

Definitionen zur Digitaltechnik

Digitale Systeme – Schaltnetze und -werke

Analoge, digitale und binäre Signale

Abgrenzung der Digitaltechnik von der Analogtechnik

Kapitel 1

Basis der Digitaltechnik und Abgrenzung zur Analogtechnik – Zwischen den Fronten?

Definitionen zur Digitaltechnik

Die Digitaltechnik ist ein sehr umfassendes Gebiet, weswegen zunächst geklärt werden muss, was die Digitaltechnik eigentlich ist. Ausgehend von nachfolgenden, grundlegenden, internationalen Definitionen sollte dies dann verständlicher werden.



Definition nach IEV 171-01-16: *Digitaltechnik* ist eine Technik, die eine digitale Darstellung von Information verwendet.

Der darin vorkommende Begriff *Information* ist recht abstrakt, aber allgemeingültig und ist für alle relevanten Sachverhalte anwendbar, wie dies aus der nachfolgenden Definition zu entnehmen ist.



Definition nach IEV 171-01-01: *Information* ist die Kenntnis über Objekte wie Sachverhalte, Ereignisse, Gegenstände, Vorgänge oder Vorstellungen (einschließlich Begriffen), die in einem gegebenen Zusammenhang eine bestimmte Bedeutung haben.

Systeme der Digitaltechnik sind als *digitale Schaltungen* ausgeführt, die sowohl aus Hardwarekomponenten wie auch aus Softwarekomponenten bestehen können. Die Systeme der Digitaltechnik und insbesondere die digitalen Schaltungen unterteilen sich in die Kategorien

- ✓ *Schaltnetze* und
- ✓ *Schaltwerke*.

Diese unterscheiden sich grundlegend voneinander, auch wenn beide Kategorien grundsätzlich mit den gleichen logischen Grundverknüpfungen realisierbar sind, weswegen hier eine Definition erforderlich ist.



Definition nach IEV 351-52-03: Ein *Schaltnetz* (kombinatorisches Schaltsystem) ist ein Schaltsystem, bei dem der Wert der Ausgangsgröße zu jedem Zeitpunkt nur von den Werten der Eingangsgrößen zu diesem Zeitpunkt abhängt.

Für eine digitale Schaltung (kombinatorisches Schaltsystem) folgt damit: Ein *Schaltnetz* ist eine digitale Schaltung, die ein digitales Ausgangssignal erzeugt, das nur von den Werten der digitalen Eingangssignale zum gleichen Zeitpunkt abhängt.



Definition nach IEV 351-52-04: Ein *Schaltwerk* (sequenzielles Schaltsystem) ist ein Schaltsystem, bei dem die Werte der Ausgangsgrößen zu einem festgelegten Zeitpunkt von den Werten der Eingangsgrößen und den Werten der Zustandsgrößen zu diesem Zeitpunkt abhängen, wobei die Werte der Zustandsgrößen zum folgenden Zeitpunkt von den Werten der Zustandsgrößen und den Werten der Eingangsgrößen zum festgelegten Zeitpunkt abhängen.

Für eine digitale Schaltung (sequenzielles Schaltsystem) folgt damit: Ein *Schaltwerk* ist eine digitale Schaltung, die ein digitales Ausgangssignal erzeugt, das von den Werten der digitalen Eingangssignale zum gleichen Zeitpunkt und vorangegangener Zeitpunkte abhängt.

Ein Schaltwerk ist im Gegensatz zu einem Schaltnetz, das nur direkte Veränderungen der Eingangssignale zum gleichen Zeitpunkt verarbeitet, in der Regel ein endlicher Zustandsautomat, der mindestens einen Speicher besitzt, um sich vorangegangene Systemzustände zu merken, wie beispielsweise ein Bezahlautomat für unterschiedlichste Güter (beispielsweise ein Getränkeautomat, Fahrkartenautomat) oder auch andere Anwendungen wie beispielsweise zur Steuerung der Programme einer Waschmaschine.

