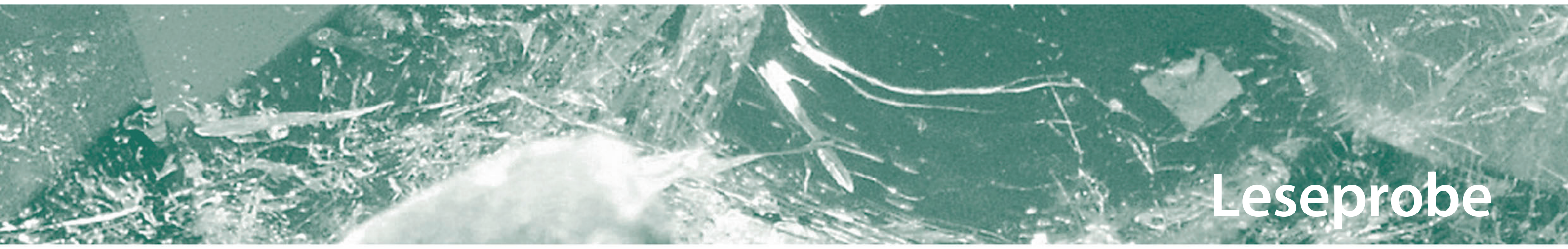

Hoier

Digitale Schaltungstechnik

ELEKTROTECHNIK/ELEKTRONIK

Studienbrief 2-050-1005

1. Auflage 2017

HDL
HOCHSCHULVERBUND DISTANCE LEARNING

Impressum

Verfasser: Bernhard **Hoier** Prof. Dr.-Ing.

Professor für Kommunikationstechnik
im Fachbereich Technik
an der Technischen Hochschule Brandenburg

Der Studienbrief wurde auf der Grundlage des Curriculums für das Studienfach „Elektrotechnik/Elektronik" verfasst. Die Bestätigung des Curriculums und des Studienbriefes erfolgte durch den

Fachausschuss Wirtschaftsingenieurwesen,

dem Professoren und Dozenten von HDL-Mitglieds- und kooperierenden Hochschulen als Mitglieder angehören.

1. Auflage 2017 ISBN 978-3-86946-219-6

Redaktionsschluss: Juni 2017 Studienbrief 2-050-1005

Service-Agentur des HDL
(Hochschulverbund Distance Learning)

c/o Agentur für wissenschaftliche Weiterbildung und Wissenstransfer e. V.
Magdeburger Straße 50, 14770 Brandenburg

Tel.: 0 33 81 - 35 57 47 E-Mail: vertrieb@aww-brandenburg.de
Fax: 0 33 81 - 35 57 49 Internet: http://www.aww-brandenburg.de

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

Physikalische Größe	Formelzeichen	Einheitenzeichen	Physikalische Einheit
Kapazität	C	1 F = 1 As/V	Farad
Urspannung im Zweipol	E	V	
Frequenz	f	1 Hz = 1/s	Hertz
Ausgangslastfaktor	F_{LA}		
Eingangslastfaktor	F_{LE}		
Strom	I	A	Ampere
Kollektorstrom	I_C	A	
Kollektorreststrom	I_{CE0}	A	
maximaler Kollektorstrom	I_{Cmax}	A	
Eingangsstrom	I_E	A	
typischer Eingangsstrom	I_{Etyp}	A	
mittlere Stromaufnahme	I_{mittel}	A	
Induktivität	L	1 H = 1 Vs/A	
Leistung	P	W	Watt
Verlustleistung	P_V	W	
maximale Verlustleistung	P_{Vmax}	W	
Widerstand	R	Ω	Ohm
Ausschaltwiderstand	R_{aus}	Ω	
Einschaltwiderstand	R_{ein}	Ω	
Lastwiderstand	R_L	Ω	
Störabstand bei H-Pegel	S_H		
Störabstand bei L-Pegel	S_L		
Zeit	t	s	Sekunde
Impulsanstiegszeit	t_A	s	
Ausschaltverzögerungszeit	t_{AV}	s	
Einschaltverzögerungszeit	t_{EV}	s	
Impulsabfallzeit	t_F	s	
mittlere Verzögerungszeit	t_m	s	
Spannung	U	V	Volt
Ausgangsspannung	U_A	V	

