

Jürgen Plate

Linux Hardware Hackz

Messen, Steuern und Regeln mit Linux

Supplement zum Buch, 1. Auflage

HANSER

Inhaltsverzeichnis

1	Einstieg in die Elektronik	5
2	Spannungsversorgung der Schaltungen	13
2.1	Spannungsregler	13
2.2	Netzteilauslegung	15
3	Digitale Schaltkreise	17
3.1	Schaltnetze und Schaltwerke	18
3.2	Schaltkreisfamilien	20
3.2.1	TTL (Transistor-Transistor-Logik)	20
3.2.2	MOS (Metall-Oxid-Silizium)	23
3.2.3	TTL und CMOS koppeln	26
3.3	Takterzeugung, astabile Schaltungen	27
4	Schaltungsaufbau	31
4.1	Löten	31
4.2	Fehlersuche	32
4.3	Leistungshalbleiter kühlen	32
4.4	HF-Spulen herstellen	33
5	Sicherheitshinweise	35
A	Literatur	37
	Stichwortverzeichnis	39

1

Einstieg in die Elektronik

Manche fürchten jeglichen Kontakt mit der Hardware. Sie sollten aber keine Angst vor der Elektronik haben, es sei denn, es handelt sich um 230-V-Netzspannung. Auch Profis haben schon reihenweise elektronische Bauelemente zur Strecke gebracht¹. In diesem Kapitel erhalten Sie auch keine umfassende Einführung in die Elektronik, sondern nur eine kleine Auffrischung Ihres Wissens mit Fokus auf die Anwendung der Bauteile beim Bauen von Interface-Schaltungen. Es geht an dieser Stelle nur um ein grundlegendes Minimalwissen. Wenn Sie mehr lernen wollen, schnappen Sie sich eines der im Anhang genannten Fachbücher. Auch die Website des Elektronik-Kompendiums hilft Wissenslücken zu füllen, ebenso die Wikipedia-Seiten.

In diesem Kapitel werden auch einige Eigenschaften von Digitalschaltungen und einfache Interface-Schaltungen besprochen, auf deren Grundlage dann in den späteren Kapiteln aufgebaut wird – wenn es beispielsweise um die Auswertung von Sensordaten oder das Ansteuern von Relais und Motoren geht.

Beginnen werde ich mit den passiven Bauelementen und Transistoren. Danach geht es um die Eigenschaften der Digitalschaltkreise. Anschließend behandle ich erste, ganz einfache Interface-Schaltungen und die Stromversorgung externer Schaltungen.

1. **Widerstände:** Werte sind in Ω angegeben, $1 \text{ k}\Omega = 1000 \Omega$. Widerstände dienen der Begrenzung von Strömen, zum Vernichten von Spannungen und zur Erzeugung von Wärme. Ist die Wärmeerzeugung nur ein unbeabsichtigter Nebeneffekt, spricht man von Verlustleistung, die abgeführt werden muss. Verlustleistung = Spannung mal Strom ($P = U * I$). Der Spannungsabfall am Widerstand = Strom mal Widerstand ($U = I * R$, Ohmsches Gesetz).

Bei der Verwendung und Bestellung von Widerständen ist auch deren Verlustleistung von Interesse, d. h. die maximale Wärmeableitfähigkeit bei Zimmertemperatur, bis der Widerstand aufbrennt. Fängt ein eingebauter Widerstand zu rauchen an oder verbreitet sich ein typischer Lackgeruch, so ist ein Widerstand falsch dimensioniert, die Schaltung (Anordnung) falsch verdrahtet (zusammengefügt), oder ein Halbleiter (Diode, Transistor) hat einen Kurzschluss. Nur ruhig, das sind Ausnahmefälle. Wenn Sie Widerstände kaufen, dann müssen Sie diese auch unterscheiden können. Ist der Widerstandswert nicht aufgedruckt, so gilt folgender Farbcode, der auch bei Kondensatoren und mehradrigen Kabeln zur Nummerierung häufig verwendet wird. Die ersten beiden Farben bezeichnen den Wert, die dritte den Faktor 10^{Wert} . Der vierte Ring bezeichnet die Toleranz (silber = 10%, gold = 5%). Beispiel: gelb-lila-rot = 4700Ω :

¹Und mal ehrlich – macht es was aus, wenn ein 5-Cent-Transistor in Gras beißt?

Tabelle 1.1: Beispiel einer Wertetabelle

Wert	Farbe	Wert	Farbe
0	schwarz	5	grün
1	braun	6	blau
2	rot	7	lila
3	orange	8	grau
4	gelb	9	weiß

Widerstände (und auch Kondensatoren etc.) gibt es nicht in jedem beliebigen Wert zu kaufen. Für unsere Zwecke reicht die E12-Reihe, die so heißt, weil sie innerhalb einer Dekade zwölf Werte aufweist. Die Werte sind so gewählt, dass bei der üblichen Toleranz von zehn Prozent gerade noch keine Überschneidung der Toleranzbereiche zweier benachbarter Werte auftritt:

1 1.2 1.5 1.8 2.0 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2

Lediglich bei Widerständen für Spannungsteiler, Messbrücken usw. müssen wir eine feinere Unterteilung verwenden. Das wird dann im entsprechenden Abschnitt eigens angemerkt.

Potenzimeter sind Widerstände mit einem verstellbaren Abgriff. Meist verwendet man eine kreisförmige Widerstandsbahn und einen Schleifer aus Metall oder Graphit. Man setzt sie z. B. als Lautstärkeregeler ein. Jedes Poti stellt einen variablen Spannungsteiler dar. Potenziometer ohne Achse, die sich mit einem Schraubendreher verstellen lassen, bezeichnet man auch als Trimmer.

- Kondensatoren** dienen der Speicherung von Ladungen. Ihre Werte werden in Picofarad (pF, 10^{-12} F), Nanofarad (nF, 10^{-9} F) oder in Mikروفarad (μ F, 10^{-6} F) angegeben. Sie geben die Kapazität (Fassungsvermögen an Ladung) für einen Kondensator an. Daneben ist die zulässige Betriebsspannung (Durchschlagsspannung) bzw. die maximale Sperrspannung mit angegeben. Bei maximal 24 V Betriebsspannung in unseren Anwendungen gibt es kaum Probleme, nur wenige Kondensatortypen haben eine Sperrspannung kleiner als 50 V.

Kondensatoren dienen auch der Ankopplung von Impulsen (plötzliche Spannungsänderungen) oder zum kurzzeitigen Speichern von Spannung (Ladungsmengen). Sie lassen keine Gleichspannung bzw. Gleichstrom durch, weil sie eine Isolierschicht besitzen, aber Wechselspannungen (Signale, Impulse) können weitergegeben werden; dabei wird mit höherer Frequenz das Übertragen besser. Der scheinbare Innenwiderstand (Scheinwiderstand) bei Wechselstrom ist zur Frequenz umgekehrt proportional:

$$Z = \frac{1}{2 * \pi * C * f} \quad (1.1)$$

Kondensatoren erhält man in verschiedenen Bauformen, die sich hauptsächlich in der verwendeten Isolationsschicht (Dielektrikum) unterscheiden. Keramische Kondensatoren werden mit Kapazitäten von ca. 1 pF bis 100 nF hergestellt. Folienkondensatoren bis ca. 10 μ F verwenden Kunststofffolien und können Spannungen bis zu einigen Kilovolt aushalten.

Drehkondensatoren und Kondensator-Trimmer können in ihrer Kapazität verändert werden. Durch Drehen der Achse verändert man die Fläche der sich gegenüberstehenden Kondensatorplatten.

- Elektrolytkondensatoren** sind Kondensatoren mit größeren Kapazitätswerten, typische Werte sind 0,5 ... 10 000 μ F. Die Sperrspannung muss hier beachtet werden. Sie liegt mit 6 V, 10 V, 16 V, 25 V oder 35 V manchmal sehr niedrig, darf nicht überschritten

werden und muss etwas höher als notwendig gewählt werden. Elektrolytkondensatoren (Elkos genannt) sind gepolt und dürfen nicht falsch herum betrieben werden, sonst explodieren sie oder lassen „Dampf“ ab. Sie dienen zum Speichern von größeren elektrischen Ladungen, dem Aussieben von Wechselspannungen (Brummspannungen) und zum Ankoppeln langsamer Spannungssprünge. Die perlenförmigen Tantal-Elkos erlauben kleinere Bauformen und sind für unsere Schaltungen fast immer geeignet. Noch höhere Kapazitäten bei noch kleinerer Bauform haben die sogenannten Gold-Caps.

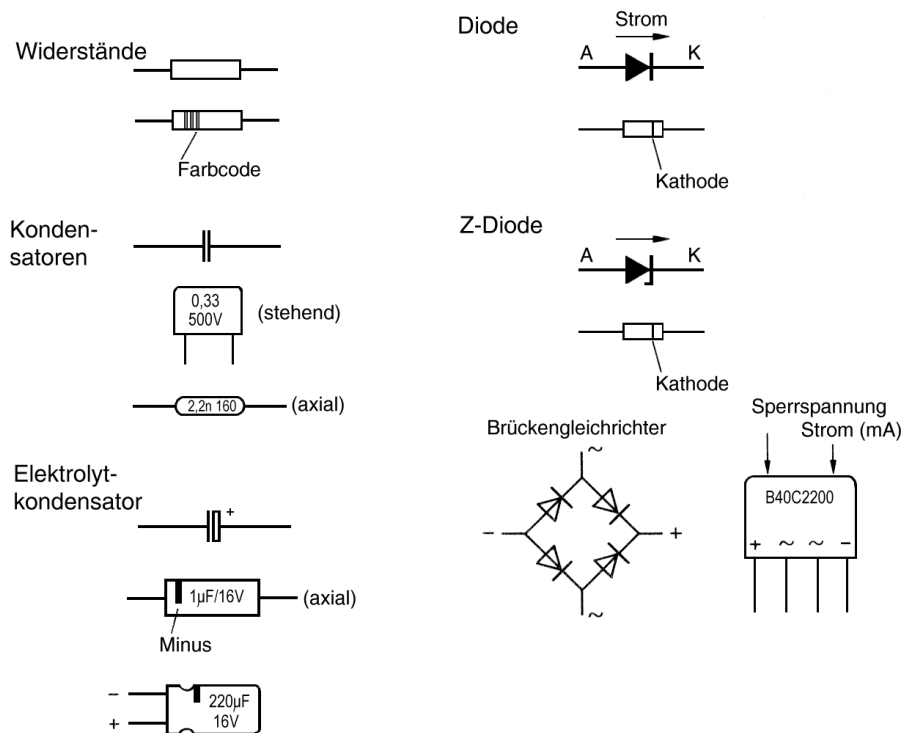


Bild 1.1: Elektronische Bauelemente (Aussehen und Schaltzeichen)

- 4. Dioden und Gleichrichter** sind Halbleiter, gewöhnlich aus Silizium, und dürfen nicht heißer als 150 Grad werden (in der Sperrschicht). Dioden lassen nur Ströme und Spannungen in eine Richtung, in Pfeilrichtung des Schaltzeichens durch (Durchlassrichtung). In umgekehrter Richtung sperren sie bis zur Höhe der maximalen Sperrspannung, bei noch höherer Spannung gehen sie kaputt. Auch die maximal möglichen Ströme sind unbedingt einzuhalten, Gleichrichter und Dioden (ebenso Transistoren) dürfen nur mit strombegrenzenden Widerständen in Reihe an eine Speisespannung gelegt werden.
- 5. Z-Dioden** sind Dioden mit einer Durchlassspannung von ca. 0,7 V, die aber in diesem Fall nicht besonders interessiert. In Sperrrichtung betrieben, gibt es eine Durchbruchspannung, die Z-Spannung (der Strom fließt gegen Pfeilrichtung), welche über einen größeren Strombereich nahezu konstant bleibt. Z-Dioden werden zum Erzeugen einer lastunabhängigen Spannung (Referenzspannung) verwendet. Auch Z-Dioden dürfen nicht ohne strombegrenzenden Widerstand betrieben werden, sonst wird die Sperrschicht zu heiß.
- 6. Leuchtdioden:** Diese Dioden werden aus bestimmten Halbleitermaterialien hergestellt, die bei Stromfluss durch die Leuchtdiode (LED, light emitting diode) an der Sperrschicht Licht abstrahlen. Je nach Material können die Farben Rot, Gelb, Grün, Blau sowie Infrarot und Ultraviolett erzeugt werden. Die Kathode der LED wird durch eine Abfla-

chung am Gehäuse und durch einen kürzeren Anschlussdraht gekennzeichnet (Merkregel „kurz“ = „Kathode“). Sie werden für vielfältige Aufgaben eingesetzt, beispielsweise als Anzeige- oder Kontrollleuchte, aber auch innerhalb sogenannter Optokoppler. Bei diesen ist in geringem Abstand zur LED ein Fotohalbleiter angebracht, der durchschaltet, wenn die LED leuchtet. Auf diese Weise kann eine galvanische Trennung zwischen zwei Schaltungen erreicht werden.