Analoge, digitale und binäre Signale

Systeme der Digitaltechnik verarbeiten digitale Eingangssignale und erzeugen digitale Ausgangssignale. Hierbei können die Eingangssignale von einem digitalen Eingabegerät oder einem Sensor stammen. Bei der Verarbeitung hat zunächst die Konvertierung der Zeichen des digitalen Eingabegeräts in einen zuvor verabredeten Code zu erfolgen und die Messwerte eines Sensors müssen zunächst verstärkt und danach entsprechend codiert werden,

damit sie verarbeitet werden können. Die digitalen Ausgangssignale können dann Aktoren wie beispielsweise Ventile ansteuern und über ein digitales Ausgabegerät zur Anzeige gebracht werden.

Die Basis für ein System der Digitaltechnik stellen also die digitalen Signale dar – was sind nun digitale Signale?

Um diese Frage zu beantworten, ist zunächst eine Unterteilung der verschiedenen Signalarten erforderlich. Die Unterteilung der Signale erfolgt bezüglich der

- ✓ *Signalwert-* und
- ✓ *Zeitabhängigkeit.*

Diese können jeweils

- ✓ *kontinuierlich* oder
- ✓ *diskret*

sein, wobei diese Eigenschaften immer in Kombination mit einem Signal und der Zeitabhängigkeit dessen Verwendung finden. Danach gelten folgende Definitionen:



Definition nach IEV 171-01-09: Ein *wertkontinuierliches Signal* ist ein Signal, bei dem der Informationsparameter jeden beliebigen Wert in einem kontinuierlichen Wertebereich annehmen kann.

ANMERKUNG: Ein wertkontinuierliches Signal kann ein zeitkontinuierliches Signal und damit ein analoges Signal oder auch ein zeitdiskretes Signal sein.



Definition nach IEV 351-41-18: Ein *Informationsparameter* ist ein Parameter eines Signals, der die Information nach einer Vorschrift abbildet.

ANMERKUNG: Für viele Signale ist der Wert der physikalischen Größe zugleich deren Informationsparameter. In diesem Falle ist es üblich, zur Vereinfachung vom »Wert eines Signals« zu sprechen.



Definition nach IEV 171-01-11: Ein *wertdiskretes Signal* ist ein Signal, bei dem der Informationsparameter nur diskrete Werte annehmen kann, im Allgemeinen einen Wert innerhalb jedes Intervalls aus seiner Reihe von benachbarten Wertintervallen.

ANMERKUNG 1: Die benachbarten Intervalle schließen aneinander lückenlos an, überlappen einander nicht und brauchen nicht die gleiche Größe zu haben.

ANMERKUNG 2: Ein wertdiskretes Signal kann ein zeitkontinuierliches Signal sein, wie ein quantisiertes Signal, oder ein zeitdiskretes Signal, dann ist es ein digitales Signal.



Definition nach IEV 171-01-10: Ein *zeitkontinuierliches Signal* ist ein Signal, bei dem der Informationsparameter zu jedem Zeitpunkt in einem Zeitintervall definiert ist.

ANMERKUNG: Ein zeitkontinuierliches Signal kann ein wertkontinuierliches Signal sein, und damit ein analoges Signal, oder ein wertdiskretes Signal, also ein quantisiertes Signal.



Definition nach IEV 171-01-12: Ein *zeitdiskretes Signal* ist ein Signal, bei dem der Wert des Informationsparameters nur zu diskreten aufeinanderfolgenden Zeitpunkten definiert ist.

ANMERKUNG 1: Ein zeitdiskretes Signal ist aus zeitlich aufeinanderfolgenden Elementen zusammengesetzt, wobei jedes Element einen oder mehrere Informationsparameter besitzt, zum Beispiel seine Dauer, seine zeitliche Lage, seinen Beitrag zur Signalform, seine Stärke.

