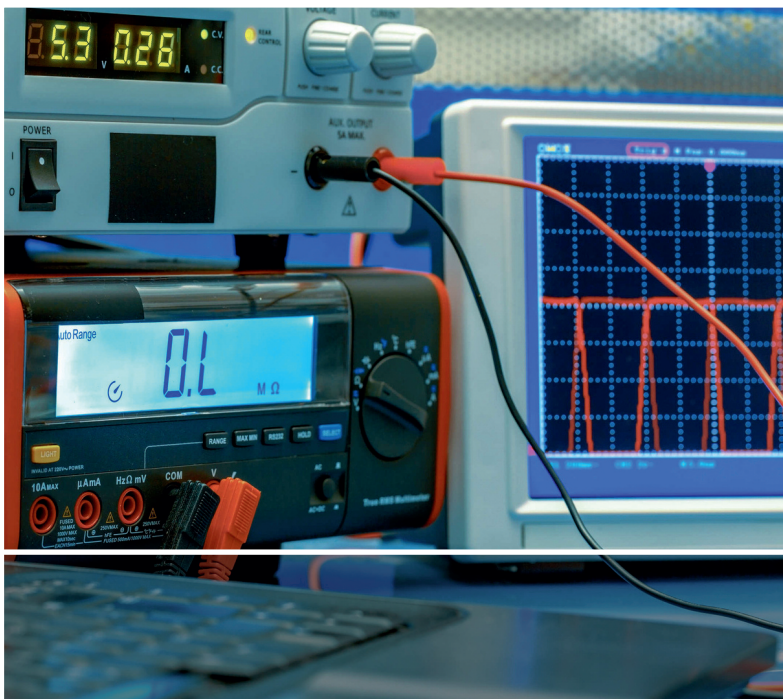


Thomas Beier
Thomas Mederer

Messdaten- verarbeitung mit LabVIEW



HANSER



bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Thomas Beier, Thomas Mederer

Messdatenverarbeitung mit LabVIEW

Mit 265 Bildern, 27 Tabellen, 35 Übungen und Lösungen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Dr.-Ing. Thomas Beier
Dipl.-Ing. Thomas Mederer
Staatliche Technikerschule Berlin



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-44265-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-44540-6

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Printed in Germany

Vorwort

Das Fach Messdatenverarbeitung wird schon seit langer Zeit an der Staatlichen Technikerschule Berlin (STB) unterrichtet, mit dem zusätzlichen Schwerpunkt der digitalen Signalverarbeitung. Die Messdatenverarbeitung wird mit Messgeräten unter Einsatz der Programmiersprache LabVIEW gelehrt.

Das Problem, die anspruchsvolle Theorie mit der Praxis in Einklang zu bringen, bestand von Anfang an. Während der praktische Teil sich gut mit LabVIEW programmieren lässt, ist der theoretische Teil der digitalen Signalverarbeitung mit der vorhandenen Literatur nur schwer zu vermitteln. Meist sind die guten Bücher der digitalen Signalverarbeitung für den mathematisch nicht vorgebildeten Studierenden nur schwer verständlich. Die STB hat im Unterricht von Anbeginn die anschauliche Beschreibung der streng mathematischen Vorgehensweise vorgezogen.

Mit diesem Buch haben sich die Autoren zum Ziel gesetzt, den Studierenden einen leichteren Zugang zur Theorie zu ermöglichen. Die Autoren sind sich bewusst, dass an einigen Stellen die Aussagen zu Gunsten der Verständlichkeit vereinfacht wurden. Viele allgemeingültige Aussagen, die quasi nur in der Praxis so vorkommen, werden nicht weiter in Frage gestellt. An dieser Stelle muss der interessierte Leser auf die weiterführende Literatur zurückgreifen.