In der Regel muss der Strom durch eine LED begrenzt werden. Dies geschieht normalerweise durch einen passenden Vorwiderstand. Leuchtdioden haben je nach Farbe eine unterschiedliche Durchlass-Spannung U_d , was bei der Berechnung der Vorwiderstandes eine Rolle spielt (siehe Tabelle 1.2). Der Vorwiderstand berechnet sich bei einer Betriebsspannung von U_c als

$$R = \frac{U_c - U_d}{I_{LED}} \quad (1.2)$$

Korrekterweise müsste man noch die Kollektor-Emitter-Spannung des schaltenden Transistors abziehen. Da man für den Vorwiderstand aber meist den am nächsten gelegenen Wert der E12-Reihe verwendet, ist das nicht nötig. Werden mehrere LEDs hintereinander geschaltet, addieren sich natürlich auch die Durchlass-Spannungen.

Tabelle 1.2: Durchlass-Spannungen verschiedener LEDs

infrarot	1,5 V	rot	1,6 V	gelb	2,2 V
grün	2,1 V	blau/uv	2,9 V	weiß	4,0 V

Für eine Betriebsspannung von beispielsweise 5 V und einem LED-Strom von 20 mA ist bei einer roten LED ein Widerstand von 170 Ω nötig, bei einer blauen LED nur 105 Ω .

7. **Transistoren** dienen der Verstärkung von Gleichströmen und Wechselströmen (Signalen). Zusammen mit Widerständen können sie auch Spannungen verstärken. Die drei Anschlüsse des Transistors werden mit B = Basis (für den Steuerstrom), C = Kollektor (für den verstärkten Strom) und E = Emitter (Steuerstrom und verstärkter Strom) benannt.

Grundsätzlich gibt es NPN- und PNP-Transistoren, die sich durch die Polarität der Einzeldioden unterscheiden (Bild 1.2). Die Betrachtung eines Transistors als Gebilde aus zwei Dioden (Abbildung 1.2) kommt uns entgegen, wenn man Transistoren mit einem Ohmmeter prüfen will. Auch hier dürfen die einzelnen Dioden nicht ohne strombegrenzende Widerstände an einer Spannungsquelle betrieben werden. Zwischen B und E fließt der Basisstrom (Steuerstrom) in Pfeilrichtung, zwischen C und E fließt der Kollektorstrom in Pfeilrichtung der Emitterdiode und gegen die Pfeilrichtung der gedachten Kollektordiode (Sperrschichtbetrieb). Ein NPN-Transistor beginnt durchzuschalten, wenn die Basisspannung ca. 0,7 V höher ist als die Emitterspannung, wobei der Stromfluss am Kollektor wesentlich größer als der Basisstrom ist (Stromverstärkungsfaktor des Transistors mal Basisstrom). Bei Anwendung als Schalter muss dafür gesorgt werden, dass der Transistor entweder komplett sperrt oder voll durchschaltet. Der lineare Teil der Kennlinie, der bei analogen Anwendungen eine Rolle spielt, ist für uns uninteressant. Der Basisstrom darf aber auch nicht zu groß werden, sonst nimmt der Transistor Schaden. Deshalb werden Sie in den Schaltungen fast immer einen strombegrenzenden Basiswiderstand finden.

Die Spannungen zwischen den Anschlüssen des Transistors werden durch Indizes angegeben, z. B. Spannung zwischen Kollektor und Emitter mit U_{CE} oder zwischen Emitter und Basis mit U_{EB} . Die Durchlassspannung an der Emitterdiode U_{BE} beträgt wie bei Gleichrichtern ca. 0,7 V. Die Spannung U_{CE} hängt vom Basisstrom und der Basisspannung gegen Masse ab, deshalb kann die Verlustleistung recht unterschiedliche Werte

Je nach Leistung werden Transistoren in unterschiedlichen Gehäuseformen angeboten (Bild 1.3). Anwendungen von Transistoren für Hochfrequenz und Tonsignale sollen hier nicht berücksichtigt werden, es verbleiben die Anwendungen als Gleichstromverstärker und Schalttransistor. Der schon erwähnte Verstärkungsfaktor B gibt an, um wie viel mal größer der Kollektorstrom gegenüber dem Basisstrom ist (Leistungstransistoren: $B = 20 \dots 100$, Kleinsignaltransistoren: $B = 100$ bis 800). Für überschlägige Berechnungen muss mit dem Minimalwert der Verstärkung B gerechnet werden. Angenommen, ein Digitalausgang kann max. 2 mA Strom liefern. Bei einem Verstärkungsfaktor von 200 ist der Transistor in der Lage, einen Kollektorstrom von maximal $I_c = 0.002 \text{ A} * 200 = 0.4 \text{ A}$ zu liefern. Wird ein höherer Strom gebraucht, muss eine weitere Verstärkerstufe hinzugefügt werden.

Das europäische Transistorenangebot ist unterteilt in verschiedene Familien, die durch die beiden ersten Buchstaben bestimmt werden. Der erste Buchstabe gibt an, aus welchem Material der Transistor besteht. Dabei gilt:

- A = Germanium
- B = Silizium

Heutzutage findet man fast nur noch Typen aus der B-Gruppe. Der zweite Buchstabe zeigt den Einsatzbereich an. Dieser wird wie folgt aufgeteilt:

- C = Allgemeine und Kleinsignalanwendungen
- D = Leistungstransistor und Darlingtontypen
- F = Hochfrequenz und Feldeffekt-Transistoren
- L = Leistungs-Hochfrequenztransistoren
- S = Kleinleistungs-Schalttypen
- U = Leistungs-Schalttransistoren

Nach der Typenbezeichnung wird oft auch noch ein Buchstabe oder eine Zahl angehängt. Diese gibt an, welchen Verstärkungsfaktor der entsprechende Typ besitzt. Bei Buchstaben stehen die Werte im entsprechenden Datenblatt. Bei Zahlenangaben ergibt die Zahl mit zehn multipliziert den Verstärkungsfaktor.

8. **Thyristoren** sind Halbleiter mit Schaltercharakteristik. Sie besitzen drei Anschlüsse – Anode, Kathode und Gate (Zünderlektrode) – und haben drei pn-Übergänge in der Folge pnpn (also einen mehr als der Transistor). Thyristoren werden mit positiver Anodenspannung betrieben und sperren im Ruhezustand. In Durchlassrichtung sperrt er dabei bis zu einer Durchbruchspannung. In Durchlassrichtung kann er durch einen positiven Stromimpuls am Gate in einen leitenden Zustand geschaltet werden. In Sperrrichtung sperrt er den Strom wie eine normale Diode. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Zündung: über einen Steuerstrom (positiver Strom oder Stromimpuls am Gate) oder über Licht (Fotothyristor). Daneben gibt es noch unerwünschte Möglichkeiten, das Überschreiten der Nullkippspannung (Überkopfzündung bzw. Breakover), das Überschreiten der zulässigen Spannungsanstiegsgeschwindigkeit oder zu hohe Temperatur.

Praktisch wird der Thyristor als steuerbare Diode eingesetzt. Durch Strominjektion in die dritte Schicht (Ansteuerung am Gate) kann der Thyristor gezündet (leitfähig geschaltet) werden. Voraussetzung dafür sind eine positive Spannung zwischen Anode und Kathode sowie ein Mindeststrom durch die mittlere Sperrschicht. Gelöscht (in den Sperrzustand versetzt) wird der Thyristor durch Unterschreiten des Haltestroms, normalerweise durch Abschalten oder Umpolen der Spannung im Laststromkreis.

Betrieibt man den Thyristor mit Wechselspannung, kann er nur bei der positiven Halbwelle zünden. Der Verbraucher ist nur eingeschaltet, wenn eine positive Gatespannung

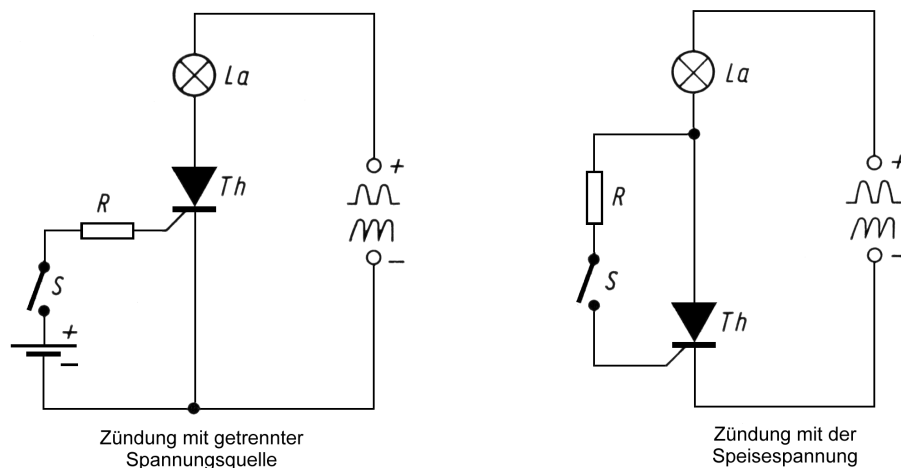


Bild 1.4: Thyristor-Betrieb an pulsierender Gleichspannung

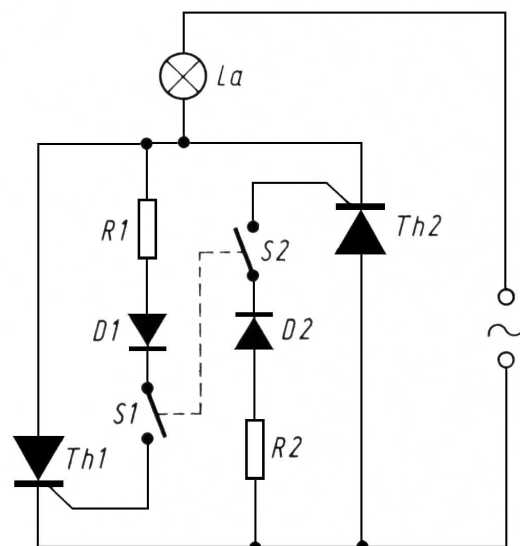


Bild 1.5: Wechselspannungs-Vollwegbetrieb mit zwei Thyristoren

vorliegt und nur während der positiven Halbwellen. Bei der negativen Halbwellen sperrt der Thyristor, und die Schaltung löscht automatisch (Bild 1.4).

Thyristoren werden für große Ströme bis über 100 Megaampere gebaut. Problematisch ist die Stromdichte in der Gateschicht beim Zündvorgang. Beim Injizieren der Elektronen wird die Schicht an der Eintrittsstelle leitend. Bis die gesamte Siliziumfläche leitend ist, konzentriert sich der Strom auf den schon leitenden Bereich, in dem die gesamte Verlustleistung umgesetzt wird. Deshalb ist es besonders wichtig, dass der Zündstrom möglichst steil ansteigt. Übliche Thyristoren haben eine obere Grenzfrequenz von ca. 200 Hz.

Man kann durch Verwenden eines Gleichrichters beide Halbwellen nutzen, das automatische Löschen nach jeder Halbwellen bleibt erhalten. Thyristoren eignen sich vorzüglich zum Schalten von Wechselspannungen. Eine Weiterentwicklung ist der **Triac**, der einen Vollwegbetrieb erlaubt (wie zwei antiparallel geschaltete Thyristoren, siehe Bild 1.5). Oft reicht aber auch die Kombination eines Thyristors wie in Bild 1.4 und eines

Brückengleichrichters, um Wechselstromverbraucher zu schalten. Für alle unsere Anwendungsfälle ist der Typ TIC 106 brauchbar.

Neben den Standardtypen gibt es noch spezielle Dioden, Transistoren und andere Halbleiter (z. B. Fotodioden und -transistoren, Sensoren etc.), auf die hier nicht eingegangen wird.

2

Spannungsversorgung der Schaltungen

2.1 Spannungsregler

Sowohl bei TTL als auch bei CMOS treten bei Schaltvorgängen Spitzen in der Stromaufnahme auf. Diese Lastspitzen sind steilflankig und bewegen sich zeitlich im Nanosekundenbereich. Unter solchen Verhältnissen stellen die Versorgungsleitungen zum einzelnen Gatter oder zu sonstigen Bausteinen bereits nennenswerte Induktivitäten dar – mit dem Resultat, dass die Versorgung des ICs kurzzeitig einbricht (Dip). Nach einigen Nanosekunden erfolgt ein Überspringen in der Gegenrichtung (Spike). Beides kann zu Störungen im Ablauf des Schaltnetzes oder des Schaltwerks führen. Daher muss jedes IC mit einem Abblock-Kondensator versehen werden (20 bis 100 nF), der durch möglichst kurze Leitungen oder Leiterbahnen mit den beiden Versorgungsanschlüssen (+Vcc und Masse) verbunden ist. Es kann auch nicht schaden, für die gesamte Schaltung einen Elko mit 47 bis 100 µF vorzusehen.

