1 Einleitung

Digitaltechnische Realisierungen sind in der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Man ist es gewohnt, Handy und Digitalfernseher zu verwenden. Die Funktionsweise ist den meisten Benutzern nicht bekannt und wird für die Benutzung digital arbeitender Geräte auch nicht benötigt. Technikinteressierte möchten jedoch mehr über die Funktionsweise wissen. Hierzu könnte man ein komplexes digitaltechnisches Gerät in seine Funktionsgruppen und weiter in seine Einzelkomponenten auflösen und deren Wirkungsweise vertiefen (**Top-Down Design**). Anschließend weiß man, wie dieses Gerät funktioniert, aber die Anpassung der Signalverarbeitung für weitere Anwendungen wurde nicht trainiert. Dieses Buch verwendet die andere Entwurfsrichtung. Basierend auf den Grundelementen wird deren Zusammenschaltung zu einfachen Funktionsgruppen beschrieben und erläutert, sodass hieraus komplexere Geräte oder deren Komponenten für verschiedene Anwendungen erstellt werden können (**Bottom-Up Design**). Dieses Buch beschreibt die rudimentären Elemente und grundlegenden Funktionsgruppen der Digitaltechnik. In der Einleitung werden Begriffe erläutert.

1.1 Analoge und digitale Darstellungsformen

1.1.1 Analoge Größendarstellung

Viele uns bekannte Größen sind analoger Natur. Hierunter fallen u. a. Abstand, Temperatur, elektrische Spannung etc. Zur Beschreibung dieser Größen wurden analoge Darstellungen verwendet, wie Länge an einem Referenzmaßstab (Metermaß), Flüssigkeitsthermometer, Zeigerinstrumente etc. Die verwendeten Werteangaben in diesem Bereich gehören zu den reellen Zahlen $\mathbb{R}$. Die Zuordnung zwischen Messwert (z. B. elektrische Spannung) und Darstellungswert (z. B. Winkel der Zeigerposition) ist eine kontinuierliche Funktion. Bild 1.1 zeigt beispielhaft den Zusammenhang einer analogen Abbildungsfunktion. Theoretisch könnte bei unendlicher Genauigkeit vom Anzeigewert auf den exakten verursachenden Messwert zurückgeschlossen werden. Grenzen sind durch die Ablesegenauigkeit gegeben, die häufig bei der dritten Stelle aufhört. Bei Mess- und Übertragungssystemen gibt es noch den unteren und oberen Grenzwert, die den Wertebereich der Anordnung vorgeben. Vorteil der analogen Darstellung ist u.a. die schnelle Erfassung sowie die Erkennung von Tendenzwerten (z.B. bei analoganzeigenden Messgeräten). Dieser Vorteil wird häufig bei der analogen Ausgabe digitaler Größen verwendet, wie z.B. bei der analoganzeigenden Digitaluhr.