Die Inhalte richten sich an Techniker, angehende Studenten, Praktiker und Autodidakten. Mit diesem Buch kann altes Wissen aufgefrischt werden, ohne in die tiefere Mathematik einsteigen zu müssen. Die Lösungen zu den Aufgaben sind im Buch direkt angegeben und können einfach nachgebildet werden. Bei den Lösungsbeispielen wurden im Wesentlichen elementare LabVIEW-Funktionen verwendet und auf die Anwendung fertiger Funktionen verzichtet. Selbst die Sinusfunktion wurde als eigenes SubVI programmiert. Die Themen des Buches entsprechen den Inhalten, die an der Staatlichen Technikerschule Berlin vermittelt werden.

Wir möchten uns an dieser Stelle für die gute Betreuung durch das Team des Hanser Verlags bedanken.

Das Autoren-Team wünscht den Lesern viel Freude beim Studium dieses Buches.

Berlin, im August 2015

Thomas Beier, Thomas Mederer

Inhalt

1	Einführung	11
	1.1 Historische Entwicklung	11
	1.2 Moderne Messwerterfassung und -verarbeitung	14
2	Digital-Analog-Umsetzer	16
	2.1 Grundbegriffe und Kennlinie	16
	2.2 Verfahren zur DA-Umsetzung	19
	2.3 Fehlerbetrachtung	20
	2.4 Übungen	24
	2.5 Lösungen	24
3	Analog-Digital-Umsetzer	27
	3.1 Grundbegriffe und Kennlinie	27
	3.2 Verfahren zur AD-Umsetzung	30
	3.3 Quantisierungsfehler	32
	3.4 Codierungen für Datenwandler	35
	3.5 AD-Umsetzung bei zeitveränderlicher Eingangsspannung	37
	3.6 Sample-Hold-Schaltung	39
	3.7 Übungen	44
	3.8 Lösungen	45
4	Signalabtastung und Signalrekonstruktion	48
	4.1 Abtastung und Abtast-Theorem	48
	4.2 Rekonstruktion des analogen Signals	52
	4.3 Übungen	55
	4.4 Lösungen	57
5	Messwerterfassungssysteme	59
	5.1 Grundstrukturen von Messwerterfassungssystemen	59
	5.2 Ausgewählte Sensoren	65
	5.2.1 Dehnungsmessstreifen (DMS)	66
	5.2.2 Kapazitive Messfühler	68
	5.2.3 Induktive Messfühler	76

5.3	Signalkonditionierung	78
5.4	Schaltungen zur Signalkonditionierung	78
5.4.1	Messverstärker	79
5.4.2	Filter	86
5.4.3	Messbrücken	86
5.4.4	Trägerfrequenz-Messverfahren	89
5.5	Übungen	93
5.6	Lösungen	95
6	Grundlagen zur digitalen Signalverarbeitung	98
6.1	Einführung	98
6.2	Grundelemente der digitalen Signalverarbeitung	108
6.3	Testsignale	115
6.4	Übungen	117
6.5	Lösungen	119
7	Digitale Filter	126
7.1	Filterentwurf	129
7.2	Filterentwurf mit einem Toleranzschema	129
7.3	IIR-Filterentwurf mit der impulsinvarianten z-Transformation	134
7.4	Filterentwurf mit der bilinearen z-Transformation	137
7.5	Transformation zwischen Tiefpass- und Hochpassfilter	147
7.6	Realisierung von Bandsperren und Bandpässen	150
7.7	Filter höherer Ordnung	151
7.8	Entwurfsverfahren für FIR-Filter	157
7.9	FIR-Filterentwurf mit einem Approximationsverfahren	161
7.10	Übungen	173
7.11	Lösungen	174
8	Diskrete Fourier-Transformation	179
8.1	Übungen	196
8.2	Lösungen	196
9	Digitale Signalprozessoren	201
9.1	Architektur	201
9.2	Befehlsverarbeitung	202
9.3	Zahlenformate	204
9.4	Besondere Adressierungsarten	204
9.5	DSP-Markt	205
9.6	Übungen	205
9.7	Lösungen	206