Für fast alle Anwendungen wird eine stabilisierte Gleichspannung benötigt, für die meistens integrierte Festspannungsregler zum Einsatz gelangen. Sie enthalten eine interne Regelstufe für eine bestimmte Spannung (daher der Name). Zusätzlich haben sie eine interne Strombegrenzung, die bei Überlastung und Kurzschluss einsetzt. Bei einem Kurzschluss regelt der Festspannungsregler seine Ausgangsspannung automatisch herunter. Wird der Kurzschluss aufgehoben, stabilisiert sich die Ausgangsspannung wieder auf ihren festen Wert. Eine thermische Schutzschaltung verhindert die Zerstörung des Bausteins durch Überhitzung.

Die bekanntesten Festspannungsregler sind die 78xx-Serie für positive und die 79xx-Serie für negative Spannungen. Die Ausgangsspannungen dieser Bausteine können 5, 6, 8, 9, 12, 15, 18 oder 24 Volt betragen. Damit die Spannungsregler einwandfrei arbeiten, sollte die Eingangsspannung mindestens zwei bis drei Volt über der gewünschten Ausgangsspannung liegen. Die Eingangsspannung darf niemals mehr als 36 Volt betragen. Die Differenz der Eingangsspannung zur Ausgangsspannung sollte jedoch nicht zu hoch sein, da sonst die Verlustleistung am Festspannungsregler zu groß wird (Wärmeentwicklung). Wenn zum Beispiel beim 1-A-Regler die Eingangsspannung 12 V und die Ausgangsspannung 5 V beträgt, müssen 7 W Verlustleistung über einen passenden Kühlkörper abgeführt werden. Als Faustregel für die Trafospaltung gilt: Ausgangsspannung +4 Volt. Die Kapazität des Lade-Elkos in µF kann man mit $C = 4000 * \text{Ausgangsstrom}$ veranschlagen.

Tabelle 2.1: Festspannungsregler

Bezeichnung	Stromentnahme
78Lxx	0,1 A
78Mxx	0,5 A
78xx	1 A
78Sxx	2 A
78Txx	3 A
78Hxx	5 A

Die einzelnen Typen unterscheiden sich nicht nur durch die Ausgangsspannung, sondern auch durch ihren Maximalstrom. In Tabelle 2.1 ist die Stromentnahme bei ausreichender Kühlung durch einen passenden Kühlkörper angegeben. Ohne Kühlung ist nur etwa die Hälfte der Stromentnahme möglich (eher weniger). Das „xx“ bezeichnet den Wert der Ausgangsspannung in zwei Zahlen. „05“ steht demnach für 5 Volt, „15“ für 15 Volt.

Tipp

Normalerweise reicht für alle Schaltungen in diesem Buch ein Steckernetzteil mit maximal 1 A Ausgangsstrom. Es gibt im Handel recht kleine Schaltnetzteile mit einstellbarer, geregelter Spannung, die zwar etwas mehr kosten als entsprechende Varianten mit Trafo, dafür aber kleiner und leichter sind. Wenn zusätzliche Spannungen benötigt werden, können Sie diese mit Hilfe eines Spannungsreglers aus der Gleichspannung des Netzteils gewinnen.

In der Regel wird im Buch die 1-A-Version des Spannungsreglers im TO-220-Gehäuse verwendet (Bild 2.1), die Pinbelegung der anderen Varianten lassen sich den Datenblättern der Hersteller (z. B. National Semiconductor, siehe Links im Anhang) entnehmen. Lediglich dort, wo eine Referenzspannung benötigt wird und nur wenige Milliampere Strom fließen, wird die Variante im TO92-Gehäuse eingesetzt.

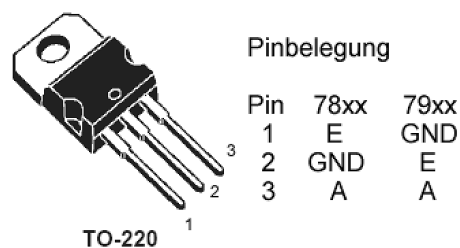


Bild 2.1: Pinbelegung von Festspannungsreglern

Einzige notwendige Beschaltung des Festspannungsreglers sind zwei Kondensatoren, die Regelschwingungen verhindern sollen. Jeweils am Eingang und am Ausgang müssen diese möglichst nahe am Baustein zwischen Eingang bzw. Ausgang und Masse liegen (Wert: 0,33 bis 1 μ F). Bild 2.2 zeigt eine typische Schaltung. Vor dieser Schaltung befindet sich die Gleichrichterschaltung mit Ladekondensator. Als Block- und Lade-Elektrolytkondensatoren sollten Standard-Typen verwendet werden. Wenn es unbedingt Tantal-Elkos sein müssen, ist auf gute Spannungs- und Schaltfestigkeit zu achten.

Bild 2.2 zeigt außerdem die Version eines dreibeinigen einstellbaren Spannungsreglers. Die Ausgangsspannung wird mit R1 und R2 dimensioniert. Sie ergibt sich zu

$$U_a = 1.25 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.1)$$

Die Diode D1, welche zwischen Ein- und Ausgang in Sperrrichtung geschaltet ist, schützt den Baustein. Wird die Ausgangsspannung größer als die Eingangsspannung (etwa durch

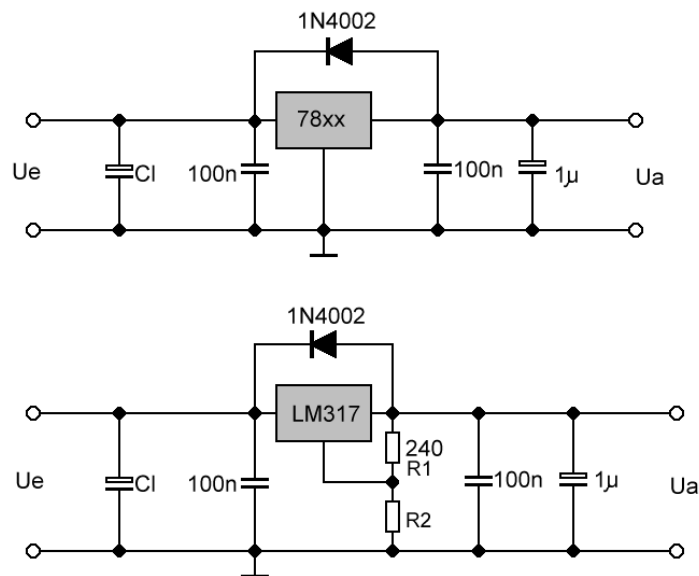


Bild 2.2: Beschaltung von Festspannungsreglern

Entladen von Schaltungskapazitäten über den Regler nach dem Abschalten der Versorgungsspannung), gibt es einen Kurzschluss im Spannungsregler. Gleichzeitig gelangt auch die unregelte Versorgungsspannung an den Rest der Schaltung. Die Diode verhindert diesen GAU.

Für die hier verwendeten Spannungsregler gilt eine minimale Stromlast, ohne die der interne Regler des Chips nicht immer einwandfrei arbeitet. Als typische Minimallast gilt 5, besser 10 mA. Bei den Lowpower-Versionen ist der Minimalstrom noch geringer, dafür liefern sie aber auch weniger Maximalstrom. Gegebenenfalls hilft ein Blick in die Datenblätter.

Neben den typischen Festspannungsreglern werden verschiedene Low-Drop-Typen angeboten, bei denen die Eingangsspannung nur knapp 1 Volt höher als die gewünschte Ausgangsspannung sein muss (beim 78xx sind es ca. 3 Volt). Bei höherem Strombedarf könnte man einen Schaltregler einsetzen, dessen Verlustbilanz wesentlich besser aussieht. Den LM 2576 von National Semiconductor gibt es beispielsweise für 3,3 V, 5 V, 12 V oder 15 V. Er liefert einen Ausgangsstrom von bis zu drei Ampere.

2.2 Netzteilauslegung

Normalerweise sind Transformator und Ladekondensator beim Steckernetzteil auf die maximal zu entnehmende Leistung abgestimmt. Für diejenigen, die das Netzteil komplett selbst bauen wollen, hier ein paar Tipps. Bild 2.3 zeigt die Schaltung von Ladeelko und Gleichrichter.

Zur Ermittlung der maximal erlaubten Leerlaufspannung des Transformators für eine Eingangsspannung des Reglers U_b geht man von folgender Beziehung aus:

$$U_0 = \frac{U_b + 1,5}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

Der Ladeelko sollte so dimensioniert werden, dass Amplitude der Brummspannung am Ladekondensator C1 möglichst klein bleibt. Seine Kapazität hängt von der Ausgangsspannung und dem Ausgangsstrom ab. Bei steigendem Strom steigt auch die Amplitude der

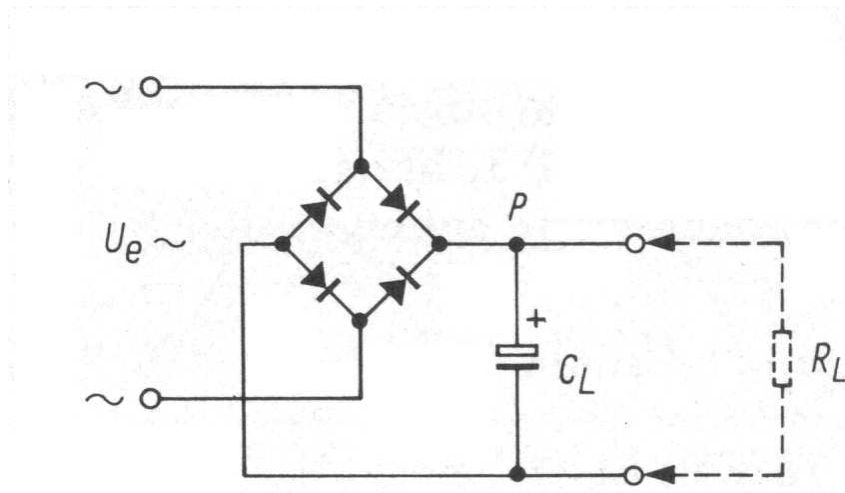


Bild 2.3: Trafo und Ladeleko

Brummspannung (die man ja möglichst niedrig haben will). Die (Näherungs-)Formel für die Berechnung der Brummspannung lautet:

$$U_{bss} = \frac{0,75 * I_a}{f * C_L} \quad (2.3)$$

U_{bss} = Amplitude der Brummspannung,

I_a = max. Ausgangsstrom,

f = Frequenz der Brummspannung (bei Zweiweggleichrichtung 100 Hz)

Alle Angaben in der Grundeinheit (also Farad und Ampere) vornehmen. Bild 2.4 zeigt den Verlauf der Spannung am Ladeleko bei Belastung.

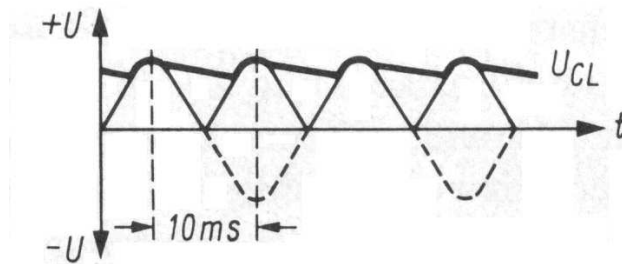


Bild 2.4: Spannungsverlauf am Ladeleko

Beispiel: 3300 Mikrofarad, 9 Volt, 1 Ampere

$$U_{bss} = (0,75 * 1) / (100 * 0,0033) = 0,75 / 0,33 = ca. 2,3V$$

Beispiel: 4700 Mikrofarad, 9 Volt, 1 Ampere

$$U_{bss} = (0,75 * 1) / (100 * 0,0047) = 0,75 / 0,47 = ca. 1,6V$$

Die Brummspannung muss so gering sein, dass der Regler immer noch genügend „Luft“ zum Ausregeln seiner Ausgangsspannung hat. Da beim Spannungsregler die Eingangsspannung immer 2 – 3 Volt über der Ausgangsspannung legen sollte, wäre für einen 5-V-Regler der größere Kondensator die bessere Wahl. Eine weitere Vergrößerung von C_L würde aber nur noch die Verlustleistung im Regler erhöhen.

3

Digitale Schaltkreise

Dieser kurze Abriss erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern will einige grundlegende Kenntnisse über Digitalbausteine auffrischen und dem Praktiker ein paar Tipps geben. Darum sollten Sie schon irgendwann Kontakt mit der Digitaltechnik gehabt haben und beispielsweise mit logischen Grundfunktionen, Schaltungsminimierung, Hazards, Glitches, Race-Conditions und vielem mehr ein wenig vertraut sein. Wenn Sie noch nie mit Digitaltechnik zu tun hatten, kommen Sie um das Studium von Sekundärliteratur oder einen Blick auf einschlägige Webseiten nicht herum.

