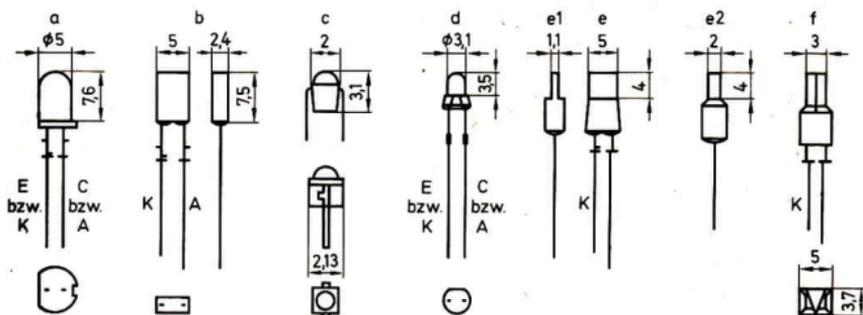
Tafel 7: Grenzwerte ausgewählter Si-Transistoren

Typ	Bezeichnung	P_{tot} in mW	U_{CB0} in V	U_{CE0} in V	I_C in mA	Bauform
SC 116	pnp-NF-Transistor	300	-20	-20	-100	7
SC 238	nnp-NF-Transistor	200	30	20	100	9
SCE 238		150				13
SC 308	pnp-NF-Transistor	250	-30	-25	-100	9
SCE 308		150				13

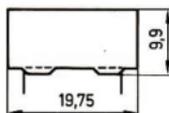
Typ	Bezeichnung	P_{tot} in mW	U_{CB0} in V	U_{CE0} in V	I_C in mA	Bauform
SD 335	nnp-Leistungstr.	12500	45	45	1500	12
SD 336	pnp-Leistungstr.	12500	-45	-45	1500	12
SD 345	nnp-Leistungstr.	20000	45	45	3000	12
SD 346	pnp-Leistungstr.	20000	-45	-45	-3000	12
SF 116	pnp-HF-Transistor	600	-20	-20	-500	7
SF 816		725				11
SF 126	nnp-HF-Transistor	600	33	20	500	7
SF 826		735				11
SF 136	nnp-HF-Transistor	300	20	12	200	8
SF 225	nnp-HF-Transistor	200	40	25	25	10
SFE 225		150				13
SS 106	nnp-Schaltr.	300	25	15	200	8
SS 200	nnp-Schaltr.	150				9
SSE 200		150				13
SS 216	nnp-Schaltr.	200	20	15	100	9
SSE 216		150				13
SSY 20	nnp-Schaltr.	700	60	40	600	7

Tafel 8: Bauformen und Anschlußbelegungen

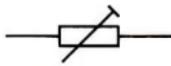
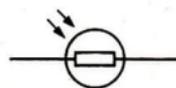
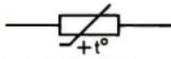
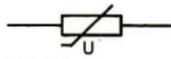
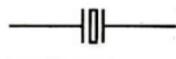
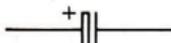
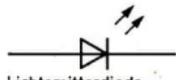
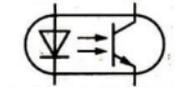
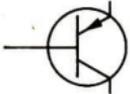
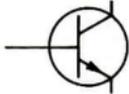
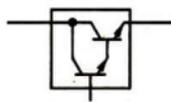
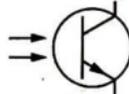
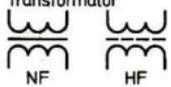
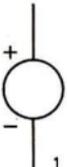
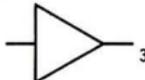




Gehäusemaße in mm: 24,8 x 19,75 x 9,9
 Reihenabstand 15,24 } zugelassen für Rastermaß 2,5
 Stiftabstand 2,54 }



Tafel 9: Schaltzeichen der Elektronik (Auswahl)

Widerstand			
			
allgemein	einstellbar	verstellbar	Fotowiderstand
			
NTC-Widerstand Heißleiter	PTC-Widerstand Kaltleiter	Varistor spannungsabhängig	Schwingquarz
Kondensator			
			
ungepolt	gepolt	einstellbar	verstellbar
Halbleiterdiode			
			
allgemein	Z-Diode	Foto- diode	Lichtemitterdiode
			
Thyristor	Tunnel- diode	Kapazitäts- diode	Optoelektronischer Koppler
Transistor			
			
pnp	npn	npn-Darlington	npn-Fototransistor
Spule			Transformator
			
allgemein	mit Eisenkern NF	mit Ferritkern HF	NF HF
Blockbilder von integrierten Schaltungen			
			
1 Konstantspannungsquelle	2 Konstantstromquelle	3 Verstärker allgemein	5...8 Hauptfelder mit und ohne Nebenfeld
		4 Operationsverstärker	

Register

A

Addition 142
ADU 91
Akustischer Schalter 77
Amplitudenmodulation 109, 113
Analog-Digital-Umsetzer 58, 91f.
AND 48
Anpassungsfall 15
Arbeitspunkt 39
Audionempfänger 116
Ausgangskennlinie 35
Ausgangslastfaktor 139
Außenwiderstandsgerade 39
Aussteuerungsbereich 100
Atombindung 24