10	PC-Messtechnik	207
10.1	Messwerterfassung mit dem PC	207
10.2	Software zur PC-Messtechnik	209
10.3	Programmierung von Messgeräten über GPIB	210
10.3.1	Hardwareaufbau	210
10.3.2	Verwendete LabVIEW-Funktionen	215
10.3.3	Programmierung von Messaufgaben	218
10.3.3.1	Amplitudengang eines Filter aufnehmen	218
10.3.3.2	Frequenzgenauigkeit eines Funktionsgenerators überprüfen	227
10.3.3.3	Realisierung einer Waage mit Dehnungsmessstreifen	233
10.4	Programmierung von USB-Messmodulen	238
10.4.1	Hardwareaufbau von Messmodulen	238
10.4.2	Verwendete LabVIEW-Funktionen	241
10.4.3	Programmierung von Messaufgaben	241
10.4.3.1	Temperaturmessung	241
10.4.3.2	Wetterstation für Druck, Feuchte und Temperatur	244
10.4.3.3	Signalanalyse	246
10.5	Übungen	249
10.6	Lösungen	251
	Literatur	255
	Index	257

1

Einführung

Messen ist die quantitative Ermittlung des Wertes einer physikalischen Größe durch objektives Vergleichen mit einer Maßverkörperung. Schon in der Steinzeit mussten die Größen Länge und Masse für den Warenaustausch erfasst werden können. Es lag damals nah, hierfür die Körpermaße des Menschen wie z. B. Fuß oder Elle (Unterarmlänge) heranzuziehen. Der Begriff der Datenverarbeitung ist definiert als das Erfassen, Übermitteln, Ordnen und Umformen von Daten zur Informationsgewinnung, i. Allg. mit Hilfe eines Computers oder Mikrocomputers. Ein kleiner geschichtlicher Überblick soll die rasante Entwicklung hin zur Messdatenverarbeitung aufzeigen.

■ 1.1 Historische Entwicklung

Elektromechanische Instrumente

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte sich die elektrische Messtechnik. Eine wichtige Gruppe der elektromechanischen Instrumente waren die Zeigerinstrumente. Bei ihnen wurde die elektrische Größe in eine mechanische umgewandelt. Wichtige Vertreter solcher Instrumente waren das Drehspul- und das Dreheiseninstrument, aber auch frühe Oszillografen wie z. B. das Lichtstrahl-Oszilloskop. Das Messprinzip des Drehspul- oder Dreheiseninstruments spielt auch noch heute bei den digitalen Messinstrumenten eine Rolle, wenn es z. B. um den wahren Effektivwert (RMS) geht.

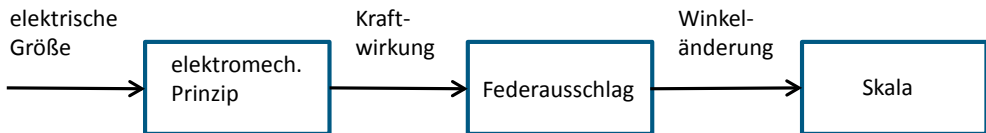


Bild 1.1 Elektromechanische Wirkkette



Bild 1.2 Elektromechanische Voltmeter

Elektronische Instrumente

Seit ca. 1910 wird in Verbindung mit Elektronenröhren von Elektronik gesprochen. Elektronische Bauelemente erweiterten nicht nur den Einsatzbereich konventioneller Instrumente, sondern ermöglichten auch neue Messmethoden und -prinzipien. So finden elektronische Hilfsmittel Anwendung in der Sensorik, bei Messverstärkern, in der Signalaufbereitung und -erzeugung sowie in der Übertragung von Messdaten. Wichtige Messgeräte dieser Art waren z. B. das Elektronenstrahl-Oszilloskop und der Kompensationsschreiber.