ANMERKUNG 2: Ein zeitdiskretes Signal kann ein wertkontinuierliches Signal sein, wie ein Abtastsignal, oder ein wertdiskretes Signal, und damit ein digitales Signal.

Aus den Definitionen für ein wertkontinuierliches und wertdiskretes Signal beziehungsweise zeitkontinuierliches und zeitdiskretes Signal folgen die Definitionen für ein analoges und digitales Signal, wie sie nachfolgend angegeben sind.



Definition nach IEV 171-01-14: Ein *analoges Signal* ist ein Signal, das sowohl ein wertkontinuierliches Signal als auch ein zeitkontinuierliches Signal ist.

ANMERKUNG: Der Informationsparameter kann zu jedem Zeitpunkt jeden Wert innerhalb eines kontinuierlichen Bereichs annehmen. Zum Beispiel kann ein analoges Signal kontinuierlich den Werten einer anderen physikalischen Größe folgen, die Information darstellt.



Definition nach IEV 171-01-13: Ein *digitales Signal* ist ein Signal, das sowohl ein wertdiskretes Signal als auch ein zeitdiskretes Signal ist.

ANMERKUNG: Der Informationsparameter ist im Allgemeinen als Zeichen eines Zeichensatzes codiert und die Zeichen können als Zahlen interpretiert werden.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 1.1 ein analoges und ein digitales Signal dargestellt.

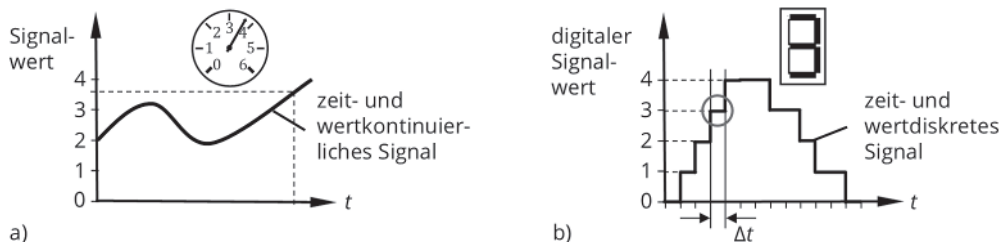


Abbildung 1.1: Darstellung eines analogen (a) und digitalen Signals (b)

In Abbildung 1.1a ist ein analoges Signal dargestellt, bei dem zu jedem Zeitpunkt ein Signalwert aus dem gegebenen Intervall zugeordnet beziehungsweise gemessen werden kann. Dies ist durch die analoge Anzeige symbolisiert.

Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 1.1b ein digitales Signal dargestellt, das aus vier gleich großen Intervallen besteht, die den *Quantisierungswerten* 1 bis 4 zugeordnet sind. Dies ist durch die digitale Anzeige symbolisiert.

In den meisten Fällen sind die Zeitintervalle *äquidistant*, dies bedeutet in diesem Zusammenhang, dass immer gleich große Zeitintervalle zugrunde gelegt werden. Dies muss nicht zwingend so sein, aber im Allgemeinen ist die mathematische Beschreibung diskreter Systeme, die auf der Basis äquidistanter Zeitintervalle im Gegensatz zur mathematischen Beschreibung nicht äquidistanter Zeitintervalle vorgenommen wird, deutlich einfacher.

Die Unterteilung der Signalwerte in mehrere Intervalle gleicher Größe wird auch als *Quantisierung* bezeichnet, wie Sie es der folgenden Definition entnehmen können.



Definition nach IEV 702-04-07: *Quantisierung* ist ein Vorgang, bei dem der kontinuierliche Bereich von Werten, die eine Größe annehmen können, in eine Anzahl von vorbestimmten aneinander angrenzenden Intervallen aufgeteilt und jeder Wert innerhalb eines gegebenen Intervalls durch einen einzigen vorbestimmten Wert innerhalb des Intervalls dargestellt wird.