Zur Erinnerung: Im Unterschied zu analogen oder linearen Schaltungen sind logische Schaltungen zur Übertragung zweier bestimmter Signalzustände vorgesehen: „High“ (H) oder logisch „EINS“ (1) und „LOW“ (L) oder logisch „NULL“ (0). Die den beiden Zuständen zugeordneten Signalpegel sind vom Typ der verwendeten Schaltung abhängig. Wie wir noch feststellen werden, hängen sie (leider) von der Art der kommerziell erhältlichen Logik-Schaltkreise verschiedener Familien ab. Die Zuordnung der logischen Zustände ist im Prinzip willkürlich – in der Regel ist die „positivere“ Spannung oder „HIGH“ dem Logikzustand „EINS“ und die „negativere“ Spannung oder „LOW“ dem Logikzustand „NULL“ zugewiesen, d.h. wir verwenden positive Logik.

Die logischen Grundfunktionen NICHT, UND, ODER sind als Axiome definiert und werden postuliert (nicht beweisbar). Für die im Buch vorkommenden Beschreibungen und Schaltungen gelten folgende Vereinbarungen:

- Alle logische Verknüpfungen (= alle Schaltfunktionen) sind auf die Grundfunktionen zurückzuführen.
- Darstellungsformen:
 - Wahrheitstabelle (Wertetabelle, Funktionstabelle):
Allen möglichen Wertekombinationen der Eingangsgrößen werden die Werte der jeweiligen Ausgangsgrößen zugeordnet:
 - Algebraische Gleichung (Funktionsgleichung):

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Die Grundverknüpfungen und einige logischen Verknüpfungen erhalten Operator-symbole, z. B. : $y = x_1 + x_2$

Tabelle 3.1: Beispiel einer Wertetabelle

X1	X2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- Blockschaltung (Logik-Diagramm):

Elementare Logikbausteine realisieren die Grundverknüpfungen. Diesen Bausteinen wird ein Schaltzeichen zugeordnet, sie werden auch als „Gatter“ bezeichnet (Norm durch DIN 40700, Teil 14, Juli 1976).

■ Logische Grundfunktionen

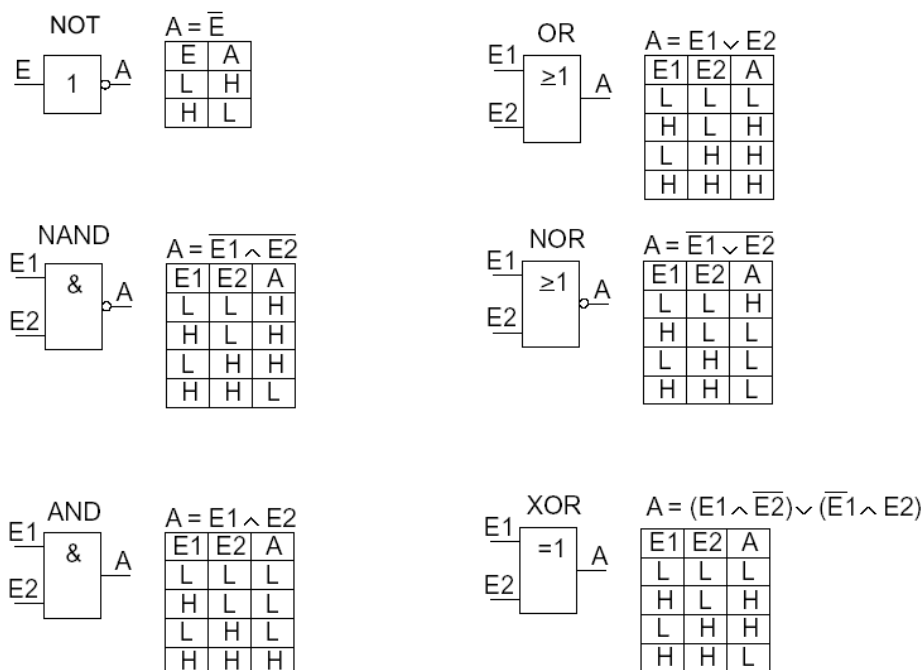


Bild 3.1: Übersicht der logischen Grundfunktionen

- Die Konjunktion (UND) kann auf beliebig viele Eingänge erweitert werden. Die Ausgangsvariable hat nur dann den Wert 1, wenn alle Eingangsvariablen den Wert 1 haben.
- Die Disjunktion (ODER) kann auf beliebig viele Eingänge erweitert werden. Die Ausgangsvariable hat dann den Wert 1, wenn mindestens eine Eingangsvariable den Wert 1 hat.

In diesem Text werden wegen der zur Verfügung stehenden Type die Ersatzdarstellungen für die logischen Grundfunktionen verwendet (Tabelle 3.2).

3.1 Schaltnetze und Schaltwerke

Ein **Schaltnetz** stellt die schaltungstechnische Realisierung einer logischen Funktion dar. Das Schaltnetz verknüpft also eine oder mehrere logische (Boolesche) Eingangsvariablen,

Tabelle 3.2: Logische Grundfunktionen

Grundfunktion	Zeichen	Beispiel
Negation (NICHT)	-	$y = \overline{x1}$
Konjunktion (UND)	*	$y = x1 * x2$
Disjunktion (ODER)	+	$y = x1 + x2$

welche die Werte 0 oder 1 annehmen können, durch eine Boolesche Funktion (f). An den Ausgangsleitungen liegen dann Werte an, die von den Eingangswerten und der Verknüpfungsfunktion abhängen. Schaltnetze sind also Digitalschaltungen, bei denen der Zustand der Ausgänge zu jedem Zeitpunkt *nur* vom Zustand der Eingänge zu diesem Zeitpunkt abhängt. Die Vorgeschichte spielt keine Rolle. Es sind *keine* Rückkopplungen oder Speicher vorhanden (Bild 3.2).

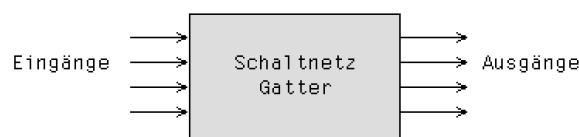


Bild 3.2: Ein Schaltnetz besteht aus logischen Verknüpfungen

Soll die Vorgeschichte, d. h. der Zustand der Ausgänge zu einem früheren Zeitpunkt, eine Rolle spielen, ist eine Erweiterung um Speicherelemente notwendig. **Schaltwerke** sind Digitalschaltungen, bei denen der Zustand der Ausgänge zu jedem Zeitpunkt vom Zustand der Eingänge zu diesem Zeitpunkt **und** endlich vielen vorausgegangenen Zuständen abhängt. Der Zustand von endlich vielen vorangegangenen Zeitpunkten führt zu *inneren Zuständen*, welche die Schaltung einnimmt. Als Speicherelemente werden in der Regel Flipflops verwendet (Bild 3.3).

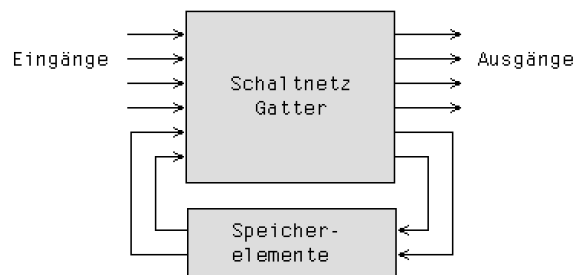


Bild 3.3: Ein Schaltwerk hat ein „Gedächtnis“

Das **asynchrone Schaltwerk** ist die Grundform dieser Schaltungen. Es stellt die schaltungstechnische Realisierung eines Booleschen Automaten dar. Alle oder ein Teil der Ausgangswerte werden einem Speicher zugeführt, dessen Ausgang (auch wieder ganz oder teilweise) auf Eingänge des Schaltnetzes zurückgeführt wird. Die logische Schaltfunktion nimmt die Eingangswerte **und** die Zustandswerte (im Speicher), die zu einem bestimmten Zeitpunkt existieren, und verknüpft diese zu einem neuen Zustandsvektor. Durch die Laufzeit von Gattern und Speicher ergibt sich eine Verzögerung zwischen dem Zeitpunkt, an dem die Eingangssignale angelegt wurden, zu dem Zeitpunkt, an dem der Ausgang des Speichers die neue Verknüpfung anzeigt. Um zu einem bestimmten Zeitpunkt anliegende Eingangswerte mit den richtigen zwischengespeicherten Werten zu verknüpfen, wird die Übernahme der Ausgangswerte des Schaltnetzes in den Speicher (meist Flipflops) von

einem Taktsignal synchronisiert. Die Taktfrequenz wird passend zur Gatterlaufzeit des Schaltnetzes gewählt. Man spricht dann von einem *synchronen Schaltwerk*.

3.2 Schaltkreisfamilien

Thema des Buchs ist ja das Anschließen von Interface-Schaltungen an den Computer. Deshalb soll an dieser Stelle ein knapper Überblick der häufigsten Schaltkreisfamilien gegeben werden – damit auch die benötigte Schaltungstechnik für das Interfacing bei den einzelnen Technologien klar wird. Dabei wird auch auf Probleme beim Zusammenschalten von Bausteinen unterschiedlicher Familien eingegangen.

3.2.1 TTL (Transistor-Transistor-Logik)

Die TTL-Schaltkreisfamilie entwickelte sich bereits sehr früh und gilt seit fast 30 Jahren als die bedeutendste Schaltkreisfamilie. Aus den Standard-TTL-Bausteinen entwickelten sich über die Jahre andere Typen (Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Historische Entwicklung der TTL-Familien

Jahr	Baureihe	Bezeichnung
1963	Standard-TTL	74xx
1967	Low-Power	74Lxx
1967	High-Power	74Hxx
1969	Schottky	74Sxx
1971	Low-Power-Schottky	74LSxx
1978	Fast	74Fxx
1980	Advanced Low-Power-Schottky	74ALSxx
1981	Advanced Schottky	74ASxx

„Transistor-Transistor-Logik“ besagt, dass die Signal-Ein- und -Auskopplung über Transistoren erfolgt. Die TTL-Baureihen gliedern sich in mehrere historisch gewachsene Reihen. Während zunächst die sogenannten Standard-TTL-Schaltkreise mit der Bezeichnung 74xxx den Markt dominierten, kamen später Reihen mit sehr schnellen Schaltzeiten wie die High-Speed-Reihe 74Sxxx oder aber verringerter Leistungsaufnahme wie die 74Lxxx-Reihe sowie Kombinationen aus beiden Reihen (74LSxxx) hinzu. Letztere dominiert heute die TTL-Anwendungen. Kennzeichnend für die Grundschialtung von TTL-Gattern ist der Multiemitter-Eingang, der mehrere Eingänge rückwirkungsfrei miteinander verkoppelt und der sogenannte Totem-Pole-Ausgang, der aus einer Treiberstufe mit zwei im Gegentakt arbeitenden Ausgangstransistoren besteht (Bild 3.4).

Diese Schaltungsmerkmale sind in allen Schaltkreisen der Standard-TTL-Reihen zu finden, unabhängig davon, wie komplex deren Innenleben auch ist. Lediglich bei den High-Speed-Baureihen mit dem S in der Typenbezeichnung finden wir statt der Multiemittertransistoren Schottky-Diodeneingänge, da deren Schaltzeiten wesentlich kürzer sind als die von Standard-Transistoren (Bild 3.4).

Auch ausgangsseitig gibt es Unterschiede. Der Standard-Ausgang ist durch den Gegentakt-Ausgang gekennzeichnet. Er kann sowohl TTL-Eingänge ansteuern als auch systemfremde Lasten, wie z. B. einen Transistor oder eine LED über einen Vorwiderstand. Die Transistoren werden als Schalter betrieben, und zwar so, dass sie nicht gleichzeitig leiten oder sperren. Daher ist je nach Schaltzustand immer nur einer der beiden Transistoren leitend und schaltet den Ausgang entweder nach Masse (Ausgangspegel „0“) oder zur Betriebsspannung (Ausgangspegel „1“) durch.