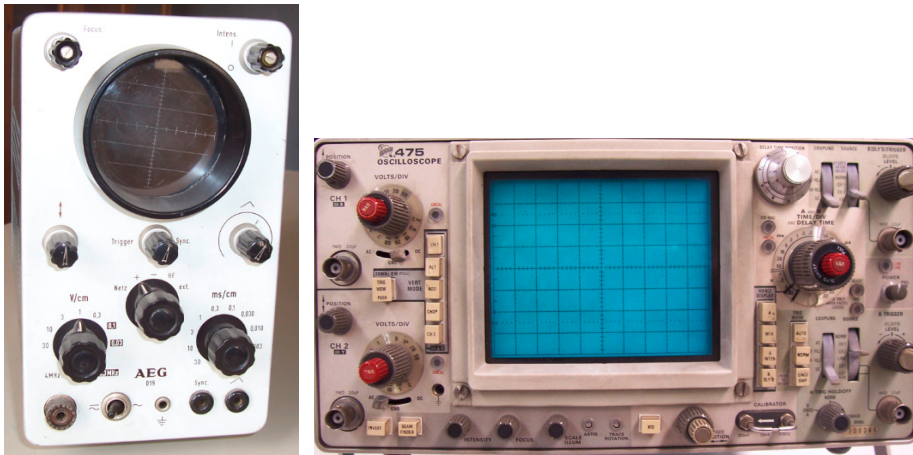


Bild 1.3 Elektronenstrahl-Oszilloskop

Digitale Instrumente

Mit der Verfügbarkeit integrierter Schaltungen zur Analog-Digital-Umsetzung (ADU) und Digital-Analog-Umsetzung (DAU) begann sich in den siebziger Jahren die digitale Messtechnik durchzusetzen. Diese Entwicklung ging einher mit zunehmender Verbreitung der digitalen Signalverarbeitung. Geräte der digitalen Messtechnik sind z. B. digitale Multi-meter (DMM), Zähler (Counter) und das Digitale-Speicher-Oszilloskop (DSO).



Bild 1.4 Digitales Multimeter, Funktionsgenerator

Rechnergestützte Messtechnik

Die Verbindung von Messtechnik mit Rechnern wurde mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Rechner intensiver und ausgefeilter. Heute besitzen Messgeräte eigene eingebaute Mikrorechner. Messwerterfassungs-Hardware ist in vielfacher Weise über geeignete Schnittstellen oder Bussysteme mit Rechnern unterschiedlichster Art verbunden bzw. vernetzt. Auch die zugehörige Software entwickelte sich von Assemblersprachen über Hochsprachen wie FORTRAN, BASIC und C hin zu komplexen, grafisch orientierten Programmierumgebungen, wie z. B. LabVIEW.

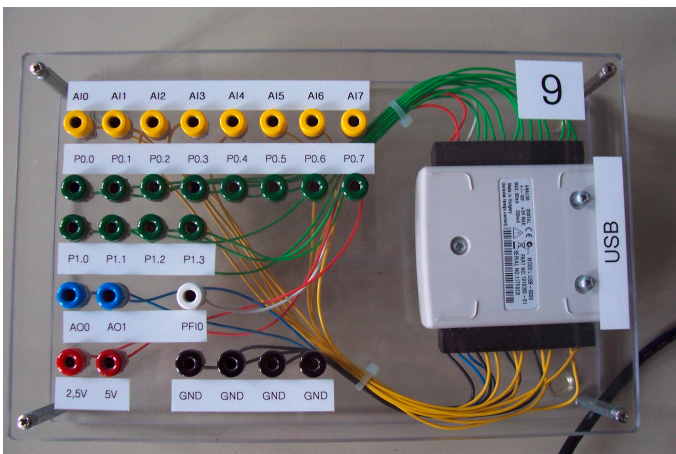


Bild 1.5 USB-Messbox

■ 1.2 Moderne Messwerterfassung und -verarbeitung

Die Anwendungen der modernen Messtechnik sind sehr vielseitig und komplex. Sie reichen von Aufgaben in der Mess- und Regelungstechnik über die Datenübertragung bis hin zur Sprach- und Bildverarbeitung. Wichtige Anwendungsgebiete sind z. B. in der Automatisierung, in der Medizintechnik oder in der Kommunikation zu finden.