Diese Intervalle werden auch *Quantisierungsintervalle* genannt.



Definition nach IEV 704-24-02: Ein *Quantisierungsintervall* ist eines der benachbarten Intervalle, die bei der Quantisierung verwendet werden.

Durch die Quantisierung entsteht, wie in Abbildung 1.1 b) zu erkennen ist, ein prinzipieller Fehler, denn die Genauigkeit der Anzeige ist hier nur mit einer Stelle beziehungsweise einem Intervall von 1 gegeben. Dies kann prinzipiell durch die Wahl sehr viel kleinerer Intervalle des Signalwerts verbessert werden, sodass eine vorgegebene Fehlertoleranz eingehalten wird.

Dies bedeutet auch, dass bei einer weiteren Verarbeitung in einem digitalen System, beispielsweise in einer digitalen Schaltung, die gewünschte Genauigkeit eingehalten werden kann. Allerdings ist dies dann mit einem höheren schaltungstechnischen Aufwand der digitalen Schaltung verbunden.

In der Digitaltechnik wird aber fast ausschließlich mit binären Signalen gearbeitet, weswegen dieser Signalart eine besondere Bedeutung zukommt. Die binären Signale stellen eine Untermenge der digitalen Signale dar, wobei der Informationsparameter nur einen von zwei diskreten Werten annehmen kann. Dies können 0 und 1, Low und High, falsch und wahr, auf und zu oder auch Spannungswerte wie 0 und 5 V sein. Nachfolgend ist die Definition eines binären Signals angegeben.



Definition nach IEC 704-16-03: Ein *binäres Signal* ist ein digitales Signal, dessen Informationsparameter einen von zwei diskreten Werten annehmen kann.

In Abbildung 1.2 ist im Unterschied zu einem digitalen Signal mit mehreren diskreten Quantisierungswerten ein binäres Signal mit nur zwei diskreten Quantisierungswerten dargestellt. Hier werden die diskreten Werte 0 und 1 zugewiesen, die auch im weiteren Verlauf des Buches immer wieder Verwendung finden.

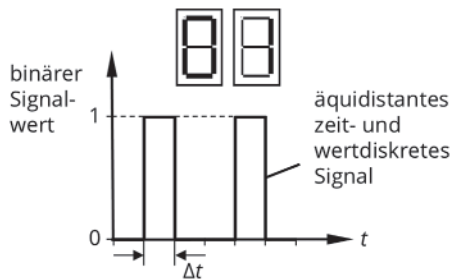


Abbildung 1.2: Darstellung eines binären Signals

Digitaltechnik versus Analogtechnik

Die Welt der verschiedenen Schaltungstechniken ist grob in zwei Gebiete zu unterteilen. Dies sind einerseits die wesentlich ältere Analogtechnik und andererseits die Digitaltechnik, die mit sehr wenigen Ausnahmen immer dominanter bei allen Produktentwicklungen wird.

Vorteile der Digitaltechnik im Vergleich zur Analogtechnik:

- ✓ Der Entwurf digitaler Systeme ist recht einfach, da sie mittels der Boole'schen Algebra einfach beschrieben werden können.
- ✓ Digitale Systeme unterliegen keiner Fehlerfortpflanzung.
 - Es können fast beliebig komplexe Systeme realisiert werden wie beispielsweise Mikroprozessorsysteme.
 - Des Weiteren können beliebig viele Bearbeitungsschritte nacheinander ausgeführt werden, da keine systematischen Fehler auftreten.
 - Die fehlende Fehlerfortpflanzung begünstigt auch die Übertragung von Information über große Entfernungen.
- ✓ Durch Parallelisierung digitaler Systeme kann eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit erzielt werden.

- ✓ Die Entwicklung von komplexen digitalen Systemen ist heute durch die programmierbare Logik und entsprechender unterstützender Werkzeuge weitestgehend automatisierbar.
- ✓ Der Test digitaler Systeme ist relativ einfach.