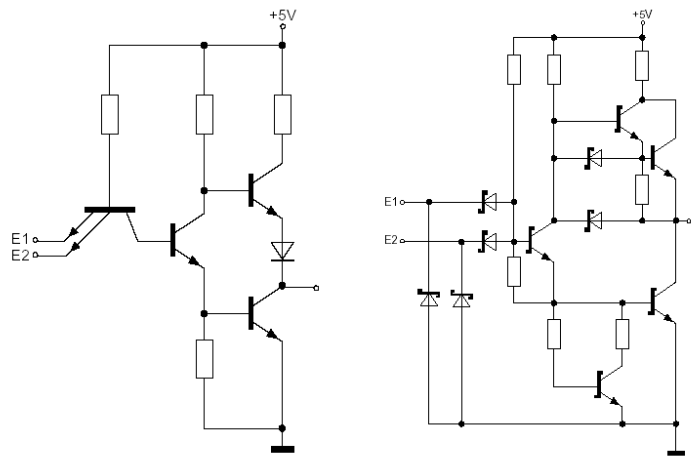


Bild 3.4: Innenschaltung eines Standard-TTL-Gatters (links) und eines TTL-LS-Gatters (rechts)

Eine weitere wichtige Rolle spielt der Tristate-Ausgang. Sein Name sagt alles. Im Gegensatz zum einfachen Gegentakt-Ausgang, der den Ausgang entweder sperrt oder durchschaltet, ist es hier über eine besondere Steuerung, die extern oder intern innerhalb der Schaltkreislogik ausgelöst werden kann, zusätzlich möglich, durch gleichzeitige Sperrung beider Ausgangstransistoren den Ausgang hochohmig zu machen. Der Vorteil dieser Schaltungsversion ist die Möglichkeit, mehrere Schaltkreisausgänge z. B. an einer gemeinsamen Busleitung betreiben, d. h. parallelschalten zu können. Wichtig ist beim Tristate-Ausgang, dass niemals zugleich zwei oder mehr Ausgänge aktiviert sein dürfen.

Die dritte wichtige Ausgangsschaltungsversion in Bild 3.5 ist der Open-Collector-Ausgang (OC). Hier weist der Ausgangstransistor einen offenen Kollektor auf, der im leitenden Zustand nach Masse schaltet (0-Pegel) und im gesperrten Zustand hochohmig (offen) wird. Dieser Effekt wird einerseits zum Schalten höherer Lasten eingesetzt, andererseits sind hier je nach Typ des Ausgangstransistors höhere Ausgangsspannungen als die Betriebsspannung des Schaltkreissystems möglich.

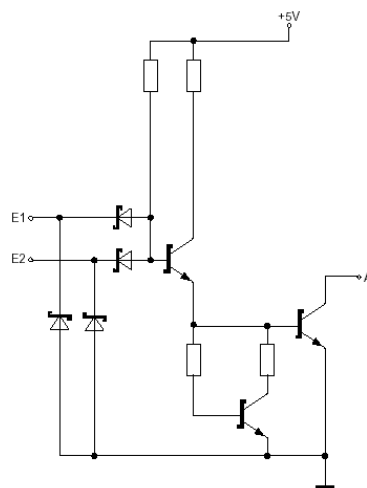


Bild 3.5: Innenschaltung eines Open-Collector-Gatters

Aber auch Multiplexbetrieb und Parallelschaltung von Ausgängen sind so möglich. Gerade letztere Möglichkeit wird gern in der Praxis angewendet, um eine zusätzliche logische Verknüpfung zu realisieren. So kann man z. B. mehrere NAND-Gatter ausgangseitig so

zusammenschalten, dass eine zusätzliche AND-Funktion entsteht. Je nach Art der sich ergebenden Verknüpfung nennt man das „WIRED-AND“ bzw. „WIRED-OR“.

Die TTL-Familie deckt heute nahezu alle denkbaren Anwendungen mit Schaltkreisen niedrigen und mittleren Integrationsgrades ab und ist mit nahezu 1000 Typen am Markt vertreten. Sie zeichnet sich aus durch:

- kurze Schaltzeiten der Gatter;
- verhältnismäßig hoher Ausgangsstrom, der es gestattet, kleinere Lasten sogar direkt anzusteuern;
- einfach beherrschbare Technologie und damit verbundene hohe Schaltkreisausbeute bei den Chipherstellern.

Der recht hohe Ausgangsstrom führt aber auch zu einem hohen Ruhestrom. Der relativ hohe Strombedarf der TTL-Schaltkreise erzwang große Chipflächen, um die entstehende Verlustwärme abzuführen. Damit war dem Integrationsgrad der TTL-Technik bei gleicher Chipfläche eine „natürliche“ Grenze gesetzt. Die Tabelle 3.4 zeigt Gatterlaufzeiten und Verlustleistungen bei TTL-Gattern.

Tabelle 3.4: TTL-Gatterlaufzeiten und -Verlustleistung

TTL-Familie	Abk.	Laufzeit [ns]	Leistung [mW]
Low Power TTL	L	33	1
Standard TTL	-	10	10
Low Power Schottky	LS	9	2
High Power	H	6	22.5
Advanced Low Power Schottky	ALS	4	1
Schottky	S	3	20
Fast Schottky	F	2	4
Advanced Schottky	AS	1.5	22

Die wichtigsten Daten von TTL-Schaltkreisen aus Anwendersicht sind

- die Signalpegel am Ein- und Ausgang,
- Ein- und Ausgangsströme,
- die Verzögerungszeiten und
- die Betriebsspannungsbereiche.

Der „fan out“ eines Gatters gibt an, wie viele Eingänge maximal von einem Gatterausgang ansteuerbar sind. Bei Standard-TTL ergibt er sich zu 10.

Der Bereich des 0-Pegels erstreckt sich beim TTL-Eingang von 0 bis 0.8 V, der des 1-Pegels von 2 bis 5 V. Das heißt, im Spannungsbereich des 0-Pegels erkennt jedes TTL-Gatter an seinem Eingang eine logische 0, ab 2 V dann eine logische 1. Der Spannungsbereich zwischen 0.8 V und 2 V ist eine verbotene Zone. Ein Signal, das in diesem Bereich längere Zeit anliegt, kann das Gatter zum Schwingen anregen. Zumindest ist eine Fehlfunktion programmiert. Ansteuerimpulse müssen diesen Bereich möglichst schnell durchlaufen.

Ausgangsseitig liegen die Pegel für „1“ zwischen 2.4 V und 5 V sowie die 0-Pegel zwischen 0 und 0.4 V. Insgesamt ergibt sich für die TTL-Pegel und den Störabstand (Tabelle 3.5):

Tabelle 3.5: Eingangsströme und fan out

TTL-Familie	I_L (mA)	I_H (μ A)	fan out
Low Power TTL	-0.18	10	20
Standard TTL	-1.6	40	10
Low Power Schottky	-0.4	20	20
High Power	-2.0	50	10
Advanced Low Power Schottky	-0.2	20	20
Schottky	-2.0	50	10
Fast Schottky	-1.2	40	25
Advanced Schottky	-1.0	20	40

3.2.2 MOS (Metall-Oxid-Silizium)

Die MOS-Technik hat Vorteile gegenüber TTL: der Aufbau aus hochohmigen Feldeffekt-Transistoren, die nahezu leistungslos ansteuerbar sind und so nur sehr geringe Verlustleistungen aufweisen. Diese steigen erst mit wachsender Betriebsfrequenz. Dazu kommt der einfache und somit platzsparende Aufbau ohne weitere Schaltungselemente wie Dioden und Widerstände sowie Fortfall von Isolierschichten und die dadurch mögliche hohe Integration. Nachteilig waren anfangs die relativ hohen Schaltzeiten (durch die hohen Kapazitäten innerhalb der MOS-Schaltungen, die erst später mit Einführung der CMOS-Technik verringert wurden) sowie die zunächst relativ geringen Ausgangsströme.

Erst mit der Fortentwicklung der MOS-Technologie hin zu CMOS (Complementary MOS) durchbrach man die technologischen Schranken, so dass moderne CMOS-Reihen heute in Schaltzeit und Ausgangslaststrom die TTL-Schaltkreise vielfach direkt ersetzen können. Weiterhin können CMOS-Schaltkreise auch mit höheren Spannungen betrieben werden, wenn ein großer Störabstand erforderlich ist. Aber auch bei 5 V Versorgungsspannung sind die Störabstände größer als bei TTL, wie ein Blick auf Bild 3.6 zeigt.

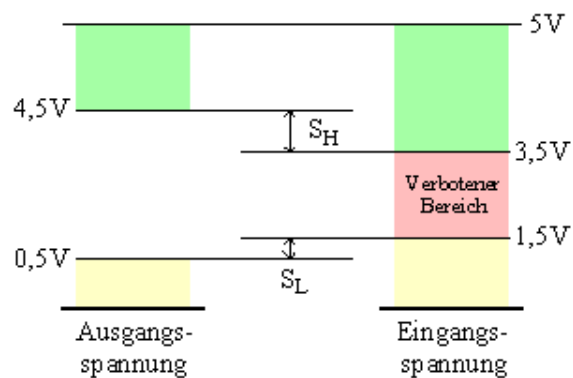


Bild 3.6: CMOS-Pegel

CMOS bedeutet im Wesentlichen, dass zwei Metalloxid-Feldeffekt-Transistoren (jeweils ein N- und ein P-Kanal-FET) in Serie zwischen Masse und Betriebsspannung liegen (Komplementärtechnik). Die Eingänge beider Transistoren sind miteinander verbunden. Diese Transistoren können im Idealfall die Gleichspannung völlig sperren, sind also ggf. extrem hochohmig. Je nach Eingangspotential leitet entweder der obere oder untere Transistor – also völlig spannungsgesteuert und damit nahezu leistungslos (zumindest im statischen Betrieb, siehe Bild 3.7 rechts).

CMOS unterscheidet sich von TTL, wie gesagt, auch durch einen erweiterten Betriebsspannungsbereich. Er reicht von 3 V bis 15 V. So kann CMOS sowohl in TTL-Schaltungen

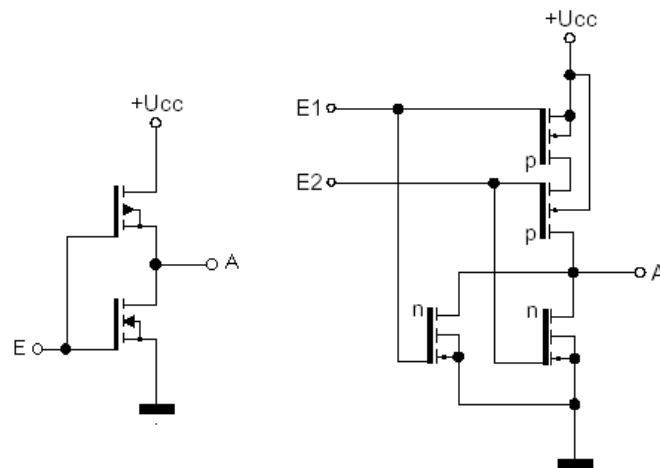


Bild 3.7: CMOS-Inverter und -NAND-Gatter

als auch in analoge Schaltungen eingebunden werden, die mit höheren Spannungen arbeiten. Wie das Bild zeigt, erkennt ein CMOS-Gatter bei 5 V Versorgungsspannung am Eingang einen 0-Pegel zwischen 0 V und 1,5 V und einen 1-Pegel zwischen 3,5 V und 5 V. Am Ausgang sind es entsprechend 0 V bis 0,05 V für „0“ und 4,95 V bis 5 V für „1“. Daraus resultiert ein Störspannungsabstand von 1,45 V. Bei 10 V Betriebsspannung vergrößert er sich beispielsweise auf 2,95 V.

Um den leicht unsymmetrischen Betrieb der CMOS-Ausgangsstufe zu kompensieren, sind ihr stets noch zwei Inverterstufen nachgeschaltet, die als Ausgangspuffer dienen und für ein symmetrisches Ausgangssignal sorgen. Für CMOS-Schaltkreise werden ausschließlich MOS-Feldeffekt-Transistoren verwendet, die als spannungsgesteuerte Schalter arbeiten. Grundbaustein aller CMOS-Gatter ist eine aus zwei komplementären MOSFET bestehende Stufe, wie sie im Bild 3.7 links zu sehen ist.

Es wirken ein n-Kanal-MOSFET und ein p-Kanal-MOSFET zusammen. Bei einem 1-Pegel am Eingang E ist der untere MOSFET leitend, der obere gesperrt und der Ausgang A mit Masse verbunden; A führt somit 0-Pegel. Wird der Eingang E an 0-Pegel gelegt, ist der untere MOSFET gesperrt und der obere leitend, Ausgang A somit mit +5 V verbunden, und der Ausgangspegel ist logisch 1. In jedem der beiden Zustände ist immer einer der beiden Transistoren gesperrt, ein Ruhestrom ist näherungsweise Null. Es fließen lediglich noch Isolations- und Sperrschichtleckströme, die nur wenige Nanoampere betragen. Lediglich im Moment des Umschaltens (Pegelwechsel) werden kurzzeitig beide MOSFETS leitend; hieraus resultiert im Umschaltmoment eine sehr kurze Stromaufnahme von wenigen Milliampere. Zu beachten ist bei digitalen CMOS-Schaltungen jedoch die kapazitive Belastung des Ausgangs. Hier wirken die Eingangskapazitäten der nachgeschalteten Gattereingänge (Gatekapazitäten) sowie Leitungskapazitäten. Diese Kapazitäten müssen im Umschaltmoment schnell umgeladen werden. Die mittlere Speisestromaufnahme des CMOS-Gatters ist somit von der Umschaltfrequenz abhängig, sie steigt mit der Frequenz. Wird dem Ausgang ein ständiger Strom entnommen oder zugeführt, so wirkt der Kanalwiderstand des jeweils leitenden Transistors. Sein Wert liegt zwischen 400 und 1000 Ω (Mittelwert etwa 600 Ω). Aus diesem Grund ist die mögliche Stromentnahme aus CMOS-Ausgängen (etwa zum Ansteuern von Transistoren usw.) auf etwa 0.1 mA begrenzt, wenn die logischen Pegel eingehalten werden müssen.