Für Messwerterfassungssysteme (engl. DAQ-System = Data-Acquisition-System) ergeben sich aus den Messaufgaben die unterschiedlichsten Anforderungen. Bei der Konzipierung von Messsystemen stellen sich also insbesondere Fragen wie z. B.:

- Anzahl und Art (analog, digital) der zu erfassenden Messgrößen
- notwendige Signalkonditionierung
- zeitgleiche Erfassung von Messgrößen
- Frequenzinhalt der Messgrößen
- zulässige Messunsicherheit
- Messdauer
- erforderliche Online-Berechnungen

Für viele Anwendungen lässt sich die in Bild 1.6 dargestellte Grundstruktur für die Messwerterfassung und -verarbeitung skizzieren.

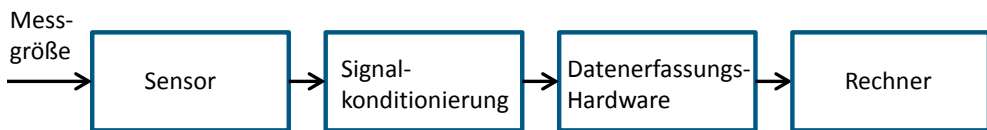


Bild 1.6 Grundstruktur eines Messwerterfassungssystems

Die einzelnen Funktionseinheiten seien im Folgenden kurz erläutert:

Sensor

Der Sensor (Messfühler, Messwertaufnehmer) ist empfindlich auf die nichtelektrische Messgröße. Es werden physikalische und chemische Effekte ausgenutzt, um die nichtelektrische Größe in eine elektrische Größe umzuformen.

Signalkonditionierung

Die Signalkonditionierung wandelt das Ausgangssignal des Sensors in ein „sinnvolles“ elektrisches Signal um. Ist das Ausgangssignal der Signalkonditionierung ein sog. Einheitssignal, dann wird die Signalkonditionierung auch als Messumformer oder Transmitter (engl. Transducer) bezeichnet. Die Signalkonditionierung enthält z. B. elektronische Komponenten wie Verstärker, Filter usw.

Datenerfassungs-Hardware

In der Datenerfassungs-Hardware werden die ankommenden Signale in der Regel digitalisiert und in entsprechende Schnittstellensignale für die digitale Weiterverarbeitung umgeformt. Die Datenerfassungs-Hardware enthält typischerweise Komponenten wie Multiplexer, Verstärker, AD-Wandler, Mikrorechner usw.

Rechner

Für die digitale Verarbeitung, Analyse, Ergebnisdarstellung bzw. Ergebnisausgabe können je nach Anwendungsfall unterschiedliche Rechner wie z. B. PC, Mikrocontroller oder Digitaler Signalprozessor mit entsprechender Peripherie zum Einsatz kommen.

Die einzelnen Funktionseinheiten können dabei sowohl als einzelne Bausteine vorliegen als auch zusammengefasst in einem einzelnen Baustein (Chip), wie z. B. beim „Smart-Sensor“. Die Hard- und Software für solche Messwerterfassungssysteme unterliegen dabei aufgrund der fortschreitenden Innovation einem ständigen Wandel.

2

Digital-Analog-Umsetzer

Ein Digital-Analog-Umsetzer (DAU), auch Digital-Analog-Wandler oder Digital-Analog-Converter (DAC) genannt, wandelt eine Zahl in eine Ausgangsspannung um.