Nachteil der Digitaltechnik im Vergleich zur Analogtechnik:

- ✓ Digitale Systeme sind viel langsamer als analoge Systeme – aus diesem Grund ist die Analogtechnik im Hochfrequenzbereich dominant.

Um jetzt das Gebiet der Digitaltechnik genau zu umreißen und zu verdeutlichen, wie es sich von der Analogtechnik abgrenzt beziehungsweise wo die Schnittstelle zwischen beiden Techniken ist, folgt nun ein typisches Beispiel – ein einfaches Temperaturmessgerät. Im Blockschaltbild in Abbildung 1.3 ist dieses vom Sensor bis zur digitalen Anzeige mit allen auftretenden Signalen dargestellt.

Das *Temperaturmessgerät* besteht von links nach rechts aus folgenden sieben Teilsystemen:

1. *Sensor (Thermoelement)* (1) zur Erfassung der Messgröße und zur Umwandlung in ein analoges elektrisches Signal.
2. *Abtasthalteglied* (Sample-and-Hold-Verstärker) (2) zur Erfassung des elektrischen Signals zu äquidistanten Zeitpunkten und Bereitstellung des zeitdiskreten und wertkontinuierlichen Signals für die weitere Verarbeitung.
3. *Analog-Digital-Wandler* (3) für die Umwandlung des zeitdiskreten und wertkontinuierlichen Signals in ein digitales Signal für die Verarbeitung in der digitalen Schaltung.
4. *Taster (Schließer) als digitales Eingabegerät* (4) für die digitale Schaltung (5) zur Kalibrierung des Temperatursensors.
5. *Digitale Schaltung* (digitales System) (5) zur Verarbeitung des digitalen Signals des Analog-Digital-Wandlers (3), hier 10-Bit mit $2^{10} = 1024$ Quantisierungsintervallen, und des digitalen Eingabegeräts (4). Intern wird für die weitere Verarbeitung der Messwerte der Dualcode eingesetzt.
6. *Code-Umsetzer* (6), der den von der digitalen Schaltung bereitgestellten BCD-Code in den 7-Segment-Code zur Ansteuerung der dreistelligen 7-Segment-Anzeige (7) umwandelt.
7. *3-stellige 7-Segment-Anzeige als digitales Ausgabegerät* (7) zur Anzeige der gemessenen Temperatur.

Die Schnittstelle zwischen der Analogtechnik und der Digitaltechnik ist der Analog-Digital-Wandler (3). Dieser wird in der Regel der Analogtechnik zugeordnet, sodass die Digitaltechnik die digitale Schaltung (5) mit der Verarbeitung des gewandelten Messwerts inklusive des digitalen Eingabegeräts (4), hier dem Taster als Schließer zur Kalibrierung der Temperaturanzeige, den erforderlichen Code-Umsetzer (6) und das digitale Ausgabegerät (7) in Form der 3-stelligen 7-Segment-Anzeige umfasst.