Zu erwähnen ist eine Weiterentwicklung dieser Standard-CMOS-Technik, die zu einer praktisch idealen Übergangskennlinie führt und neben anderen Vorteilen auch höhere Integrationsgrade ermöglicht, die LOCMOS-Technik (Bild 3.8). Sie arbeitet mit einem speziellen Oxydationsverfahren (Local Oxydation of Silicon CMOS). Die Vorteile liegen vor allem

in steileren Impulsflanken, geringeren Verzögerungszeiten in den Gattern und – bei gegebener Impulsfrequenz – geringeren Verlustleistungen. Merkmal aller LOCMOS-ICs ist eine zusätzliche Ausgangspufferstufe für jeden Ausgang. Das folgende Bild zeigt die erweiterte Schaltung eines NOR-Gatters in LOCMOS-Technik. Im punktierten Feld ist die dem normalen NOR-Gatter nachgesetzte Ausgangsstufe erkennbar. Sie besteht aus zwei in Serie geschalteten Invertern, die durch ihre Verstärkerwirkung die Übertragungskennlinie wesentlich versteinern.

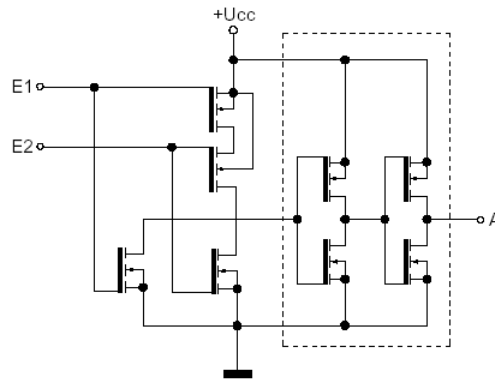


Bild 3.8: LOCMOS-Gatter

Die Eingänge von CMOS-Gattern sind, wie bei allen MOSFETs, sehr empfindlich gegen statische Aufladungen und Überspannungen und deshalb bei allen CMOS-Typen mit integrierten Gateschutzdioden weitgehend geschützt. Je nach Typ und Hersteller sind alle oder nur einige der gezeigten Bauelemente integriert. Diese Schutzbeschaltung gemäß Bild 3.9 ist an jedem CMOS-Eingang vorhanden.

Im Allgemeinen ist bei Standard-B-CMOS-Typen die Eingangsbeschaltung wie in der Abbildung vorhanden (sie wurde in den vorangegangenen Abbildungen zur besseren Übersicht fortgelassen und ist dort vor jedem Eingang E vorhanden). Die Dioden am Eingang leiten Eingangsüberspannungen negativer Polarität nach Masse, solche positiver Polarität, wenn sie die Versorgungsspannung übersteigt, nach $+U_s$ ab, wobei Vorwiderstand strombegrenzend für die Dioden wirkt. Zu beachten ist, dass für die ganz linke Diode keine Strombegrenzung besteht! Sofern der Eingang mit „systemfremden“ Quellen (Spannungen fremder Herkunft, die größer als U_s werden können, zeitweise offene Eingänge u. ä.) beschaltet wird, muss ein äußerer Vorwiderstand den Strom begrenzen. Zu beachten ist im praktischen Einsatz vor allem auch, dass unter Umständen Teile des Bausteins leitend werden, wenn die Versorgungsspannung abgeschaltet wird und die Eingangsspannung noch anliegt!

Bei der Eingangsbeschaltung besteht ein entscheidender Unterschied zwischen TTL und CMOS: Während offene TTL-Eingänge stets 1-Pegel annehmen (und man deshalb unbenutzte TTL-Eingänge offen lassen kann – sofern die Umgebung störungsfrei genug ist), stellt sich bei offen gelassenen CMOS-Eingängen eine Spannung in der Nähe der Schwellenspannung (Potential etwa in Mitte der Übergangskennlinie) ein. Es kommt damit zu undefinierten Schaltzuständen und ständiger Ruhestromaufnahme der CMOS-ICs und Schwingneigung. **Aus diesem Grund müssen unbenutzte CMOS-Eingänge stets beschaltet werden!** Man löst dies am einfachsten, indem man die funktionell gleich benutzten Eingänge parallel legt, oder es werden unbenutzte Eingänge je nach ihrer Funktion stets mit Masse (0-Pegel) oder direkt mit $+U_s$ (1-Pegel) verbunden.

Jede CMOS-Struktur besitzt einen parasitären Thyristor. Davon „merkt“ die Schaltung gewöhnlich nichts, jedenfalls solange die Eingangsspannungen den Wert der Betriebsspannung nicht über- und den Massepegel nicht unterschreiten. In diesen beiden Fällen

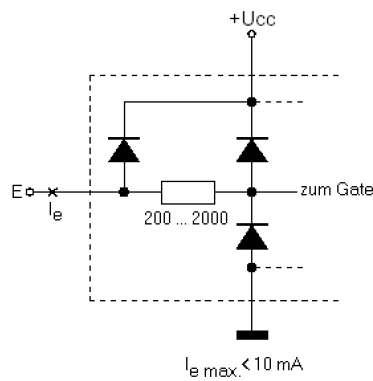


Bild 3.9: Eingangsschutz bei CMOS-Gattern

kann jedoch dieser Thyristor zünden, was bedeutet, dass zwischen der Betriebsspannung und Masse Kurzschluss herrscht. Das IC verabschiedet sich in die ewigen Elektronenjagdgründe. Man nennt dieses Verhalten „Latch-Up-Effekt“. Die Latch-Up-Thyristoren sind Nebeneffekte beim CMOS-Herstellungsprozess und können durch nichts verhindert werden.

3.2.3 TTL und CMOS koppeln

Vergleicht man die Pegeldiagramme von TTL und CMOS, so wird man feststellen, dass man einen TTL-Eingang sogar direkt an einen CMOS-Ausgang anschließen kann, denn dessen 0.05 V für „0“ und auch die 4.95 V für „1“ liegen innerhalb der entsprechenden TTL-Bereiche (Bild 3.10 rechts).

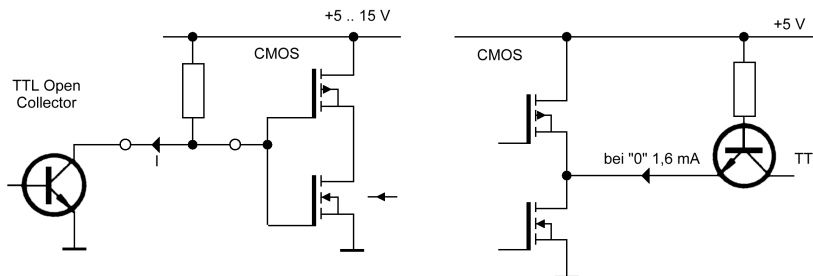


Bild 3.10: Koppelung von CMOS und TTL

Umgekehrt gilt dies jedoch nicht, denn der TTL-1-Pegel beginnt bei 2,4 V, während CMOS erst bei 3,5 V eine 1 erkennt. Der 2,4-V-TTL-1-Pegel liegt im verbotenen Bereich für CMOS. Also muss man sich einen Trick einfallen lassen. Man verwendet für diese Verbindung einen Pull-Up-Widerstand (4,7 k Ω bei 5 V) am Eingang des CMOS-Gatters vor, der das Potential am CMOS-Eingang sicher auf 1-Pegel zieht (Bild 3.10 links).

Ganz sicher geht man, indem man ein IC der 74HCT-Reihe verwendet, das nicht nur pin- und funktionskompatibel mit TTL ist, sondern auch den Pull-Up-Widerstand überflüssig macht. Die Reihen 74HCxxx und 74HCTxxx sind übrigens pin- und funktionskompatibel mit den entsprechenden TTL-Typen. Folgerichtig finden wir hier auch Typen mit offenem Drain-Anschluss als Äquivalent zum Open Collector bei TTL und auch Typen mit Tristate-Ausgang.

3.3 Takterzeugung, astabile Schaltungen

Normalerweise wird darauf geachtet, dass eine Digitalschaltung nicht ins Schwingen gerät. Wenn man jedoch einen Takt braucht, beispielsweise für einen Zähler, ist es genau umgekehrt. Astabile Schaltungen werden gezielt ins Schwingen versetzt.

Die Minimalvariante aus Bild 3.11 besteht nur aus einem speziellen Gatter, einem sogenannten „Schmitt-Trigger“, und einem frequenzbestimmenden RC-Glied. Ein Schmitt-Trigger zeichnet sich gegenüber einem normalen Gatter dadurch aus, dass ein Eingangssignal eine beliebig langsame Anstiegszeit haben darf. Bei normalen Logischaltungen wird ja ein möglichst rechteckförmiges Verhalten der Signale gefordert. Überschreitet beim Schmitt-Trigger das Eingangssignal eine bestimmte Schwelle, schaltet sein Ausgang schlagartig auf 1. Umgekehrt geschieht dasselbe: bei Unterschreiten einer Spannungsschwelle wechselt der Schmitt-Trigger-Ausgang wieder auf 0. Die beiden Schaltschwellen sind nicht identisch, so liegt beispielsweise die *Einschaltsschwelle* beim CMOS-Baustein 4093 bei 2,6 V (5 V Versorgungsspannung), die *Ausschaltsschwelle* jedoch bei 2 V. Der Baustein hat also eine *Hysterese* von 0,6 V. Mit einem Schmitt-Trigger und einem RC-Glied kann ein Taktgenerator aufgebaut werden (Bild 3.11 links).

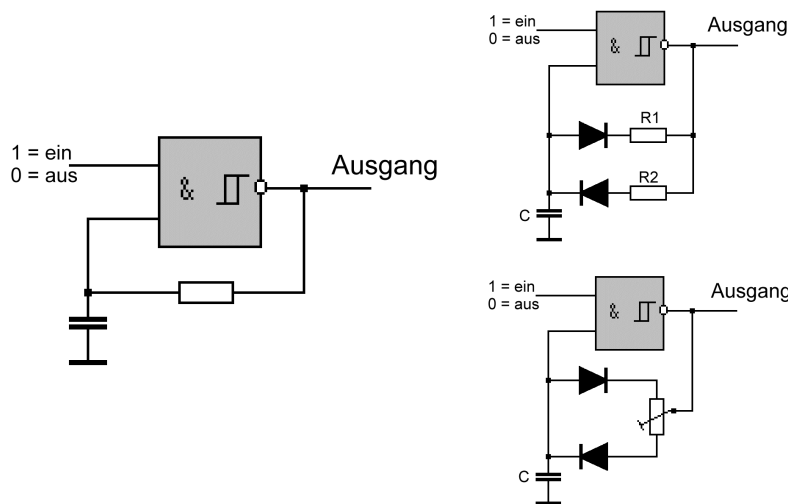


Bild 3.11: Takterzeugung mit Schmitt-Trigger

Beim Einschalten ist der Kondensator entladen, der Gattereingang also auf 0-Pegel. Der Ausgang des NAND-Gatters hat demnach 1-Pegel. Über den Widerstand wird der Kondensator geladen. Sobald die Spannungsschwelle des Schmitt-Triggers überschritten wird, wechselt der Ausgang auf 0. Nun wird der Kondensator über den Widerstand entladen, bis die untere Triggerschwelle erreicht ist; der Ausgang wird wieder 1. Das wiederholt sich nun immer wieder. Da nach dem Einschalten der Kondensator von 0 Volt aus geladen wird, danach aber die Kondensatorspannung nur zwischen den Triggerschwellen hin und her wechselt, dauert die erste Taktphase länger. Wegen der unterschiedlichen Triggerschwellen ist das Tastverhältnis auch nicht 1:1. Die Periodendauer des erzeugten Rechtecksignals beträgt etwa

$$t = F * R * C \quad (3.1)$$

mit $F = 1.1 \dots 2.0$ – je nach eingesetzter IC-Technologie (bei TTL mit 7413 beträgt der Faktor beispielsweise 1.1, der Wert von R sollte 330Ω betragen).