■ 2.1 Grundbegriffe und Kennlinie

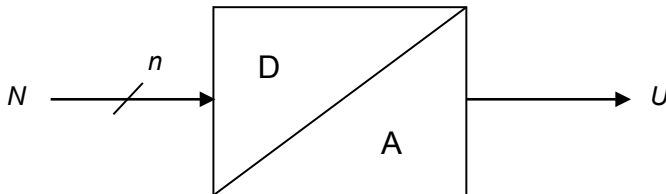


Bild 2.1 Blockbild DA-Umsetzer

Bild 2.1 zeigt das Blockbild für einen DA-Umsetzer. Die Zahl N als Eingangsgröße ist dabei meist als Dualzahl mit n Bits gegeben. Der Bereich der Ausgangsspannung U wird über eine Referenzspannung U_{ref} festgelegt.

Folgende Gleichung, die **Wandlungsfunktion**, beschreibt das Übertragungsverhalten:

$$U = U_{LSB} \cdot N \quad (2.1)$$

mit

$$U_{LSB} = \frac{U_{ref}}{2^n}$$

U_{ref} = Referenzspannung, legt den Spannungsbereich für U fest

U_{LSB} = Spannungsstufung in der Ausgangsspannung U ;

im Englischen sind folgende Bezeichnungen üblich:

U_{ref} = FS (full scale)

U_{LSB} = LSB

LSB bezieht sich dabei auf „Least Significant Bit“, d. h. die Ausgangsspannung U entspricht der Spannungsstufe U_{LSB} für die Eingangszahl $N = 1$ (LSB gesetzt).

Die grafische Darstellung der Wandlungsfunktion ergibt die **Kennlinie eines DAU**.

Beispiel 2.1:

Für einen 3-Bit-DAU ($n = 3$) mit der Referenzspannung $U_{ref} = 2,4 \text{ V}$ ist die Kennlinie zu zeichnen.

Lösung 2.1:

$$U = U_{LSB} \cdot N \quad \text{mit} \quad U_{LSB} = \frac{2,4 \text{ V}}{2^3} = 0,3 \text{ V}$$

Bei 3 Bit ergibt sich der maximale Wert für N zu

$$N_{max} = 2^n - 1 = 2^3 - 1 = 7$$

Die sich daraus ergebende Kennlinie (Punktfolge) ist in Bild 2.2 dargestellt.

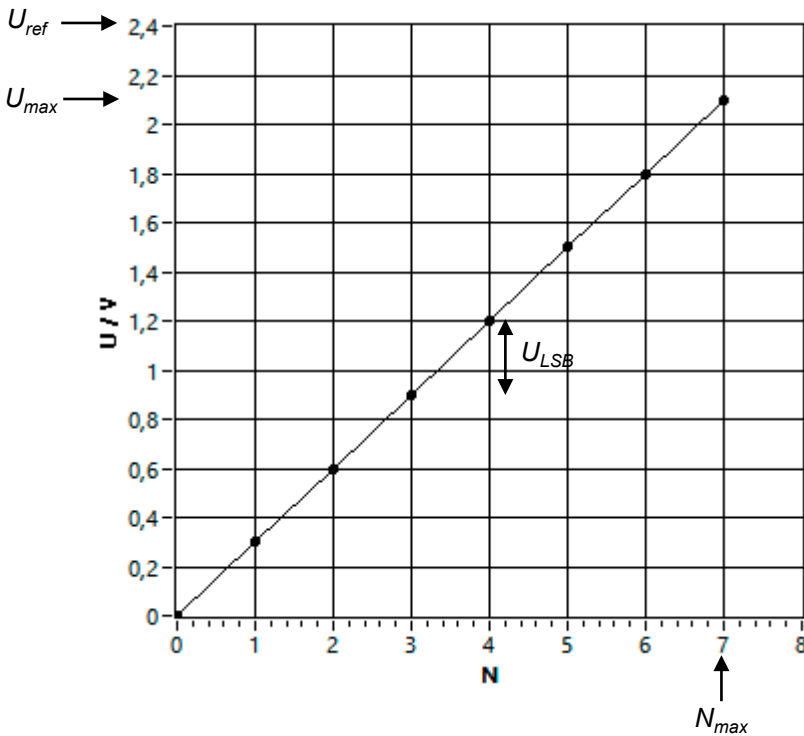


Bild 2.2 DAU-Kennlinie

Für die maximale Ausgangsspannung erhält man:

$$U_{max} = N_{max} \cdot U_{LSB} = 7 \cdot 0,3 \text{ V} = 2,1 \text{ V} = U_{ref} - U_{LSB}$$

Beispiel 2.2:

Simulation eines 4-Bit-DAU mit einem LabVIEW-Programm.