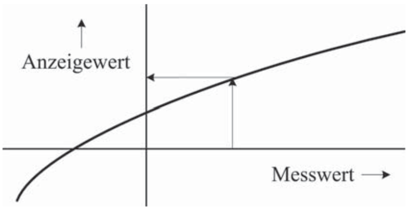

Bild 1.1
Abbildungsfunktion analog → analog

1.1.2 Digitale Größendarstellung

Die Bezeichnung „digital“ kommt aus dem Lateinischen (lat.: digitus: Finger (oder Zehe), zählen mit den Fingern). Sie beschreibt eine diskrete Größendarstellung, also eine abzählbare Menge. Einige Größen sind zählbar (z.B. Anzahl von Eiern (Grundmenge ein Ei)), andere werden durch Quantisierung analoger Größen in zählbare digitale Einheiten unterteilt (z.B. Gewichtsklassen von Eiern (Klassen S, M, L oder XL)). Verwendet man sehr viele Klassen oder Stufen (z.B. bei Digitalwaagen), so erhält man bei vernachlässigbarer Klassenbreite bzw. Stufenhöhe einen nahezu kontinuierlichen Verlauf (ähnlich der analogen Abbildung). Bild 1.2 zeigt den Zusammenhang einer digitalen Abbildungsfunktion. Bestimmte Wertebereiche werden einem Digitalwert (einer Stufe) zugeordnet. Die Werteangaben vom Messwert gehören zu den rellen Zahlen $\mathbb{R}$ (kontinuierliche, analoge Größe) und die Angaben vom Anzeigewert zu den ganzen Zahlen $\mathbb{Z}$ (diskrete, digitale Größe). Eine exakte Rekonstruktion des verursachenden Analogwertes ist hierbei prinzipiell nicht möglich, da ein Digitalwert immer einen Bereich der analogen Eingangsgröße abdeckt. Bei der Rekonstruktion wird normalerweise der Mittelwert des Wertebereiches der Stufe als Näherungswert verwendet. Ein anschaulicher Vergleich von analogen und digitalen Größen ist eine Treppe mit einer mitgeführten Fahrradrampe. Die Rampe gibt einen analogen Wert der Höhendifferenz wieder und die Stufen einen digitalen. Zu jeder digitalen Stufe gehört ein Bereich der zugehörigen analogen Höhendifferenz.

Eine häufig zu findende Darstellung entspricht Bild 1.3. Der Messwert in dem Bereich von X_{min} bis X_{max} wird in N äquidistante (gleichgroße) Bereiche mit der Breite Q unterteilt. Das **Quant Q** ist normalerweise $Q = (X_{max} - X_{min})/N$.

Der Digitalwert wird durch eine Zahl repräsentiert (Zahlendarstellungen werden im nächsten Unterkapitel erläutert), in der digitalen Welt ist dies häufig eine Dualzahl. Die Dualzahl besteht aus J binären Stellen, wodurch sich eine maximal verwendbare Anzahl von $N = 2^J$ Stufen ergibt. In Bild 1.3 ist dieser Zusammenhang mit einem 3-stelligen Dualcode dargestellt.

Durch die ziffernmäßige Darstellung des Digitalwertes ist eine eindeutige Lesbarkeit gegeben (keine Ableseunterschiede zwischen erster und letzter Stelle). Die Auflösung ergibt sich durch die Quantisierungsstufe Q.

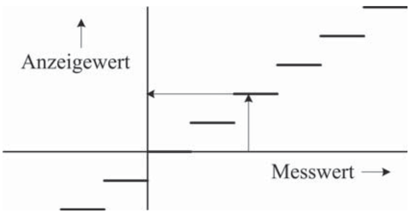

Bild 1.2
Abbildungsfunktion analog → digital

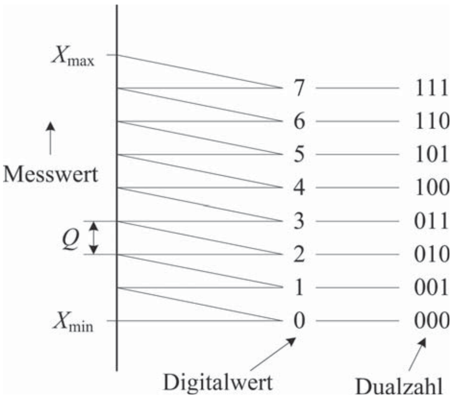

Bild 1.3
Abbildung einer Messgröße in ein digitales Signal bzw. einen digitalen Signalwert

1.2 Binäre und logische Zustände

Eine digitale Größe besteht aus abzählbaren Elementen (Stufen). Ein digitaler Spannungsverlauf ist somit eine Folge von diskreten Spannungswerten (theoretisch kein kontinuierlicher Übergang). Analoge Spannungswerte repräsentieren hierbei diskrete Werte. Die Anzahl der Stufen ist beliebig, jedoch begrenzt durch die Unterscheidungsmöglichkeit (begrenzte Genauigkeit bei der Spannungsmessung). Bild 1.4 zeigt einen digitalen Spannungsverlauf mit drei Zuständen (0 V, 5 V und 10 V). Problematisch sind bei entsprechender Verwendung die Übergänge zwischen 0 V und 10 V und zwischen 10 V und 0 V. Aufgrund des analogen Verhaltens von Spannungswerten kann dieser Übergang nicht in der Zeit $t = 0$ erfolgen. Die Zeit ist ebenfalls eine analoge Größe und dadurch kann nur ein quasi digitales Signal realisiert werden.