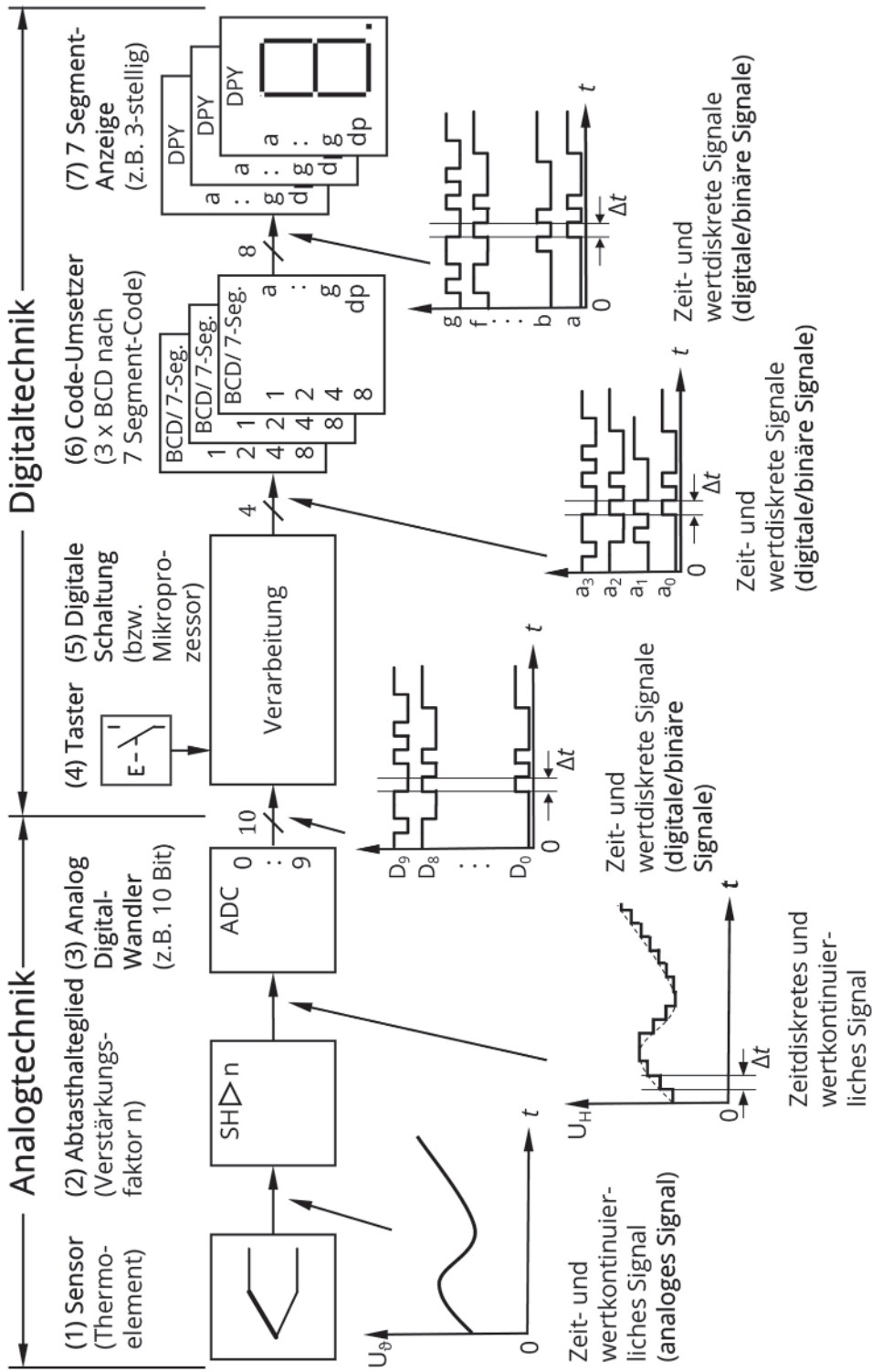


Abbildung 1.3: Abgrenzung des Fachgebiets Digitaltechnik von der Analogtechnik

Aus diesem Grund befasst sich dieses Buch mit den zuvor genannten Teilsystemen, der Theorie, dem Entwurf und die Umsetzung entsprechender digitaler Systeme.



Die Temperaturmessung im Detail

Für das Verständnis des gesamten Buches sind die zuvor gemachten Ausführungen ausreichend, falls Sie aber Interesse an weiteren Details zu der Temperaturmessung haben, empfehle ich Ihnen, die hier folgende detailliertere Beschreibung des Messgeräts zu lesen.

Das Temperaturmessgerät soll einen Messbereich von 0 bis 500 °C haben, über einen Taster bei 100 °C (kochendes Wasser) kalibrierbar sein und die Temperatur auf 1 °C genau auf einer 3-stelligen 7-Segment-Anzeige zur Anzeige gebracht werden, unabhängig von sonstigen Messfehlern.

