

1

Digitale Grundbegriffe

Um den Begriff »digital« leichter verstehen zu können, ist es hilfreich, sich zuerst mit dem Gegenstück auseinanderzusetzen, der Analogtechnik, denn unser natürliches Umfeld verhält sich analog.

1.1 Was bedeutet der Begriff »analog«?

Das Wort »analog« stammt aus dem Griechischen und steht allgemein etwa für *vergleichbar* oder *ähnlich*. Im technischen Bereich bedeutet analog *kontinuierlich* oder *stufenlos*. Wenn beispielsweise eine physikalische Größe wie Temperatur oder Geschwindigkeit sich stufenlos zwischen dem minimalen und maximalen Wert befinden kann, spricht man von analogen Größen. An zwei einfachen Beispielen aus dem Alltag lässt sich der Begriff analog einfach und anschaulich erklären.

Wird ein herkömmliches *Thermometer* wie in Abbildung 1 erwärmt, dann dehnt sich die Anzeigeflüssigkeit proportional zur Temperatur stufenlos aus. Wird diese Ausdehnung entsprechend geeicht und markiert, lässt sich so die Temperatur ablesen, analog der wirklichen Temperatur. Es gibt keine Sprünge und theoretisch unendlich viele Zwischenwerte. In unserem Beispiel lag die Temperatur um 09:00 Uhr morgens bei etwa 13 °C, und nachmittags um 15:00 Uhr bei etwa 37 °C.

Der eingetragene Kurvenverlauf der Temperatur über der waagrecht-ten Zeitachse in Abbildung 2 entspricht genau dem Verlauf der wirklichen Temperatur während des Tages. Die Kurve ist also analog zur Wirklichkeit.

Eine *Uhr* mit Stunden- und Minutenzeiger ist ein weiteres Beispiel aus der analogen Welt, denn die Anzeige verläuft ebenfalls kontinuierlich ohne Stufen. Hier steht eine volle Umdrehung des Minuten-

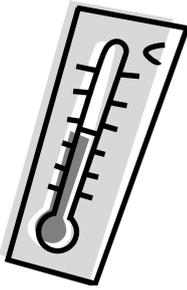


Abb. 1 Temperaturdarstellung eines analogen Thermometers

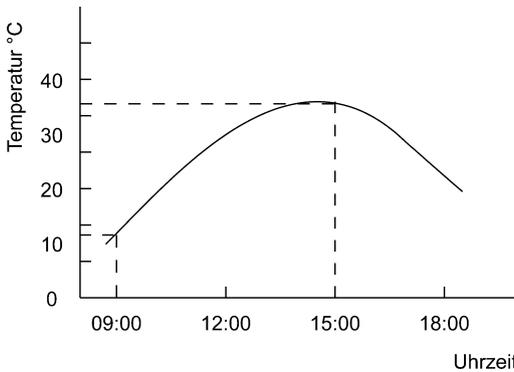


Abb. 2 Verlauf der Temperatur über die Tageszeit

zeigers für eine komplette Stunde, und eine vollständige Umdrehung des kleineren Stundenzeigers für zwölf Stunden.

Der *Vorteil* analoger Anzeigen liegt in der schnelleren und leichteren Wahrnehmung von Tendenzen und Schwankungen. Man hat beim Thermometer beispielsweise den möglichen Minimalwert und den Maximalwert gleichzeitig im Blickfeld. Oder beim Blick auf eine analoge Uhr ergibt sich sofort ein Gefühl für die verbleibende Zeit.

Die *Nachteile* der analogen Darstellung liegen im ungenauen Ablesen des absoluten Wertes. Generell können zwei Personen zu unter-



Abb. 3 Typische Zeitanzeige einer analogen Uhr

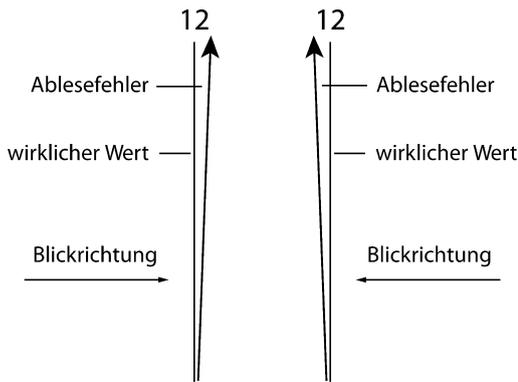


Abb. 4 Ablesefehler bei verschiedenen Betrachtungswinkeln

schiedlichen Werten kommen. Desweiteren können sich, je nach Aufbau der Anzeige, unter verschiedenen Blickwinkeln durch die Parallaxe automatisch jeweils unterschiedliche Werte ergeben. Der größte Nachteil der Analogtechnik liegt jedoch darin, dass die Werte nicht verarbeitet werden können, so wie es bei der Digitaltechnik der Fall ist.