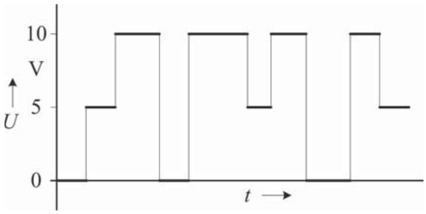

Bild 1.4 Digitales Spannungssignal mit drei Zuständen

Es wird für den Übergang immer ein gewisses, wenn auch sehr kurzes Zeitintervall benötigt. Bei schnellen Signalfolgen (häufiger Wechsel zwischen den Spannungswerten, Zeitspanne für Spannungsänderungen nicht mehr vernachlässigbar) ist der Übergang über die 5 V-Stufe problematisch. Bild 1.5 zeigt einen analogen Übergang zwischen 0 V und 10 V mit der ungewünschten Übergangszeit t_x. Der für die 5 V-Stufe verwendete Spannungsbereich (Messgenauigkeit dieser Stufe etc.) wird durchlaufen und dies könnte zur Detektion dieser nicht im eigentlichen Spannungsverlauf angezeigten Spannungsstufe führen.

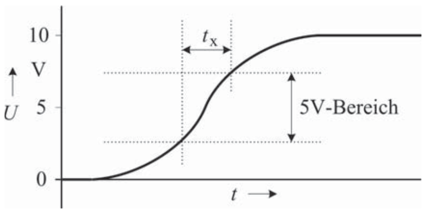

Bild 1.5
Analoger Übergang eines Spannungswechsels von 0 V auf 10 V

Ein digitales Signal mit mehr als zwei Zuständen ist deshalb für einfache Realisierungen nicht geeignet. Zwei Spannungsbereiche lassen sich durch einen Übergang (einen Schwellwert) unterscheiden. Ein zweiwertiges Signal hat zwei mögliche Zustände und wird deswegen binäres Signal genannt (lat.: binär: aus zwei Einheiten bestehend). Die allgemein angewandte Digitaltechnik arbeitet mit binären Signalen.

Vorteil dieser Signale ist, dass sich die zwei Bereiche leicht unterscheiden und, was häufig vorkommt, zur Vermeidung von Störeinflüssen vergleichsweise gut verstärken lassen (ein durch Störeinflüsse „verschwommenes“ Signal wird rekonstruiert, s. auch Abschnitt 9.3.1 Spannungsbereiche und in Abschnitt 9.5 Spezielle Eingänge, Schmitt-Trigger-Eingang). Der negativere Bereich wird mit L (Low) und der positivere Bereich mit H (High) gekennzeichnet. Diesen Bereichen müssen logische Zustände zugeordnet werden. Bei positiven Betriebsspannungen entspricht normalerweise H der logischen 1 (wahr, zutreffend oder ja) und L der logischen 0 (falsch, nicht zutreffend oder nein). Es existiert auch die umgedrehte Zuordnung, die in der Regel mit negativer Betriebsspannung gekoppelt ist. Sie wird als **negative Logik** (0≙H, 1≙L) bezeichnet. Diese Zuordnung ist bei den derzeitigen Realisierungen eigentlich nicht mehr anzutreffen und man nimmt stillschweigend die **positive Logik** (1≙H, 0≙L) an. Bei der Diskussion logischer Verknüpfungen werden 0 und 1 und bei der hardwaremäßigen Realisierung mit Logikelementen die Bezeichnungen L und H verwendet.

Binäre Systeme sind in fast allen technischen Geräten vorhanden.