Nachteilig ist manchmal das unsymmetrische Tastverhältnis. Lösen lässt sich das Problem z. B. durch Wahl der doppelten Oszillatorfrequenz und ein T-Flipflop zur Signalsymmetrierung. Eine andere Möglichkeit ist die Wahl unterschiedlicher Widerstände für die Ladung

und Entladung des Kondensators entsprechend Bild 3.11 rechts. In der oberen Schaltung werden zwei Widerstände für Ladung und Entladung verwendet, die Dioden entkoppeln die Widerstände. Bei der unteren Schaltung ist das Tastverhältnis in weiten Grenzen einstellbar.

Diese Grundschaltung lässt sich bis 1 MHz einsetzen und ist damit schon recht leistungsfähig. Allerdings ist die Frequenz auch stark von den Bauteiltoleranzen und der Betriebsspannung abhängig, weshalb man bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit zum Quarzoszillator greift. Außerdem sollte man beachten:

- Bei Gattern mit mehreren Eingängen nur einen Eingang für den Oszillator verwenden; unbenutzte Eingänge auf 1 (NAND) oder 0 (NOR) legen.
- Als Puffer ein Gatter oder einen Inverter hinter den Oszillator schalten.
- Qualitativ hochwertige Kondensatoren und Widerstände verwenden (wenig Alterung, wenig Temperaturdrift).

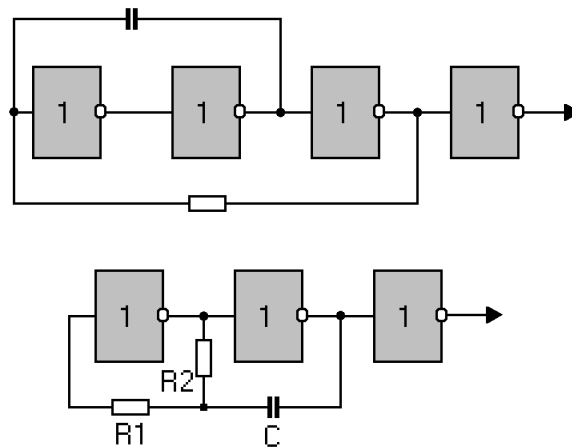


Bild 3.12: Takterzeugung mit Invertiern

Aber auch mit normalen Gattern lassen sich Oszillatoren realisieren. Die Schaltung in Bild 3.12 oben hat eine Periodendauer von etwa $T = 2 * R * C$. Dabei darf der Widerstand zwischen 300 und 1800 Ω gewählt werden. Der Kondensator kann sich zwischen 10 pF und 10 μ F bewegen, bei höheren Werten wird die Zeit ungenau. Längere Zeiten lassen sich aber durch Nachschalten eines Zählers als Frequenzteiler erreichen.

Besonders mit CMOS-Invertiern oder -Gattern lässt sich die Variante aus Bild 3.12 unten realisieren. Dabei kann R2 bis zu mehrere hundert k Ω betragen. R1 sollte ungefähr das Zehnfache von R2 betragen. Bei R1 = 1 M Ω , R2 = 150 k Ω und C = 1 nF beträgt die Frequenz etwa 1,5 kHz.

Ein Quarzoszillator erfordert einen etwas höheren Aufwand, bietet aber sehr stabile Ausgangssequenzen. Auch hier genügt zur Schwingungserzeugung ein rückgekoppeltes Gatter, das zweite Gatter dient nur zur Entkopplung und zur Flankenversteigerung der Ausgangsimpulse (Bild 3.13 links). Das frequenzbestimmende Element ist ein frequenzstabiler Quarz. Das Ganze kann durch einen kleinen Trimmer noch leicht in der Frequenz beeinflusst (gezogen) werden. Solche Grundschaltungen liegen z. B. Frequenzzählern oder Uhren zugrunde.

Für TTL-Schaltkreise sieht die Grundschaltung etwas anders aus (siehe Bild 3.13 rechts). Hier ist der Gegenkopplungswiderstand relativ klein, so dass der Baustein eigentlich schon im verbotenen Bereich zwischen 0 und 1 arbeitet und dadurch sehr leicht schwingt. Die obere Grenze für die Quarzfrequenz liegt etwa bei 16 MHz. Bei Quarzen mit niedriger

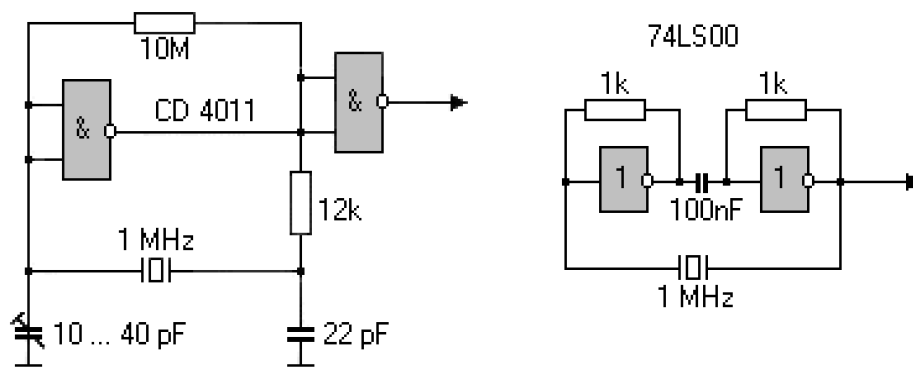


Bild 3.13: CMOS- und TTL-Quarzoszillatoren

Frequenz kann es vorkommen, dass der Oszillator auf einer Oberwelle schwingt. Dann hilft ein Dämpfungswiderstand von 5 ... 10 M Ω parallel zum Quarz.

Der *CMOS-Oszillator-Baustein CD 4060* ist ein Oszillator mit 14 nachgeschalteten binären Teilerstufen, von denen 10 Ausgänge herausgeführt sind (Q1, Q2, Q3 und Q11 fehlen). Die Ausgänge liefern Rechtecksignale, welche die Oszillatorfrequenz f_0 jeweils um den Faktor 2^n herunterteilen. Somit liefert Q_n ein Rechtecksignal, das der um 2^n geteilten Oszillatorfrequenz entspricht. Beispielsweise ist an Q_4 die durch 16 geteilte Oszillatorfrequenz verfügbar und an Q_{12} f_0 durch 4096. Der Baustein bietet den Vorteil, recht lange Periodendauern erzeugen zu können. Die Taktfrequenz selbst steht nicht zur Verfügung, weil die Oszillatoranschlüsse nicht belastet werden dürfen. Bild 3.14 zeigt die Grundschaltung.

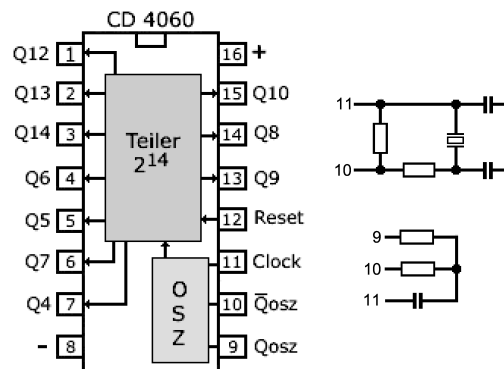


Bild 3.14: Oszillator mit CMOS CD 4060

Für den Oszillator gelten dieselben Angaben, wie sie schon oben für CMOS-Oszillatoren beschrieben wurden. Der Oszillator kann für weniger kritische Anwendungen mit einem RC-Glied beschaltet werden (Bild 3.14 rechts unten). Die frequenzbestimmenden Bauteile R1 und C1 werden dabei an die Pins 9 und 10 angeschlossen, während R2 die Rückkopplung auf das interne CMOS-Gatter an Pin 11 herstellt. Für R2 sollte man den zehnfachen Wert von R1 wählen. In dieser Betriebsart sind Frequenzen bis zu einigen 100 kHz möglich. Die Periodendauer berechnet sich ungefähr zu

$$t = 2,2 * R1 * C1 \quad (3.2)$$

Bei der Quarzbeschaltung (Bild 3.14 rechts oben) sind Oszillatorfrequenzen bis über 10 MHz möglich. Hierbei bleibt der Pin 9 frei und von den Anschlüssen 10 und 11 liegt jeweils eine kleine Lastkapazität gegen Masse, um das Anschwingverhalten zu verbessern. Diese Kapazitäten sollen zusammen etwa so groß sein wie die Eigenkapazität des Quarzes. Wenn man für beide jeweils 10 pF einsetzt, sollte es unter normalen Bedingungen keinerlei

Probleme geben. Gegebenenfalls muss parallel zum Quarz noch ein hochohmiger Widerstand (10...20 M Ω) liegen (Bedämpfung von Oberwellen).

Manchmal benötigt man neben einem Signalwechsel am Ausgang zusätzlich einen kurzen Impuls (beispielsweise eine 0-1-Flanke) als „Strobe“-Signal. So ein kurzer Impuls lässt sich leicht über die Gatterlaufzeit erzeugen, wie Bild 3.15 demonstriert. Das Eingangssignal wird einmal direkt und einmal invertiert auf die Eingänge eines NAND-Gatters geführt. Normalerweise ist der Ausgang des Gatters 1, weil die beiden Eingangssignale invers zueinander sind. Wechselt das Eingangssignal von 0 auf 1, bleibt der Ausgang des Inverters für ein paar Nanosekunden auf 1 – eben für die Dauer der Gatterlaufzeit. Demzufolge liegen beide Gattereingänge auf 1, und der Gatterausgang geht auf 0. Soll die Impulsdauer verlängert werden, kann man den einen Inverter durch eine ungerade Anzahl hintereinander geschalteter Inverter ersetzen. Die Gatterlaufzeiten addieren sich dann entsprechend.

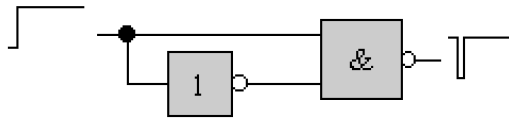


Bild 3.15: Erzeugen einer Flanke

4

Schaltungsaufbau

4.1 Löten

Wenn Sie im Löten noch nicht so geübt sind, lesen Sie bitte zuerst diese Lötanleitung, bevor Sie zum LötKolben greifen. Denn Löten will gelernt sein.

- Verwenden Sie beim Löten von elektronischen Schaltungen grundsätzlich nie Lötwasser oder Lötfett. Diese enthalten eine Säure, die Bauteile und Leiterbahnen zerstört.
- Als Lötmaterial darf nur Elektronikzinn (Zinn-Silber-Legierung) mit einer Kolophoniumseele verwendet werden, die zugleich als Flussmittel dient.
- Verwenden Sie einen kleinen LötKolben mit max. 30 Watt Heizleistung. Die Lötspitze sollte zunderfrei sein, damit die Wärme gut abgeleitet werden kann. Das heißt: Die Wärme des LötKolbens muss gut an die zu löttende Stelle geleitet werden.
- Die Lötung selbst muss zügig vorgenommen werden, denn durch zu langes Löten werden Bauteile zerstört. Zum Löten wird die gut verzinnte Lötspitze so auf die Lötstelle gehalten, dass zugleich Bauteildraht und Leiterbahn berührt werden.
- Gleichzeitig wird (nicht zuviel) Lötzinn zugeführt, das mit aufgeheizt wird. Sobald das Lötzinn zu fließen beginnt, nehmen Sie es von der Lötstelle fort. Dann warten Sie noch einen Augenblick, bis das zurückgebliebene Lot gut verlaufen ist, und nehmen dann den LötKolben von der Lötstelle ab.
- Das soeben gelötete Bauteil darf ca. drei bis fünf Sekunden, nachdem Sie den Kolben abgenommen haben, nicht bewegt werden. Zurück bleibt dann eine silbrig glänzende, einwandfreie Lötstelle.
- Voraussetzung für eine einwandfreie Lötstelle und gutes Löten ist eine saubere, nicht oxydierte Lötspitze. Denn mit einer schmutzigen Lötspitze ist es absolut unmöglich, sauber zu löten. Nehmen Sie daher nach jedem Löten überflüssiges Lötzinn und Schmutz mit einem feuchten Schwamm ab.
- Nach dem Löten werden die Anschlussdrähte direkt über der Lötstelle mit einem Seitenschneider abgeschnitten.
- Beim Einlöten von Halbleitern, LEDs und ICs ist besonders darauf zu achten, dass die maximale Lötzeit nicht mehr als ca. fünf Sekunden beträgt, da sonst das Bauteil zerstört wird. Ebenso ist bei diesen Bauteilen auf richtige Polung zu achten.