Zusammenfassung

Analog bedeutet in unserer technisierten Welt, dass physikalische Größen wie beispielsweise die Temperatur, die Uhrzeit, eine Geschwindigkeit, Längen usw. kontinuierlich, d.h. ohne Sprünge, auftreten und auch so dargestellt werden. So zeigen beispielsweise Skalen mit einem Zeiger immer Analogwerte an.

1.2 Was bedeutet der Begriff »digital«?

Der Ausdruck »digital« leitet sich von dem lateinischen Ausdruck »*digitus*«, der Finger, ab. Im englischen Sprachraum entwickelte sich daraus das Wort »*digit*«, also Zahl.

Wenn wir unsere beiden Beispiele in Abbildungen 5 und 6 betrachten, bedeutet also digital, dass physikalische Werte wie die Tem-

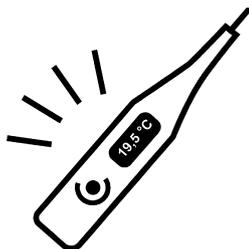


Abb. 5 Typische Anzeige eines digitalen Thermometers



Abb. 6 Typische Anzeige einer digitalen Uhr

peratur oder die Zeit *nicht* durch einen kontinuierlichen Zeigerausschlag über eine geeichte Skala angezeigt, sondern prinzipiell durch eine Zahl wiedergegeben werden. Das heißt, anstelle des Zeigers sehen wir direkt eine Zahl, wie beispielsweise $19,5^{\circ}\text{C}$ bei der Anzeige der Temperatur bzw. 08:03 bei der Anzeige der momentanen Zeit einer digitalen Uhr. Diese Werte werden sprunghaft in gewissen Intervallen jeweils größer oder kleiner. Für das Thermometer gilt in unserem Beispiel ein Intervall von $0,1^{\circ}\text{C}$, also eine Stelle hinter dem Komma. Bei der Uhr liegen die Sprünge jeweils bei einer Minute. Zwischenwerte gibt es keine. Kleinere oder größere Intervalle sind natürlich möglich. In der Technik verwendet man üblicherweise für digitale Werte auch den Ausdruck *diskret* als Gegensatz zu kontinuierlich bzw. zum Kontinuum.

Zusammenfassung

Sobald eine physikalische Größe mit einer Ziffer angegeben wird, spricht man von einer digitalen Anzeige.

1.3 Vom Dezimal- zum binären Zahlensystem

Physikalische Größen digital anzuzeigen ist jedoch nur ein kleiner Teilbereich der Digitaltechnik. Denn eine Anzeige durch Ziffern ist nur das Endprodukt einer digitalen Verarbeitungskette. Um die Vorteile und den Siegeszug der Digitaltechnik besser zu verstehen, müssen wir auf den Begriff »diskrete Werte« und deren Verarbeitung näher eingehen. Wir fangen deshalb ganz von vorne an und begeben uns in die wunderbare Welt der Binärzahlen. Sie sind der Schlüssel unseres Informationszeitalters.

Wir sind aufgewachsen mit dem Dezimalsystem (lat. *dezimus* = der Zehnte), auch Zehnersystem genannt, und haben gelernt mit den zehn arabischen Ziffern von Null bis Neun zu rechnen. Unsere zehn Finger sind uns dabei sehr nützlich. Weil man mit diesem Schema zehn verschiedene Zeichen definiert, spricht man auch von einem

Zahlensystem mit der Basis Zehn. Es ist das weltweit am häufigsten verwendete System.

Grundzüge des Dezimalsystems

- Basis: 10
- Nennwerte: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
- Stellenwerte¹: $10^0 = 1$, $10^1 = 10$, $10^2 = 100$

Ebenso lassen sich jedoch Zahlensysteme mit jeder beliebig anderen Basis verwenden. In der Informationsgesellschaft hat sich aus gewissen Gründen dabei ein System mit der Basis Zwei als außerordentlich nützlich erwiesen. Es ist das Binärsystem.