Ausgangsspannung bei H-Pegel	U_{AH}	V	
Ausgangsspannung bei L-Pegel	U_{AL}	V	
Basis-Emitter-Spannung	U_{BE}	V	
Kollektor-Emitter-Spannung	U_{CE}	V	
maximale Kollektor-Emitter-Spannung	U_{CEmax}	V	
Kollektor-Emitter-Sättungsspannung	U_{CEsat}	V	
Eingangsspannung	U_E	V	
Eingangsspannung bei H-Pegel	U_{EH}	V	
Eingangsspannung bei L-Pegel	U_{EL}	V	
Hilfsspannung	U_H	V	
Betriebsspannung	U_S	V	

Einleitung

Unser heutiges Leben ist ohne digitale Signalverarbeitung in der Technik nicht mehr denkbar. In fast allen Bereichen sind elektronische Systeme als Hardware und zur Problemstellung passende Software zu finden.

Bereiche der Technik, wie z. B. die Informationstechnik, die Automatisierungstechnik, die Nachrichtentechnik, die Messtechnik, sind uns geläufig. Wir benutzen Produkte, wie Smartphones, Tablets, Computer, Radio und Fernsehen, alltäglich. Selbstverständlich ist auch eine funktionierende Infrastruktur, wie z. B. die Versorgung mit Wasser und Elektroenergie.

In der Industrie werden die Abläufe digital gesteuert.

- Diese Systeme haben eine gemeinsame Basis. Sie setzt sich aus den Grundelementen der Digitaltechnik zusammen, die Gegenstand dieses Studienbriefes sind.
- Zunächst soll eine einführende Betrachtung zur digitalen Signalverarbeitung den Problemkreis eingrenzen.
- Zahlensysteme und Codierungen sind notwendig, um die konkreten Aufgaben zu verallgemeinern und einer Lösung zuzuführen.
- Die Schaltalgebra gibt die mathematischen Regeln für den Umgang mit der Digitaltechnik vor.
- Komplexe kombinatorische Schaltungen, elementare sequentielle Schaltungen und komplexe sequentielle Schaltungen sind die typischen Grundbaugruppen der Digitaltechnik.
- Auch Digitalhardware lässt sich programmieren. Programmierbare Logiksysteme sind heute das typische Werkzeug der Elektroniker.
- Aktive elektronische Bauelemente im Schalterbetrieb, wie z. B. Transistoren, sind die Grundelemente der Schaltkreistechniken, deren Aufbau und Kenngrößen an typischen Vertretern dargestellt wird.

Studienziele

Folgende Studienziele sollen mit diesem Studienbrief erreicht werden:

- Kennenlernen der grundlegenden Begriffe, des Aufbau, der Wirkungsweise und der Kennwerte der elementarer logischer Gatter
- Kenntnis von kombinatorischen und sequentiellen Grundschaltungen der Digitaltechnik
- Fähigkeit zur Analyse, Synthese und Optimierung von einfachen Schaltnetzen und Schaltwerken
- Kennenlernen von digitalen Schaltkreisfamilien und Halbleiterspeichern

Literaturempfehlungen

Ergänzend zum Studienbrief und den Präsenzveranstaltungen werden folgende Bücher zum Selbststudium empfohlen:

- URBANSKI, K./WOITOWITZ, R. (2012): Digitaltechnik: Ein Lehr- und Übungsbuch. Springer Verlag.
- WÖSTENKÜHLER, G. (2012): Grundlagen der Digitaltechnik – Elementare Komponenten, Funktionen und Steuerungen. Hanser Fachbuch.
- FRICKE, K. (2014): Digitaltechnik. Springer Vieweg.
- BEUTH, K. (2006): Digitaltechnik. Vogel Fachbuch.

1 Einführende Betrachtung zur digitalen Signalverarbeitung

Klärung der Frage: Wodurch unterscheiden sich analoge und digitale Signalverarbeitung?

In der Elektronik hat ein Prozess der Verdrängung der Analogtechnik aus der Verarbeitung der Informationen stattgefunden. Stattdessen werden die Informationen mit digitalen Mitteln verarbeitet. Analoge Systeme findet man in den Bereichen von Sensoren und Aktoren zur Wandlung nicht elektrischer in elektrische Größen und umgekehrt.