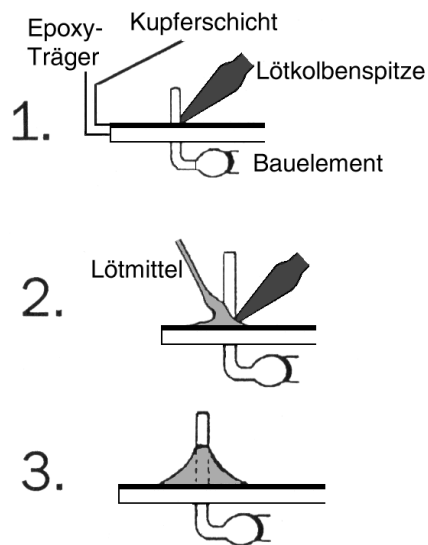


Bild 4.1: Richtig löten

- Nach dem Bestücken kontrollieren Sie grundsätzlich jede Schaltung noch einmal darauf hin, ob alle Bauteile richtig eingesetzt und gepolt sind. Prüfen Sie auch, ob nicht versehentlich Anschlüsse oder Leiterbahnen mit Zinn überbrückt wurden. Das kann nicht nur zur Fehlfunktion, sondern auch zur Zerstörung von teuren Bauteilen führen.

4.2 Fehlersuche

Fehler lassen sich durch einen gewissenhaften und sauberen Aufbau drastisch verringern. Kontrollieren Sie jeden Schritt, jede Lötstelle, bevor Sie weitermachen. Halten Sie sich an eine ggf. vorhandene Bauanleitung, und lassen Sie sich Zeit (Sie müssen ja keine Bombe entschärfen). Eine häufige Ursache für das Nichtfunktionieren ist ein Bestückungsfehler, z. B. verkehrt eingesetzte Bauteile (ICs, Dioden, Elkos). Beachten Sie auch unbedingt die Farbcodierung der Widerstände. Manche Farben sind leicht zu verwechseln. Achten Sie ebenso auf die Kondensator-Werte. Beispielsweise bezeichnet „n 10“ einen Wert von 100 pF (nicht 10 nF). Achten Sie auch darauf, dass alle IC-Beinchen wirklich in der Fassung stecken. Es passiert sehr leicht, dass sich eines beim Einstecken umbiegt.

Stimmt hier alles, dann ist als Nächstes eventuell die Schuld bei einer kalten Lötstelle zu suchen. Diese treten auf, wenn entweder die Lötstelle nicht richtig erwärmt wurde, so dass das Zinn mit den Leitungen keinen richtigen Kontakt hatte, oder wenn man beim Abkühlen die Verbindung gerade im Moment des Erstarrens bewegt hat. Derartige Fehler erkennt man meistens am matten Aussehen der Oberfläche der Lötstelle. Einzige Abhilfe ist, die Lötstelle nochmals nachzulöten.

Ist bis hierher alles in Ordnung und läuft die Sache trotzdem noch nicht, dann ist wahrscheinlich ein Bauelement defekt oder das Zusammenspiel zwischen Hard- und Software klappt nicht.

4.3 Leistungshalbleiter kühlen

In jeder elektronischen Schaltung geht Energie in Form von Wärme verloren. Jedes stromdurchflossene Bauteil setzt dem Strom einen Widerstand entgegen, und somit wird auch

Wärme frei. Problematisch wird es jetzt, wenn die Wärmemenge so groß ist, dass mehr Wärme pro Zeiteinheit erzeugt wird, als in der gleichen Zeit an die Umgebung abfließen kann – das Bauteil überhitzt und wird zerstört.

In der Regel brauchen die Ausgangstransistoren auch eine zusätzliche Kühlung durch einen Kühlkörper. Diese bestehen üblicherweise aus einem gut wärmeleitfähigen Metall, meist Aluminium oder Kupfer. Je nach Anforderungen werden Kühlkörper in den unterschiedlichsten Ausführungen hergestellt: gerippter Metallblock, gestanzte und geformte Bleche, aufsteckbare Kühlsterne und Kühlfahnen aus Aluminium oder Federbronze. Der Transistor wird durch Schrauben, Klemmen, Kleben oder Klammern befestigt.

An der Sperrschicht eines Halbleiters fällt bei Stromfluss immer eine Spannung ab. Diese liegt je nach Anwendung zwischen 0,3 V (Shottky-Diode) bis fast zur Höhe der Betriebsspannung (Verstärker-Transistor). Je nach Stromfluss wird eine Verlustleistung $P = U * I$ in Form von Wärme freigesetzt. Weil die Sperrschicht nur eine gewisse Temperatur erreichen darf, bevor sie zerstört wird, gilt es, die Verlustwärme abzuführen. Die jeweils maximale Sperrschichttemperatur ist im Datenblatt des Bauteils zu finden. Dort finden wir auch alle weiteren wichtigen Daten zur Kühlkörperberechnung. Dazu gehören die thermischen Widerstände (R_{th}) zwischen Sperrschicht und Gehäuse (R_{thj}) oder zwischen Sperrschicht und Umgebung (nur bei Verwendung ohne Kühlkörper interessant).

Zusätzlich entsteht noch ein thermischer Widerstand R_{thm} beim Übergang vom Gehäuse auf den Kühlkörper. Dieser Übergang kann mit 0,4 K/W abgeschätzt werden. Nun kann der R_{th} des Kühlkörpers (R_{thk}) bei gegebener Verlustleistung und maximaler Sperrschichttemperatur errechnet werden:

$$R_{thj} + R_{thm} + R_{thk} = \frac{T_j - T_u}{P} \quad (4.1)$$

$$R_{thk} = \frac{T_j - T_u}{P} - (R_{thj} + R_{thm}) \quad (4.2)$$

Dabei ist T_j die maximale Sperrschichttemperatur und T_u die maximale Umgebungstemperatur. Welchen Wärmewiderstand ein Kühlkörper besitzt, erfahren Sie aus seinem Datenblatt.

Im folgenden Beispiel gehen wir das Problem einmal „von hinten“ an. Ein Leistungstransistor hat laut Datenblatt folgende Werte: $T_j = 200^\circ\text{C}$, $R_{thj} = 1,5 \text{ K/W}$, R_{thm} beträgt etwa 0,3 K/W. Die maximale Umgebungstemperatur liegt bei 40°C . Die Verlustleistung beträgt 15 W. Dann ergibt sich:

$$R_{thk} = \frac{200 - 40}{15} - (1,5 + 0,3) = 8,867 \text{ K/W} \quad (4.3)$$

Im Katalog finden wir einen Fingerkühlkörper mit ca. 6 K/W, so dass noch ein kleiner Sicherheitsfaktor bleibt. Wenn Ihnen die Rechnerei zu lästig ist, finden Sie auf der Webseite zum Buch eine kleine Excel-Tabelle als Rechenhilfe. Die Tabelle berücksichtigt auch die Isolierung zwischen Transistor und Kühlkörper.

Merke: Wenn Sie den Kühlkörper anfassen und dann zählen „eins ... zwautsch“, ist er zu klein bemessen.

4.4 HF-Spulen herstellen

Für den Einsatz der Funkmodule braucht man gelegentlich eine sauber gewickelte HF-Spule. Zuerst besorgt man sich ein Stück Rundmaterial mit dem passenden Durchmesser, auf das unter scharfer Spannung die Spulenspirale – unter Hinzurechnung des erforderlichen Anfangs und Endes – Windung an Windung aufgewickelt wird. Um den richtigen

Windungsabstand herzustellen, schraubt man, wie es Bild 4.2 zeigt, ein Stück Pappe oder Plastik (das etwa so dick wie der Draht ist) durch die Spule hindurch. Der Windungsabstand wird nun nahezu genau so groß wie die Dicke der Pappe. Die Spule sieht sehr gleichmäßig aus. Um die Politur des Drahtes zu schonen und ein Verkratzen zu vermeiden, kann man ein Stückchen Stoff beilegen. Genauso kann man beim Ausbiegen von Anfang und Ende der Spule verfahren.

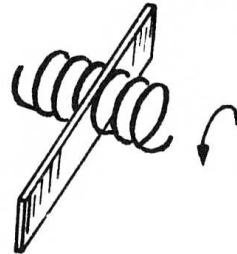


Bild 4.2: Herstellen des gleichmässigen Windungsabstandes

5

Sicherheitshinweise

Beim Umgang mit Produkten, die mit elektrischer Spannung in Berührung kommen, müssen die gültigen VDE-Vorschriften beachtet werden, insbesondere VDE 0100, VDE 0550/0551, VDE 0700, VDE 0711 und VDE 0860. Vor allem für Spannungen über 24 Volt gilt:

Vor Öffnen eines Gerätes stets den Netzstecker ziehen oder sicherstellen, dass das Gerät stromlos ist. Bauteile, Baugruppen oder Geräte dürfen nur in Betrieb genommen werden, wenn sie vorher berührungssicher in ein Gehäuse eingebaut wurden. Während des Einbaus müssen sie stromlos sein. Werkzeuge dürfen bei Geräten, Bauteilen oder Baugruppen nur benutzt werden, wenn sichergestellt ist, dass die Geräte von der Versorgungsspannung getrennt sind und elektrische Ladungen, die in den im Gerät befindlichen Bauteilen gespeichert sind, vorher entladen wurden. Spannungsführende Kabel oder Leitungen, mit denen das Gerät, ein Bauteil oder eine Baugruppe verbunden sind, müssen stets auf Isolationsfehler oder Bruchstellen hin untersucht werden.

Die Inbetriebnahme darf grundsätzlich nur erfolgen, wenn die Schaltung absolut berührungssicher in ein Gehäuse eingebaut ist. Sind Messungen bei geöffnetem Gehäuse unumgänglich, so muss aus Sicherheitsgründen ein Trenntrafo zwischengeschaltet oder die Spannung über ein geeignetes Netzteil (das den Sicherheitsbestimmungen entspricht) zugeführt werden. Alle Verdrahtungsarbeiten dürfen nur im spannungslosen Zustand ausgeführt werden.

Vor der Inbetriebnahme eines Gerätes ist generell zu prüfen, ob dieses Gerät oder diese Baugruppe grundsätzlich für den jeweiligen Anwendungsfall und Einsatzort geeignet ist bzw. eingesetzt werden kann. Im Zweifelsfall sind unbedingt Rückfragen bei Fachleuten, Sachverständigen oder den Herstellern der verwendeten Baugruppen notwendig!

A

Literatur

- Dieter Zastrow: *Elektronik*, Vieweg-Verlag
- G. Koß, W. Reinhold, F. Hoppe: *Lehr- und Übungsbuch Elektronik*, Fachbuchverlag Leipzig
- U. Tietze, Ch. Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer-Verlag
- Helmut Lindner: *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*, Hanser
- E. Prohaska: *Digitaltechnik für Ingenieure*, Oldenbourg
- Ch. Siemers, A. Sikora: *Taschenbuch der Digitaltechnik*, Hanser
- Don Lancaster: *Das CMOS-Kochbuch*, VMI Buch AG
- Don Lancaster: *TTL-Cookbook*, Sams Publishing
- Hans-Dieter Stölting, Eberhard Kallenbach: *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*, Hanser
- Elmar Schrüfer: *Elektrische Messtechnik*, Hanser
- *Zeitschrift Elektor*, Elektor-Verlag, Aachen
- *Elrad-Archiv 1977–1997 DVD*, eMedia GmbH, Hannover

Stichwortverzeichnis

A		
astabile Schaltungen	27	
Automat	18	
C		
CD 4060	29	
CMOS	23	
CMOS und TTL koppeln	26	
D		
Digitale Schaltkreise	17	
Digitaltechnik	17	
Diode	7	
Drehkondensator	6	
E		
E12-Reihe	5	
Elektrolytkondensator	6	
F		
fan-out	22	
Farbcode	5	
Fehlersuche	32	
Feldeffekt-Transistor	8, 23	
Festspannungsregler	13	
FET	23	
G		
Gleichrichter	7	
H		
HF-Spulen herstellen	33	
K		
Kühlkörper	32	
Kondensator	6	
L		
Löten	31	
LED	7	
Leistungshalbleiter kühlen	32	
Leuchtdiode	7	
Logische Grundfunktionen	18	
Logische Verknüpfung	17	
M		
Metall-Oxid-Silizium	23	
MOS	23	
O		
Open Collector	21	
P		
Potenziometer	6	
Q		
Quarzoszillator	28	
S		
Schaltkreise, digitale	17	
Schaltkreisfamilien	20	
Schaltnet	18	
Schaltwerk	18	
Spannungsregler	13	
Spannungsversorgung	13	
T		
Takterzeugung	27	
Thyristor	10	
Transistor	8	
Transistor, FET	8	
Transistor, NPN	8	
Transistor, PNP	8	
Transistor-Transistor-Logik	20	
Triac	10	
Trimmer	6	
TTL	20	
TTL und CMOS koppeln	26	
TTL-Daten	22	
TTL-Gatterlaufzeiten	22	
W		
Widerstand	5	
Z		
Z-Diode	7	