Das Temperaturmessgerät beginnt mit einem Sensor (1), um die Messgröße Temperatur zu erfassen. Hier wird ein Thermoelement eingesetzt, das für den geforderten Temperaturbereich von 0 bis 500 °C eingesetzt werden kann. Die Genauigkeit der Temperaturmessung soll 1 K betragen. Die Spannung U_g , die das Thermoelement abgibt, ist ein analoges Signal (zeit- und wertkontinuierlich) und wird auch Thermospannung genannt. Sie liegt bei allen Thermopaaren im Bereich wesentlich kleiner 1 mV/K. Sie sind deshalb auch nur für die Messung höherer Temperaturen gut geeignet. Als Thermopaar wird hier Fe-CuNi eingesetzt. Im Bereich 0 bis 500 °C ist der Verlauf näherungsweise linear und liefert eine Spannung von ungefähr 0,055 mV/K. Bei Vollausschlag, also 500 °C soll das nachgeschaltete Abtasthalteglied (2) eine Spannung von 10 V für den nachfolgenden AD-Wandler (3) ausgeben. Daraus folgt eine erforderliche Verstärkung von ca. 364 für das Abtasthalteglied (2).

Das Abtasthalteglied (2) dient dazu, die gemessene Thermospannung für die äquidistante Dauer Δt konstant zu halten – der analoge Spannungswert wird für die Dauer Δt gespeichert und am Ausgang auf dem Wert zu Beginn von Δt konstant gehalten. Als Zeitintervall ist hier $\Delta t = 1$ s ausreichend. Mit dem gleichen Zeitintervall wird auch die gemessene Temperatur auf den 7-Segment-Anzeigen (6) ausgegeben.

Ein ausreichend großes Zeitintervall ist auch erforderlich, weil der nachfolgende Analog-Digital-Wandler (3) eine bestimmte Zeit für die Wandlung benötigt. Das Zeitintervall Δt muss also größer als die Wandlungszeit des Analog-Digital-Wandlers (3) sein.

Als Analog-Digital-Wandler (3) wird hier ein Analog-Digital-Wandler mit einer Auflösung von 10 Bit eingesetzt, wodurch sich $2^{10} = 1024$ Quantisierungsintervalle ergeben; bei einem Temperaturbereich von 0 bis 500 °C bedeutet dies, dass die Auflösung $< 0,5$ K beträgt, also ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

Der am Eingang des Analog-Digital-Wandlers (3) anliegende Spannungswert muss für die gesamte Wandlungszeit konstant anliegen, weil nur so der Spannungswert zum vorgegebenen Zeitpunkt gewandelt wird, ansonsten würde das analoge Signal während der Wandlungszeit am Eingang des Analog-Digital-Wandlers dem Wert zu irgendeinem Zeitpunkt innerhalb des Zeitintervalls Δt entsprechen und somit zu entsprechenden Fehlern führen.

Die digitale Schaltung (5) übernimmt vom Analog-Digital-Wandler (3) und dem digitalen Eingabegerät (4), einem Taster (Schließer), die digitalen Eingangsgrößen jeweils zu äquidistanten Zeitpunkten. Dies sind einerseits der gewandelte 10 Bit breite Wert als digitales Signal und andererseits der Zustand des Tasters (4) als binäres Signal für die weitere Verarbeitung.

Nach der Verarbeitung der digitalen Signale durch die digitale Schaltung (5) erfolgt die Umsetzung der internen digitalen Signale der digitalen Schaltung über den Code-Umsetzer (6) von einem BCD-Code in den 7-Segment-Code für die Ansteuerung der 7-Segment-Anzeigen (7), um die Temperatur anzuzeigen.

Hiermit wäre die Beschreibung der Teilsysteme des Temperaturmessgeräts abgeschlossen und Sie können jetzt mit den mathematischen Grundlagen beginnen.