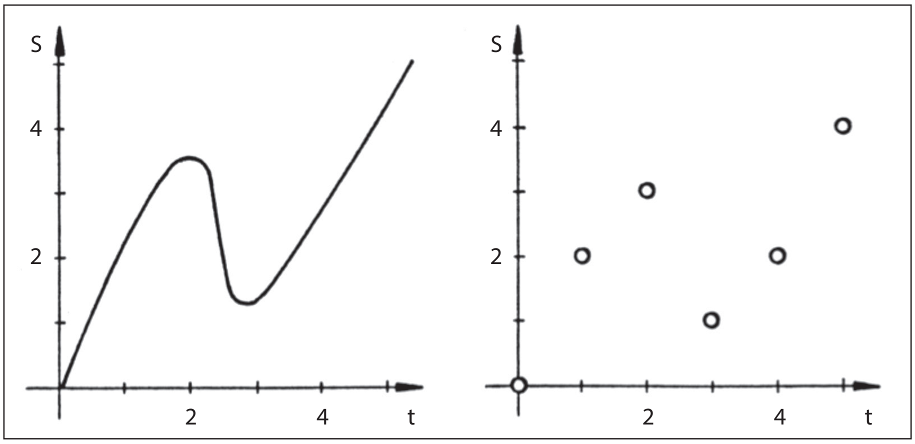

Bild 1.1 Analoges und digitales Signal

Definition

Der Begriff „analoge Signalverarbeitung" sagt aus, dass werte- und zeitkontinuierliche Strom- und Spannungsverläufe mittels linearer und nicht linearer elektronische Bauelemente verändert werden.

Die Ergebnisse bleiben werte- und zeitkontinuierlich. Beispiele sind Verstärker, Modulatoren und analoge Filter. Bild 1.1 zeigt links den kontinuierlichen Verlauf am Beispiel einer analogen Zeitfunktion. Zu jedem Zeitpunkt ist ein Wert definiert, typisch für die „analoge Welt".

Definition

Der Begriff „digitale Signalverarbeitung" sagt aus, dass werte- und zeitdiskontinuierliche Signale mittels digital arbeitender elektronischer Bauelemente verändert und gespeichert werden.

Die Ergebnisse bleiben werte- und zeitdiskontinuierlich. Beispiele sind Codierer, Adder und Speicherregister. Bild 1.1 zeigt rechts den diskontinuierlichen Verlauf am Beispiel einer digitalen Zeitfunktion. Die Werte sind nur zu bestimmten Zeitpunkten definiert, typisch für die „digitale Welt".

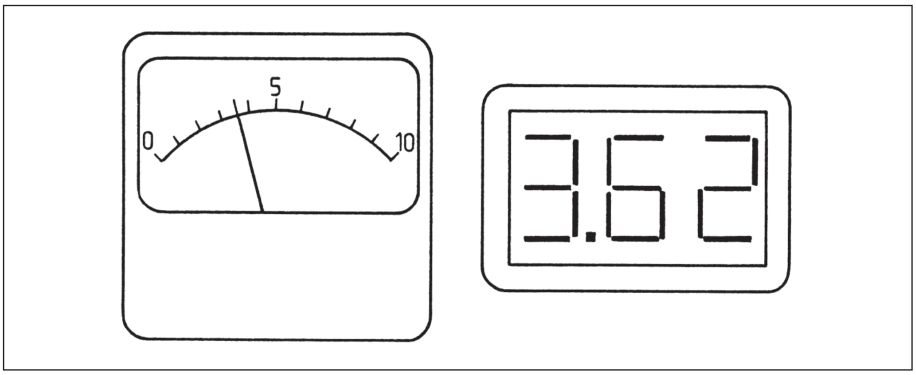

Bild 1.2 Analoge und digitale Messgeräteanzeigen

Analoge und digitale Messgeräte (Bild 1.2) illustrieren den Unterschied. Während die Genauigkeit der digitalen Anzeige (Beispiel rechts) auf drei Stellen begrenzt ist, überstreicht der analoge Zeiger (links) alle Werte zwischen 0 und 10. Allerdings kann man sie durch die beschränkte Auflösung des Auges, der Reibung im Messgerät und der Genauigkeit der Mechanik ebenfalls nicht beliebig genau ablesen.