Vorteile

- Verarbeitet werden nur zwei Werte (0 und 1 bzw. L und H)
- Impulse (Rechteckimpulse) sind einfach und vollständig regenerierbar
- Einfache Verstärkung (Schalter, Relais, Transistoren im Schaltbetrieb)
- Verknüpfen, verteilen und sortieren von Informationen mittels logischer Schaltungen
- Speicher einfach realisierbar
- Mathematische Probleme werden auf Addition zurückgeführt und gelöst
- Verschiedene mathematische Probleme können mit derselben Schaltung gelöst werden
- Genauigkeit kann durch Vergrößern der Stellenzahl nahezu beliebig erhöht werden

Nachteile

- Prinzipieller Fehler durch Rasterung (Quantisierungsstufe Q bestimmt Fehlergröße)

1.3 Zahlensysteme

Zahlendarstellungen

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene, teilweise anwendungsspezifische Zahlensysteme entwickelt, von denen hier einige exemplarisch vorgestellt werden.

In der **Abzählschreibweise** werden gleichwertige Striche verwendet, wie es von Kaffeelisten oder Bierdeckeln bekannt ist. Zur Übersicht gibt es die Bündelung, bei der nach vier Strichen der fünfte über diese vier gezeichnet wird und diese Gruppe (dieses Symbol) eine Fünf repräsentiert. Die Position der Striche ist ohne Bedeutung. Diese Darstellung verwendet den Zahlenraum $\mathbb{N}$ (Natürliche Zahlen) und ist nur für kleine Mengen einsetzbar (nicht bis unendlich).

Das **Römische Zahlensystem** deckt ebenfalls nur einen begrenzten positiven Ganzzahlenbereich aus $\mathbb{N}$ ab und verwendet die Zweier- und Fünfer-Bündelung wie in Tabelle 1.1 angegeben.

Tabelle 1.1 Bündelungen des Römischen Zahlensystems

5	mal	I	wird durch	V	dargestellt	(= 5)
2	mal	V	wird durch	X	dargestellt	(= 10)
5	mal	X	wird durch	L	dargestellt	(= 50)
2	mal	L	wird durch	C	dargestellt	(= 100)
5	mal	C	wird durch	D	dargestellt	(= 500)
2	mal	D	wird durch	M	dargestellt	(= 1000)

Außerdem wird die Stellenschreibweise verwendet. Hierdurch entscheidet die Position über den Wert der Zahl. Die Zahl Vier wird z. B. nicht durch IIII (wie es auf einigen analoganzeigenden Uhren zu finden ist) sondern durch IV ($5-1$) dargestellt und unterscheidet sich aufgrund der Stellenschreibweise von der Sechs dargestellt durch VI ($5+1$). Die 1 (Symbol I) wird in der linken Position abgezogen und in der rechten Position hinzuaddiert. Das Zahlensystem ist unhandlich und eignet sich nicht für Rechenoperationen.

Bei der **Stellenschreibweise** ergibt sich der Wert nicht nur durch die verwendeten Symbole wie bei den Römischen Zahlen, sondern durch die Position innerhalb der Darstellung. Das Bildungsgesetz zeigt Formel 1.1.

$$N = \left(\sum_{j=0}^{J-1} n_j \cdot W_j \right) \tag{1.1}$$

Hierbei hat jede Stelle j einen Wert W_j. Bei der Angabe 01:02:03:04 muss der Wert jeder Stelle bekannt sein. Hier könnte es Tag:Stunde:Minute:Sekunde sein. Der Wertebereich der linken Stelle mit dem Wert 1 ist der Tag, der mit dem Faktor 24 auf eine Stundenzahl umgerechnet werden kann. Der Wert 2 (Werte von 0 bis 23 sind an dieser Stelle möglich) kann mit dem Faktor 60 auf Minuten umgerechnet werden. Der Wert 3 (Werte von 0 bis 59 sind an dieser Stelle möglich) kann mit dem Faktor 60 auf Sekunden umgerechnet werden. Der angegebene Wert umgerechnet in die kleinste Einheit, in diesem Fall die Sekunde, ergibt:

$$N = \left(1 \cdot (24 \cdot 60 \cdot 60) + 2 \cdot (60 \cdot 60) + 3 \cdot (60) + 4 \cdot (1)\right) = 93784 \tag{1.2}$$