B

Bandbreite 107, 114
Basis-Emitter-Spannung 34
Basismaterial 163
Basisstrom 33
Basisstromstärke 34
Bauelement 10
Baugruppe 9
BCD-Kode 133
Befehl 131
Belichtungsmesser 89
Bestückungsplan 163
Binäres System 46, 132
Binärzählkette 154
Bit 132, 154
Bitleitungen 134
Blindwiderstand 22
BUS 132
Byte 133

C

CAD 7
CAM 7
Computer 130

D

Dämmerungsschalter 77
Darlington-Schaltung 83
Daten 131
Datenanzeige 136
Defektelektron 25

Dehnungsmeßwandler 68
Dekodierung 135
Demodulation 109, 115
Detektor 116
Dezimal-Dual-Kodierer 134
Dezimalsystem 132
D-Flip-Flop 150
Differenzverstärker 84
Diffusionsspannung 27
Digitales System 132
Digitaltechnik 44, 130
Diode 26
Dioden-Transistor-Logik 50
Dotierung 26
Drehzahlmessung 81
DTL 50
Dualsystem 133
Dualzahlen 141
Durchlaßrichtung 26, 27
Durchlaßstrom 27

E

Eigenleitung 25
Eingangskennlinie 35
Eingangslastfaktor 139
Einssignal 132
Einweggleichrichtung 29
Emitterfolger 101, 103
Empfangstechnik 115

F

Feldenergie 19
Fernsehempfänger 120
Fernsehübertragung 118
Flip-Flop 54
Flüssigkristallanzeige 129
Fotodiode 30, 66, 126
Fotomechanisches
Negativverfahren 164
Fotorelais 76
Fotostrom 30
Fototransistor 67, 126
Fotowiderstand 25, 65, 126
Frequenzabhängigkeit 106
Frequenzgang 107
Frequenzglied 111
Frequenzmodulation 109, 114
Frequenzsperrung 104
Füllstandsmessung 79
Füllstandsregelung 79

G

Gatter 50
Gatterfunktion 139
Gedruckte Schaltung 163
Gegenkopplung 102f.
Gegentaktverstärker 107
Geradeausempfänger 116
Glättung 29
Gleichrichtung 28
Grenzfrequenz 107
Grundstromkreis 13

H

Halbadder 141
Halbbild 120
Halbleiter 23
Halbleiterdiode 26, 64
Halbleiterwiderstand 23
Halbsubtrahierer 142
Hardware 131
Hysterese 54, 72

I

i^2L 50
Impedanz 97
Impulsfrequenz 56
Impulsgenerator 56, 92, 146
Induktiver Widerstand 22
Induktivität 19
Information 44
Informationsparameter 57
Informationsverarbeitung 44
130
Infrarotdiode 31
Innenwiderstand 14
Integrierte Injektionslogik 50
Integrierter Schaltkreis 9
IRED 31
Isolator 23

J

JK-MS-Flip-Flop 151

K

Kapazität 18
Kapazitiver Widerstand 22
Klemmenspannung 14
Klirrfaktor 104

Kollektor-Emitter-Spannung 34
Kollektorstrom 33
Kollektorstromstärke 34
Kollektor-Verlustleitung 35
Kombinatorische Schaltung 46
Komparator 87
Kondensator 18, 20
Kopfhörer 96
Kopiervorlage 163
Kristallgitter 24
Kurzschlußstromstärke 13

L

Ladekondensator 30
Ladung 18
Lautsprecher 96
LCD 129
LED 31, 124
Leerlaufspannung 13
Leiter 23
Leiterbild 163
Leiterplatte 163
Leiterzüge 163
Lichtemitterdiode 31, 124
Lichtempfänger 123
Lichtleitkabel 121, 123
Lichtsender 123
Loch 25
Logik
–, negative 53
–, positive 53
Logische Funktion 139
Logische Verknüpfung 46
– mit integriertem Schaltkreis 50
– mit Transistor 48
Lumineszenzdiode 30

M

Magnetonband 97
Meßbereich 13
Messen 57
Meßergebnis 57
Meßfehler 11
Meßfühler 57, 59
Meßgröße 57
Messung 11
Meßverstärkung 37, 82
Meßwandler 57, 59
–, piezoelektrischer 68
Meßwert 57
Meßwertdarstellung, digitale 91
Metallbindung 24

Metalldrahtwiderstand 60
Mikroelektronik 7
Mikrofon
–, dynamisches 96
– Kohle- 96
Mikroprozessor 9, 131
Mikrorechner 130
Mikrorechnersystem 132
Mitkopplung 112
Mitkopplungsfaktor 112
Modulation 109, 113
Modulationsgrad 114
Multivibrator
–, bistabiler 54
–, astabiler 56