Bild 1.3 Digitale Signalverarbeitungskette

- In der Signalverarbeitungskette (Bild 1.3) werden werte- und zeitkontinuierliche Strom- und Spannungsverläufe zunächst in werte- und zeitdiskontinuierliche Verläufe gewandelt (Analog-Digital-Umsetzung).
- Danach werden die Abtastwerte mittels digitaler elektronischer Baugruppen verändert (digitale Signalverarbeitung).
- Um die Ergebnisse wieder nutzen zu können, werden sie in werte- und zeitkontinuierliche Strom- und Spannungsverläufe zurückgewandelt (Digital-Analog-Umsetzung).

Abgetastete analoge Werte werden in der Digitaltechnik typischerweise binär codiert. Man kennt nur die Werte „0“ und „1“. Die binäre Codierung ist sinnvoll, da Elektronik zur Verarbeitung zweiwertiger (binärer) Signale perfekt geeignet ist. Die Schalterzustände „AUS“ und „EIN“ können die mathematischen binären Werte „0“ und „1“ repräsentieren. Jeder Binärstelle (Bit) des codierten Wertes kann somit ein elektronischer Repräsentant zugeordnet werden (Datenleitung, Busleitung, Registerzelle, Speicherzelle).

Beispiel

B 1.1 Im digitalen Signal von Bild 1.1 (Beispiel rechts) treten an der *x*- und der *y*-Achse nur die dezimalen Werte 0 bis 5 auf. Tabelle 1 zeigt, wie diese 6 Dezimalzahlen durch dreistellige binär codierte Zahlen dargestellt werden können.

t	S_{bin}
0	000
1	010
2	011
3	001
4	010
5	100

Tabelle 1.1 Beispiel: binär codiertes Signal aus Bild 1.1

Das folgende Kapitel „Zahlensysteme und Codierungen" behandelt die in der Digitaltechnik typischen Zahlensysteme und die meistgenutzten Codierungen sowie die binären Rechenregeln.

2 Zahlensysteme und Codierungen

Die Digitaltechnik besitzt eigene typische Zahlensysteme. Anders als beim üblichen Dezimalsystem basieren sie auf der Zahl 2 und den Zweierpotenzen 8 und 16. Das Binär-, das Oktal- und das Hexadezimalsystem werden vorgestellt.

Definition

Unter einer Codierung versteht man eine Vorschrift, wie man ein Zeichen aus einem ersten Zeichenvorrat eindeutig einem Zeichen oder einer Zeichenkombination eines zweiten Zeichenvorrats zuordnet.

Beispielsweise kann man den dezimalen Ziffern „0" bis „9" jeweils eine Kombination aus vier binären Ziffern (0 und 1) zuordnen. Es entsteht die Binärcodierung.

Die vier gebräuchlichsten Codierungen der Digitaltechnik sind Gegenstand dieses Kapitels.

Jedes Zahlensystem hat seine algebraischen Regeln. Das gilt auch für das Binärsystem. In diesem Kapitel werden die binären Rechenregeln für Addition und Multiplikation eingeführt.

2.1 Binäres Zahlensystem

Das Binärsystem ist ein Positionssystem mit zwei Symbolen [0,1] pro Position. Die Begriffe „binär" oder „dual" stammen aus dem Lateinischen, der Begriff „dyadisch" aus dem Griechischen und bedeuten jeweils, sich auf die 2 beziehend. Mittels Binärsystem lässt sich die mathematische Form technisch am effektivsten umsetzen.

Binärzahlen werden durch eine Polynomfunktion zur Basis 2 gebildet. Die Koeffizienten sind entweder „0“ oder „1“.

Beispiel

B 2.1 Den Aufbau einer Binärzahl erkennt man am folgenden Beispiel der dezimalen Zahl 22:

$$10110_{bin} = 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \; (= 22_{dez})$$

Jeder Position in der Summe ist die Wertigkeit einer Zweierpotenz zugeordnet. Durch Multiplikation mit 1 oder 0 wird das Gewicht der Stelle der Summe hinzugefügt oder nicht.

Im Binärsystem heißt eine Binärstelle Binary Digit oder Bit. Im binären Positionssystem lassen sich beliebige Zahlenwerte ausdrücken. Die Tabelle 2.1 stellt die dezimalen Zahlen 0 bis 15 ihren binären Repräsentanten gegenüber. Dieses Grundprinzip ist die sogenannte Binärcodierung.