Rechenoperationen mit der Stellenschreibweise sind aufgrund der Umrechnungsfaktoren, die z. B. bei der Umrechnung von Monaten in Tage vom jeweiligen Monat abhängen, ungünstig. Innerhalb der jeweiligen Stelle wird der Wert in dem genannten Beispiel bereits mit dem Polyadischen Zahlensystem beschrieben.

Das Bildungsgesetz des **Polyadischen Zahlensystems** für positive Ganzzahlen $\mathbb{N}_0$ (es existiert auch ein Symbol für die 0) zeigt Formel 1.3. Hierbei ergibt sich die Wertigkeit einer jeweiligen Stelle aus dem Basiswert B mit der Stellenzahl j als Exponent.

$$N = \left(\sum_{j=0}^{J-1} n_j \cdot B^j \right) \tag{1.3}$$

In dem normalerweise verwendeten **Zehnersystem** ist $B = 10$ und n ein Element der Menge {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}. Die Zahl 4711 ist eine 4-stellige Zahl ($J = 4$). Die Darstellung des Wertes ist trivial und soll hier zur Verdeutlichung des Rechenweges verwendet werden.

$$N = \left(4 \cdot 10^3 + 7 \cdot 10^2 + 1 \cdot 10^1 + 1 \cdot 10^0\right) = 4711 \tag{1.4}$$

Diese Zahlendarstellung kann für verschiedene Basiswerte verwendet werden. In der binären Darstellung erhält man das **Dualsystem**. In diesem Fall ist $B = 2$ mit $n \in \{0, 1\}$. Die Dualzahl 1100101_2 (Index 2 kennzeichnet das 2er-System) hat folgenden Wert:

$$N = \left(1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0\right) = 101_{10} \tag{1.5}$$

Nach dem gleichen System ist das **Oktalsystem** ($B = 8$, $n \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$) aufgebaut. Im Vergleich zu dem Dualsystem werden jeweils 3 Bit (Bit ≙ kleinste Einheit) zusammengefasst. Die Dualzahl 1100101_2 wird mit führenden Nullen auf ein Vielfaches von drei Stellen erweitert zu 001 100 101 und jede Dreiergruppe durch das zugehörige Symbol repräsentiert gemäß 145_8 oder 0O145 (Null O(ktal) 145).

Gebräuchlicher ist das **Sedezimalsystem** oder **Hexadezimalsystem**. Hierbei ist $B = 16$ und $n \in \{0, 1, 2, \ldots 8, 9, A, B, C, D, E, F\}$. Da 16 Zeichen benötigt werden, ergänzt man die gebräuchlichen Ziffern um die ersten sechs Buchstaben des Alphabets. Im Vergleich zu dem Dualsystem werden hier vier Stellen zu einer Hexadezimalziffer zusammengefasst. Die Dualzahl 1100101_2 wird wieder um führende Nullen erweitert zu 0110 0101 und jede Vierergruppe durch das zugehörige Symbol repräsentiert gemäß 65_{16} oder 0X65 (Hexadezimal 65).

Im Weiteren werden diese Zahlensysteme nicht zum Rechnen verwendet. Sie dienen gegebenenfalls zur verkürzten Schreibweise verwendeter Bitkombinationen.

Werden diese Zahlen übertragen, so muss der Empfänger wissen, in welcher Reihenfolge die Ziffern übertragen werden. Das höchstwertige Bit (in der Regel links) ist das MSB (**M**ost **S**ignificant **B**it) und das niederwertigste Bit (in der Regel rechts) ist das LSB (**L**east **S**ignificant **B**it).