N

Nachrichtenübermittlung 108
NAND 48
NAND-Gatter 50, 53, 114, 139
Nenngröße 170
NF-Verstärker 108
NICHT-ODER 48
NICHT-UND 48
Niederfrequenzverstärker 108
NOR 48
Nullsignal 132

O

ODER 48
Ohmscher Widerstand 17
Operationsverstärker 85
Optoelektronik 121
Optokoppler 128
OR 48

P

Peripherie 131
Phasenmodulation 109
Piezoelektrischer Effekt 68
Programm 131
Pseudotetrad 135

R

RC-Netzwerk 20
RC-Kopplung 41
RC-Verstärker 41
RC-Wien-Vierpol-generator 112
Regelkreis 59
Register 154, 156
Rekombination 27

Relais
–, elektromechanisches 69
–, elektronisches 72
Resonanz 110
Resonanzfrequenz 110
Ringzähler 156
RS-Flip-Flop 54, 147
Rücksetzeingang 148
Rückwirkungskennlinie 35

S

Schallplatte 97
Schalter
–, akustischer 77
– Dämmerungs- 77
–, prellfreier 152
– Sensor- 78
Schaltkreis, integrierter 9
Schaltung
–, bistabile 147
–, kombinatorische 147
–, sequentielle 147
Schichtwiderstand 168
Schieberegister 157
Schwellwertschalter 72, 145
Schwingung 111
Schwingkreis 110, 115
– Reihen- 110
– Parallel- 110
Schwingquarz 69
Seitenband 113
Selbstinduktion 19
Sensorschalter 78
Setzeingang 148
Signal 57, 94
Signalamplitude 114
Signalaufnehmer 123
Signaldarstellung 94
Signalgeber 123
Speicher 97
Speicherspeicherung 95
Signalverstärkung 94, 99
Signalwandler 95
Signalwandlung 95
Software 132
Spannungs-Frequenz-Umsetzer 93
Spannungsmaximum 20
Spannungsteiler 17
Spannungsvergleicher 87
Spannungs-Zeit-Umsetzer 93
Speicher 154, 156
Speichermatrix 156
Speicherschaltung 147
Sperrichtung 26, 28

Spezifischer
elektrischer Widerstand 23
Spule 18, 20
Stereofonie 107
Steuerkette 59
Stromstärkemaximum 20
Stromübertragungs-
kennlinie 35
Stromverstärkungsfaktor 33
Subtraktion 142

T

Takteingang 150
Teilspannung 17
Temperaturkoeffizient 60, 175
Temperaturregelung 75, 90
Tetrade 135
Thermistor 25, 61
Thermoelement 63
Thermorelais 74
Thermospannung 63
Totalreflexion 123
Trägeramplitude 114
Trägerfrequenzverfahren 108
Trägerschwingung 113
Transistor 32
– als Meßverstärker 82
– als Schalter 42
– als Verstärker 37
Transistor-Transistor-Logik
50
Triggerschaltung 54
TTL 50
TTL-Schaltkreis 51

U

Überlagerungsempfänger 117
Übertragungskennlinie
52, 85, 139
Überwachungs-
einrichtung 144
UND 48
Untersetzer 156
Urspannung 14

V

Verknüpfungsschaltung,
logische 138
Verlustleistungshyperbel 41
Verstärkertechnik 98
Verstärkung 31
– Gesamt- 105
– Leistungs- 98
– Signal- 99
– Spannungs- 98
– Strom- 98
Verzerrung 103
Verzinnen 168
Vielfachmesser 11
Volladder 142
Vollsubtrahierer 142

W

Wechselstromwiderstand 23,
106, 110
Weichlöten 167
Widerstand
–, induktiver 22
–, kapazitiver 22
–, Ohmscher 17
–, spezifischer elektrischer
23

Z

Zähler 154
–, dekadischer 158
Zählumfang 154, 156
Zeichengenerator 138
Zeilen sprungverfahren 119,
120
Zeitkonstante 20
Zeitschalter 146
Ziffernanzeigetableau 136
Zweipol 10, 16
Zweiwertlogik 132
Zwischenfrequenzverstärker
118

Literatur

- [1] Degenhardt/Gläser: Elektronische Baugruppenfertigung, Wissenspeicher für die Berufsbildung. VEB Verlag Technik, Berlin 1982.
- [2] Schlenzig, Klaus: Bauplanbastelbuch 2. VEB Militärverlag, Berlin 1985.
- [3] ORWO-FK 1 (Informationsschrift). VEB Fotochemische Werke Berlin Kombinatbetrieb des VEB Filmfabrik Wolfen, Friedrichshager Straße 9, Berlin, 1170.
- [4] Tafelwerk Mathematik – Physik – Chemie, Klassen 7 bis 10. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1985.
- [5] Wissenspeicher Physik. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1986.

Quellennachweis der Bilder

Backe, H.; König, L.: Elektrotechnik und Elektronik selbst erlebt. Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin 1980: 2.2 (Repro: Seifert); Bauer, Dresden: 4.1.

Kurzwort: 061712 Elektronik
ISBN 3-06-061712-0