Binär	Dezimal	Binär	Dezimal
0000	0	1000	8
0001	1	1001	9
0010	2	1010	10
0011	3	1011	11
0100	4	1100	12
0101	5	1101	13
0110	6	1110	14
0111	7	1111	15

Tabelle 2.1 Die ersten 16 Binärzahlen (Binärcodierung)

Die Umrechung der Zahlensysteme zwischen Binär-, Oktal- (Abschnitt 2.2) oder Hexadezimalsystem (Abschnitt 2.3) zum Dezimalsystem hin erfolgt nach der jeweiligen Definitionsgleichung.

Die Umrechnung vom Dezimalsystem ins Binär-, Oktal- oder Hexadezimalsystem erfolgt durch eine schrittweise ausgeführte Subtraktion. Es wird geprüft, wie oft der jeweils höchste Stellenwert in der Zahl enthalten ist. Dieses Ergebnis, multipliziert mit dem Stellenwert, wird von der verbleibenden Zahl subtrahiert. Mit dem Rest wird mit dem nächstniedrigen Stellenwert in gleicher Weise verfahren, bis die niederwertigste Stelle erreicht ist.

2.2 Hexadezimales Zahlensystem

Der Begriff „hexadezimal“ bedeutet, sich auf die 16 beziehend. Das Hexadezimalsystem ist ein Positionssystem mit den 16 Symbolen [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F] pro Position. Für die Zeichen „A“ bis „F“ gilt $A_{hex} = 10_{dez}$, $B_{hex} = 11_{dez}$, $C_{hex} = 12_{dez}$, $D_{hex} = 13_{dez}$, $E_{hex} = 14_{dez}$, $F_{hex} = 15_{dez}$.

Hexadezimalzahlen werden durch eine Polynomfunktion zur Basis 16 gebildet. Die Koeffizienten sind die 16 Symbole.

Beispiel

B 2.2 Der Aufbau einer Hexadezimalzahl ist am folgenden Bildungsgesetz erkennbar für die dezimale Zahl 237918:

$3A15E_{hex} = 3 \cdot 16^4 + A \cdot 16^3 + 1 \cdot 16^2 + 5 \cdot 16^1 + E \cdot 16^0$ oder

$3A15E_{hex} = 3 \cdot 65536 + 10_{dez} \cdot 4096 + 1 \cdot 265 + 5 \cdot 16 + 14_{dez} \cdot 1$

$(= 237918_{dez})$

Hexadezimalzahlen und Binärzahlen sind über die Zweierpotenzen miteinander verwandt. Eine Hexadezimalstelle ersetzt vier Binärstellen (Tetraden) vollständig. Der Nutzen der Hexadezimalzahlen besteht darin, dass vielstellige Binärzahlen, als Hexadezimalzahlen dargestellt, für den Menschen besser les- und merkbar sind.

Dezimal	Hexa-dezimal	Binär-tetrade	Dezimal	Hexa-dezimal	Binär-tetrade
0	0	0000	8	8	1000
1	1	0001	9	9	1001
2	2	0010	10	A	1010
3	3	0011	11	B	1011
4	4	0100	12	C	1100
5	5	0101	13	D	1101
6	6	0110	14	E	1110
7	7	0111	15	F	1111

Tabelle 2.2 Die ersten 16 Hexadezimalzahlen

Beispiel

B 2.3 Umrechnung von Binär- in Hexadezimalzahl

Beispielzahl: $11011100101001101011001_{bin}$

Aufteilung in Binärtetraden: $0110\ 1110\ 0101\ 0011\ 0101\ 1001_{bin}$

Ersetzen durch Hexadezimalziffern: $6E5359_{hex}$

Beispiel

B 2.4 Umrechnung von Hexadezimal- in Binärzahl

Beispielzahl: $1FA30B_{hex}$

Ersetzen durch Binärtetraden: $0001\ 1111\ 1010\ 0011\ 0000\ 1011_{bin}$

Zusammenfügen der Binärzahl: $000111111010001100001011_{bin}$

Beispiel

B 2.5 Hexadezimalzahlen in der Computertechnik

In der Computertechnik sind die Begriffe Byte, Halbbyte und Bit gebräuchlich. Hexadezimalzahlen sind zur Darstellung von Bytes in der Informationstechnik gut geeignet.