Grundzüge des Binärsystems

- Basis: 2
- Nennwerte: 0, 1
- Stellenwerte¹: $2^0 = 1$, $2^1 = 2$, $2^2 = 4$

Das Binärsystem, oft auch Dualsystem genannt, besteht also im Gegensatz zu unserem gängigen Dezimalsystem nur aus zwei verschiedenen Werten. Allgemein lässt sich dieser binäre Zustand mit einer Null (0) und einer Eins (1) als Symbol darstellen. Weil im englischen Sprachraum eine zweiwertige Zahl bzw. Binärzahl *Binary Digit* heißt, ist daraus der überall bekannte Ausdruck *Bit* entstanden.

Binäre (zweiwertige) Zustände sind in der Technik ideal, denn der bedeutende Vorteil dieses Zahlensystems liegt darin, dass sie mit elektronischen Komponenten sehr einfach realisiert werden können. Spannung oder Strom »ein« steht dann für eine »1«, dementsprechend, wenn die Spannung oder der Strom auf Null geht, entspricht dies einer »0«. Das Binärsystem ist deshalb, neben dem Dezimalsystem, das bedeutendste Zahlensystem überhaupt geworden. Tabelle 1 verdeutlicht den Vergleich dieser beiden Systeme mit den Dezimalziffern von 0 bis 15. Das Binärsystem geht auf Gottfried Wilhelm Leibniz zurück, der schon 1705 diese binäre Arithmetik veröffentlichte.

Aus der Tabelle 1 wird demnach die Sieben als 111-Binärfolge und die Dreizehn als 1101-Binärfolge gleichgesetzt, um nur zwei Beispiele zu nennen.

Mit diesen Binärzahlen lässt es sich genauso gut rechnen wie mit Dezimalzahlen. Man muss nur die spezifischen Rechenregeln be-

¹ Erklärung dieser Schreibweise im Anhang.

Tabelle 1 Zusammenhang zwischen Dezimalzahlen und Binär/Dualzahlen. So wird beispielsweise die arabische Zahl 15 durch vier Einser übersetzt. Die unterste Zeile nach der Leerzeile gibt den Stellenwert an.

Dezimalwert	Binärwert				
0				0	
1				1	
2			1	0	
3			1	1	
4		1	0	0	
5		1	0	1	
6		1	1	0	
7		1	1	1	
8	1	0	0	0	
9	1	0	0	1	
10	1	0	1	0	
11	1	0	1	1	
12	1	1	0	0	
13	1	1	0	1	
14	1	1	1	0	
15	1	1	1	1	
2	1	4	3	2	1

————— Stellenwert

herrschen. Für uns ist dies zwar ungewohnt, aber für einen Computer ist diese Binärarithmetik ideal.

Tabelle 2 stellt dar, wie einfach man mit Zahlen, die auf der Basis Zwei basieren, eine Addition durchführen kann, wenn man sich an die speziellen Rechenregeln hält. Ebenso sind subtrahieren, multiplizieren und dividieren möglich. Alle anderen Rechenarten, wie beispielsweise Wurzel ziehen, lassen sich aus den Grundrechenarten dementsprechend ableiten.

Bits und Datenmenge

Zwischen der Anzahl der Bits und der Anzahl der möglichen Zustände gibt es einen Zusammenhang, der in der Praxis sehr wichtig ist. Wenn man sich beispielsweise mit digitaler Fotografie befasst, wird dies schnell deutlich.

Tabelle 2 Mit Binärzahlen lässt sich genau so rechnen wie mit Dezimalzahlen. Es sieht für uns nur ungewohnt aus. Für Computer dagegen ist es ein ideales System.

Addition Grundregeln	Beispiel
$0 + 0 = 0$ $0 + 1 = 1$ $1 + 0 = 1$ $1 + 1 = 10$	$\begin{array}{r} 1011 \\ + 11 \\ \hline 1110 \end{array}$

Aus der untenstehenden Tabelle 3 lässt sich ablesen, wie viele verschiedene Zustände sich mit jeweils einer bestimmten Anzahl von Bits realisieren lassen. In diskreten Werten mit den zwei möglichen Zuständen eines Bits, also einer »0« und einer »1« ausgedrückt, sieht es dann folgendermaßen aus:

Tabelle 3 Ganz deutlich ist ersichtlich, wie die Anzahl der möglichen Zustände, die Datenmenge, rapide nach oben schnell.