Die Zahlendarstellung kann auch für Nachkommastellen erweitert werden. Eine 5-stellige Zahl mit zwei Vor- und drei Nachkommastellen hat das in Formel 1.6 angegebene Bildungsgesetz. Ein Beispiel im Dualcode zeigt Bild 1.6. Jede Nachkommastelle reduziert hierbei die Quantisierungsstufe Q auf die Hälfte. Bei drei Nachkommastellen ist dies $2^{-3} = 0{,}125$ bzw. $\pm 0{,}0625$.

$$N = \left(\sum_{n=-3}^{1} n_j \cdot B^j \right) \tag{1.6}$$

Wertigkeit	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	
	1	0 .	1	0	1	$= 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0{,}5 + 0 \cdot 0{,}25 + 1 \cdot 0{,}125 = 2{,}625$

Bild 1.6 Beispiel einer Dualzahl mit Nachkommastellen

Im **Polyadischen Zahlensystem** können Addition und Subtraktion (Bild 1.7), Multiplikation (Bild 1.8) und Division (Bild 1.9) in gewohnter Weise durchgeführt werden. Die Rechenoperationen mit den Dualwerten (mittlerer Teil) und Dezimalwerten (rechter Teil) werden im Weiteren nicht verwendet. Die Entwicklung einer Schaltung zur Realisierung des in der Tabelle angegebenen Zusammenhangs (linker Teil) jedoch schon.

b	a	$(b+a)$
0	0	0 0
0	1	0 1
1	0	0 1
1	1	1 0

carry

$$\begin{array}{r} 0100 \\ +\,0110 \\ {}^{1} \\ \hline 1010 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 4 \\ +\,6 \\ \hline 10 \end{array}$$

b	a	$(b-a)$
0	0	0 0
0	1	1 1
1	0	0 1
1	1	0 0

borrow

$$\begin{array}{r} 1010 \\ -\,0110 \\ {}^{1} \\ \hline 0100 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 10 \\ -\,6 \\ \hline 4 \end{array}$$

Bild 1.7 Beispiele für Addition und Subtraktion im Dual- und Dezimalsystem

b	a	$b \cdot a$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$$\begin{array}{r} 11 \cdot 0101 \\ \hline 00 \\ +\;\;11 \\ +\;\;00 \\ +\;\;11 \\ \hline 01111 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 3\;\cdot\;05 \\ \hline 0 \\ +\;15 \\ \hline 15 \end{array}$$

Bild 1.8 Beispiel für die Multiplikation im Dual- und Dezimalsystem

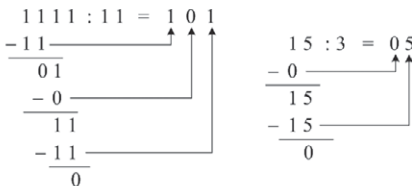

Bild 1.9
Beispiele für die Division im Dual- und Dezimalsystem

Erweitert man die Darstellung von Natürlichen Zahlen um den negativen Zahlenbereich auf Ganzzahlen (von $\mathbb{N}_0$ nach $\mathbb{Z}$), so wird ein Bit für das Vorzeichen benötigt. Dies ist das MSB (Bit mit der höchsten Wertigkeit, bisher 2^{J-1}; Wertebereich der Zahl von $0, \ldots, 2^J - 1$). Mit den negativen Zahlen wird nun der Zahlenraum von $\pm 2^{J-1} - 1$ abgedeckt, bei vier Bit von −7 bis +7. Eine einfache Darstellung besteht aus Vorzeichen und Betrag wie in Tabelle 1.2 in der 3. Spalte zu sehen ist. Diese Darstellung eignet sich für eine Ausgabe eines Wertes mit Vorzeichen (z. B. für die Anzeige bei Messinstrumenten), für Berechnungen ist sie jedoch nicht geeignet.