Byte (8-stellige Binärzahl, Bitdarstellung): 10010111_{bin}

Aufteilung in ein höher- und ein niederwertiges Halbbyte:
$1001\ \ 0111_{bin}$

Ersatz durch eine zweistellige hexadezimale Zahl: 97_{hex}

Beispiel

B 2.6 Adressen im Internetprotokoll 4

Adressen im Internetprotokoll 4 (IP4-Adresse) sind vier Byte lang. Nachfolgend ein IP-Adressbeispiel dezimal, hexadezimal und binär dargestellt:

IP4 dezimal: $168.255.70.3_{dez}$

IP4 hexadezimal: $A8.FF.46.03_{hex}$

IP4 binär: $1010\ 1000\ .\ 1111\ 1111\ .\ 0100\ 0110\ .\ 0000\ 0011_{bin}$

2.3 Oktales Zahlensystem

Der Begriff „oktal" bedeutet, sich auf die 8 beziehend. Das Oktalsystem ist ein Positionssystem mit den acht Symbolen [0,1,2,3,4,5,6,7] pro Position.

Oktalzahlen werden durch eine Polynomfunktion zur Basis 8 gebildet. Die Koeffizienten sind die acht Symbole.

Beispiel

B 2.7 Der Aufbau einer Oktalzahl ist am folgenden Bildungsgesetz für die Dezimalzahl 94681 erkennbar :

$$270731_{okt} = 2 \cdot 85 + 7 \cdot 84 + 0 \cdot 83 + 7 \cdot 82 + 3 \cdot 81 + 1 \cdot 80\ (= 94681_{dez})$$

Oktalzahlen und Binärzahlen sind über die Zweierpotenzen miteinander verwandt. Eine Oktalstelle ersetzt drei Binärstellen (Triaden) vollständig. Der Nutzen der Oktalzahlen besteht darin, dass vielstellige Binärzahlen, als Oktalzahlen dargestellt, für den Menschen besser les- und merkbar sind.

Dezimal	Oktal	Binärtriade
0	0	000
1	1	001
2	2	010
3	3	011
4	4	100
5	5	101
6	6	110
7	7	111

Tabelle 2.3 Die ersten 8 Oktalzahlen

B 2.8 Umrechnung von Binär- in Oktalzahl

Beispiel

Beispielzahl: $11011100101001101011001_{bin}$

Aufteilung in Binärtriaden: $011\ 011\ 100\ 101\ 001\ 101\ 011\ 001_{bin}$

Ersetzen durch Oktalziffern: 33451531_{okt}

B 2.9 Umrechnung von Oktal- in Binärzahl

Beispiel

Beispielzahl: 37002514_{okt}

Ersetzen durch Binärtriaden:

$011\ 111\ 000\ 000\ 010\ 101\ 001\ 100_{bin}$

Zusammenfügen der Binärzahl: $011111000000010101001100_{bin}$

2.4 Wichtige Binärcodierungen

2.4.1 Binärcode

Der Binärcode (Dualcode) ordnet die Zahlen nach dem binären Zahlensystem. Codiert man natürliche Zahlen binär, dann steht das niederwertigste Bit rechts und hat die Stellenwertigkeit 2^0. Die Binärcodierung ist für digitale Rechenoperationen sehr gut geeignet. Die Codierung ist effizient. Sie hat keine Redundanz. Beispiele der Binärcodierung sind in Tabelle 2.4 enthalten.

2.4.2 Graycode

Der Graycode ist eine Codierung ohne Stellenwertigkeit. Er entsteht durch Spiegelung der Bitkombinationen bei Hinzunahme einer 1 in der nächsthöherwertigen Stelle. Er ist ein einschrittiger Code, das heißt, aufeinanderfolgende Codewörter unterscheiden sich nur in einer Stelle (Hammingdistanz = 1). Er ist deshalb insbesondere geeignet zur Messwerterfassung, jedoch ungeeignet für Rechenoperationen. Beispiele der Graycodierung sind in Tabelle 2.4 enthalten.

2.4.3 BCD-Code

Die Abkürzung BCD bedeutet binary coded decimal und dient dem Codieren mehrstelliger Dezimalzahlen. Das dezimale Positionssystem bleibt erhalten. Der 8-4-2-1-BCD-Code (auf Binärcode basierend) stellt jede Dezimalstelle (..., Hunderter, Zehner, Einer, ...) durch eine binär codierte Tetrade dar. Die Tetraden 0 bis 9 werden benutzt. Die Tetraden 10 bis 15 bleiben unbenutzt. Sie werden als Pseudotetraden bezeichnet. Es sind andere BCD-Code-Varianten möglich, die nicht mehr gebräuchlich sind.