Anzahl der Bits	Anzahl der möglichen Zustände
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1.024
11	2.048
12	4.096
...	
16	65.536
...	
32	4.294.967.296
...	
64	18.446.744.073.709.551.616

Während sich mit einem Bit nur zwei Zustände darstellen lassen, ein Bit entspricht entweder einer »0« oder einer »1«, sind es bei zwei Bits vier mögliche Zustände, nämlich »00«, »10«, »01« oder »11«. Bei drei Bits ergeben sich immerhin schon acht verschiedene Kombinationen, nämlich »000« bzw. »100« bzw. »110« bzw. »101« bzw. »010« bzw. »011« bzw. »001« bzw. »111«. Das heißt, die Anzahl der möglichen Zustände wächst mit zunehmender Anzahl von Bits überproportional (exponentiell) an.

Für die Praxis bedeutet dies, um bei der digitalen Fotografie als Beispiel zu bleiben, dass sich mit acht Bits insgesamt 256 Graustufen darstellen lassen. Das ist oft viel zu wenig, weil man dann stufenförmige Übergänge sehen kann. Mit einer Zwölf-Bit-Auflösung, wie es bei höherwertigen Kameras der Fall ist, und seinen 4096 Graustufen sieht das Ergebnis allerdings viel besser aus. Mit 32 Bits ergeben sich dann etwa 4,3 Milliarden möglicher Zustände und mit 64 Bits die riesige Zahl von 18,4 Trillionen. Mit n Bits lassen sich 2^n verschiedene Zustände darstellen. In allgemeiner Form lässt sich dieser Sachverhalt wie folgt ausdrücken:

$$2^n = 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 \text{ (n Faktoren)}$$

n = Anzahl der Bits

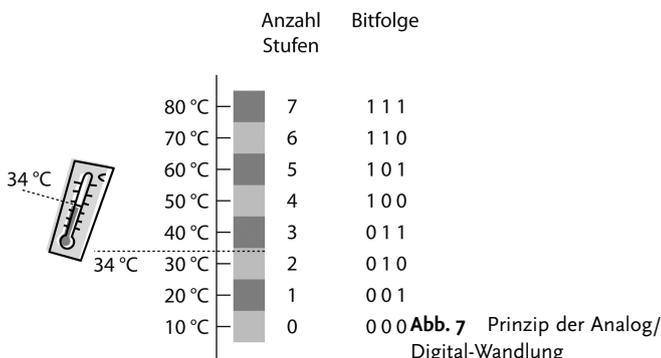
Zusammenfassung

Der Ausdruck Bit setzt sich aus Binary Digit zusammen, was Binärzahl heißt und zwei Zustände »0« und »1« beschreibt. Mit Binärzahlen lässt es sich genauso rechnen wie mit Dezimalzahlen von 0 bis 9. Es sieht für uns nur ungewohnt aus. Für Computer dagegen ist dieses System mit nur zwei Zuständen ideal. Die mögliche Anzahl der Zustände, das Datenvolumen, wächst allerdings mit Zunahme der Bits überproportional an. Mit n Bits lassen sich 2^n verschiedene Zustände darstellen.

1.4 Wie wird unsere Welt digital?

Digitale Werte werden allerdings nicht automatisch in digitaler Form angeboten, denn die ursprünglichen physikalischen Größen sind kontinuierliche, analoge Werte. Um digitale Werte zu erhalten, muss der analoge Verlauf erst in digitale Werte umgewandelt, d. h. durch eine Reihe von Nullen und Einser ersetzt werden.

Nehmen wir wieder unsere analoge Temperaturanzeige als Beispiel zu Hilfe, die einen Bereich von 10 °C bis 80 °C abdecken soll. In Abbildung 7 ist dieser Bereich auf der linken senkrechten Linie dargestellt. Ebenso ist ersichtlich, dass die Temperatur bei etwa 34 °C stehengeblieben ist. Dieser analoge Wert muss nun in einen digitalen Wert, einen Binärwert, überführt werden. Dies geschieht mit einem kleinen elektronischen Bauteil, der Analog/Digital-Wandler heißt. Nehmen wir weiter an, dass zwecks einer einfachen Darstellung der A/D-Wandler ein Drei-Bit-Wandler ist, also acht verschiedene Werte darstellen kann, dann würde sich die Situation wie in Abbildung 7 darstellen.