Die nächste Variante ist das (b − 1)-Komplement, auch Einerkomplement genannt. Um aus einem positiven Wert einen negativen zu erhalten, müssen hierbei alle Bits invertiert und das Vorzeichenbit hinzugefügt werden. Aus $+3_{10}$ wird im Dualsystem mit Vorzeichenbit und drei Werte-Bits $0\,011_2$ für die Zahlendarstellung der positiven 3 aus dem Bereich 0 bis 7. Eine -3_{10} wird mit $1\,100_2$ dargestellt (die inverse Bitkombination der positiven Zahl). Das Vorzeichenbit ist bei der Betragsdarstellung und dem (b − 1)-Komplement gleich, nur die Datenbits sind invertiert (s. Tabelle 1.2 in der 4. Spalte). Eine Umwandlung zwischen diesen beiden Varianten ist dadurch recht einfach. Nachteilig ist, dass in beiden Darstellungsvarianten die Null zweimal existiert.

Für mathematische Berechnungen gibt es eine günstigere Variante, das (b)-Komplement, auch Zweierkomplement genannt. Hierbei wird der negative Zahlenbereich um einen Wert in negativer Richtung verschoben und man erhält den Wertebereich bei vier Bit von $-8, \ldots -1, 0, +1, \ldots +7$ wie in Tabelle 1.2 in der rechten Spalte dargestellt. Wertebereiche typischer Bitlängen zeigt Tabelle 1.3. Bei dieser Zahlendarstellung kann dem Vorzeichenbit wieder ein Wert zugeordnet werden, dieser ist $-(2^{J-1})$. Die Wertigkeiten der Bitstellen bei vier Bit im Dualcode für positive (natürliche) Zahlen von 8, 4, 2, 1 geht für positive und negative Ganzzahlen über in −8, 4, 2, 1. Die realisierbaren Werte lassen sich recht gut als Kreis darstellen, um Rechenoperationen wie Addition oder Subtraktion zu erläutern.

Tabelle 1.2 Gegenüberstellung verschiedener Zahlendarstellungen

Wert	Dualzahl	Vorzeichen und Betrag	(b-1)-Komplement 1er-Komplement	(b)-Komplement 2er-Komplement
8	./.	./.	./.	./.
7	111	0 111	0 111	0 111
6	110	0 110	0 110	0 110
…	…	…	…	…
…	…	…	…	…
1	001	0 001	0 001	0 001
0	000	0 000	0 000	0 000
−0	./.	1 000	1 111	./.
−1	./.	1 001	1 110	1 111
…	…	…	…	…
…	…	…	…	…
−6	./.	1 110	1 001	1 010
−7	./.	1 111	1 000	1 001
−8	./.	./.	./.	1 000
−9	./.	./.	./.	./.

Tabelle 1.3 Wertebereiche typischer Ganzzahlendarstellungen

Bitanzahl (*J*)	Vorzeichenloser Wertebereich (unsigned)	Vorzeichenbehafteter Wertebereich (signed, (b)-Komplement)
4	0, +1, +2, …, +14, +15	−8, …, −1, +0, +1, …, +7
8	0, +1, +2, …, +254, +255	−128, …, −1, +0, +1, …, +127
12	0, +1, +2, …, +4094, +4095	−2048, …, −1, +0, +1, …, +2047
16	0, +1, +2, …, +65 534, +65 535	−32 768, …, −1, +0, +1, …, +32 767

Bild 1.10 stellt die Periodizität der Integerzahlen ohne und mit Vorzeichen dar. Wird durch Addition (Anzahl der Schritte in Richtung +, auch bei der Subtraktion einer negativen Zahl) oder Subtraktion (Anzahl der Schritte in Richtung −, auch bei der Addition einer negativen Zahl) die Bereichsgrenze überschritten, entstehen Fehler (inhärenter (lat.: inhaerens: hängen, kleben, auch: innewohnend, ureigen) Modulo- (Rest einer Ganzzahldivision, wird häufig zur Begrenzung eines Wertebereiches verwendet) Effekt (manchmal ist dieser Effekt auch gewollt). Bei Berechnungen sollte dies überwacht werden. Bild 1.11 zeigt als Beispiel einige Rechenoperationen.