Der messbare Bereich zwischen dem minimalen und dem maximalen Wert würde in acht Stufen, von null bis sieben, unterteilt werden. Jede Stufe würde dabei einen Bereich von $80\text{ °C}/8 = 10\text{ °C}$ abdecken. Die grauen Felder in Abbildung 7 deuten diese acht Stufen mit den entsprechenden digitalen Binärwerten aus Tabelle 1 an. Das heißt, es gibt jeweils grobe Wertesprünge von 10 °C. Der reale Temperaturwert kann deshalb von 26 °C bis 35 °C schwanken und es wird trotzdem immer nur der Wert von 30 °C angezeigt. Ein Drei-Bit-System ist nicht in der Lage genauer zu sein, wenn es einen Temperaturbereich von 80 °C abdecken soll. Je höher aber die Auflösung des A/D-Wandlers ist, desto kleiner werden die Sprünge und daher genauer die Darstellung des wirklichen analogen Wertes. Bei einer Vier-Bit-Auflösung würde die digitale Anzeige nur Sprünge von $80\text{ °C}/16 = 5\text{ °C}$, bei einer Acht-Bit-Auflösung, mit seinen 256 Stufen, eine Genauigkeit von $\pm 0,3\text{ °C}$ aufweisen, also in den ersten Kommastellenbereich vordringen. Der Fehlerbereich läge dann in unserem Beispiel nur noch zwischen 29,7 und 30,3 °C. Der Fehler wird also mit höhe-

rer Auflösung des A/D-Wandlers immer geringer. Fachleute sprechen von einem *Quantisierungsfehler*. Nur wenige Bits mehr führen wegen dem exponentiellen Verhalten zu eindrucksvollen Verbesserungen, jedoch auf Kosten der ansteigenden Datenmenge.

Abbildung 8 zeigt noch einmal den Ein- und Ausgang eines A/D-Wandlers, wie er üblicherweise als Symbol dargestellt wird. Ein elektrischer analoger Wert, der am Eingang anliegt, kommt am Ende als einfache Bitfolge mit seinen »0« und »1« Werten heraus. Die technische Realisierung durch die Elektronik im Innern des Bauteils (Dreiecks) braucht uns nicht zu kümmern.

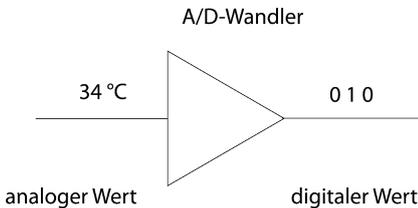


Abb. 8 Darstellung der Funktion eines Analog/Digital-Wandlers

Natürlich lässt sich ein analoges Thermometer nur digitalisieren, wenn die Werte elektrisch vorliegen. Solche elektronischen Messelemente für die Temperatur sind heute preiswert verfügbar. Bei einem analogen Thermometer mit Alkohol- oder Quecksilberinhalt geht dies natürlich nicht. Im Abschnitt über die digitale Schrift werden wir sehen, wie letztendlich die digitale Anzeige des Temperaturwertes zustande kommt.

Wichtig in der Digitaltechnik ist, dass die Null immer mitgezählt wird. Deshalb sieht man bei Grafikprogrammen, z. B. für die Fotografie, die auf einem Acht-Bit-System aufbauen, maximal einstellbare Werte nur bis 255 und nicht 256, wie die Anzahl der Zustände von 2^8 suggeriert, aber die Null ist der erste Wert.

Desweiteren werden wir im Elektronikteil sehen, was die Zahlen in der Praxis bedeuten. Bis jetzt sind es ja nur Werte auf dem Papier.

Zusammenfassung

Unsere Welt wird digital, indem analoge Werte digitalisiert werden. Im Prinzip wird das analoge, kontinuierliche Signal in Stufen eingeteilt, es wird quantisiert. Je höher die Auflösung, das heißt die Anzahl an beteiligten Bits, desto kleiner wird der Quantisierungsfehler und je genauer entspricht der digitale Wert der analogen Wirklichkeit.