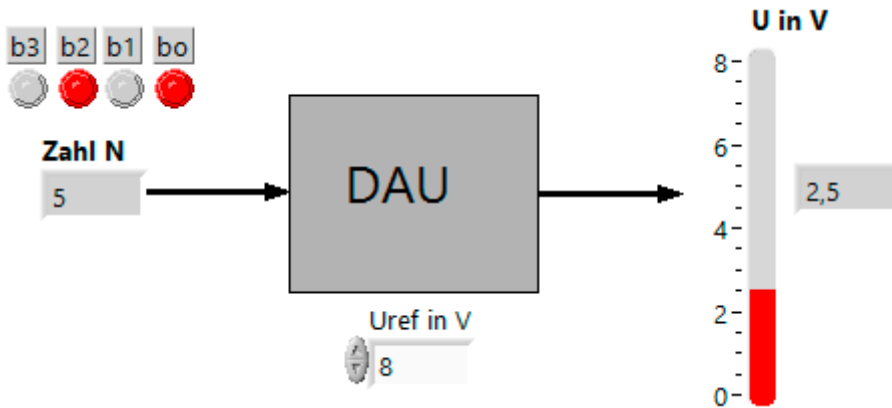


Bild 2.3 Schematische Darstellung im Panel

Die Darstellung im Panel (Bild 2.3) erfolgt mit Objekten aus der LabVIEW-Controls-Palette. Es ist die Eingabe einer 4-Bit-Dualzahl und einer Referenzspannung möglich.

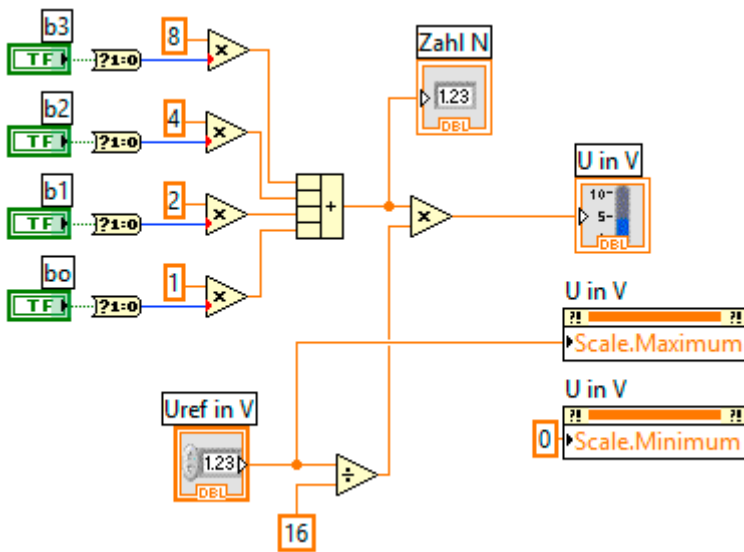


Bild 2.4 LabVIEW-Programm

Die Programmierung (Bild 2.4) erfolgt mit entsprechenden Elementen aus der LabVIEW-Funktions-Palette.

■ 2.2 Verfahren zur DA-Umsetzung

Zur Realisierung von DA-Wandlern werden unterschiedliche Schaltungen eingesetzt. Sie unterscheiden sich in den Eigenschaften wie Umsetzungsgeschwindigkeit, Auflösung, Genauigkeit, Linearität. Beispielhaft soll hier die Funktionsweise einer häufig eingesetzten Schaltung, dem R-2R-Leiternetzwerk (Bild 2.5), genauer betrachtet werden.

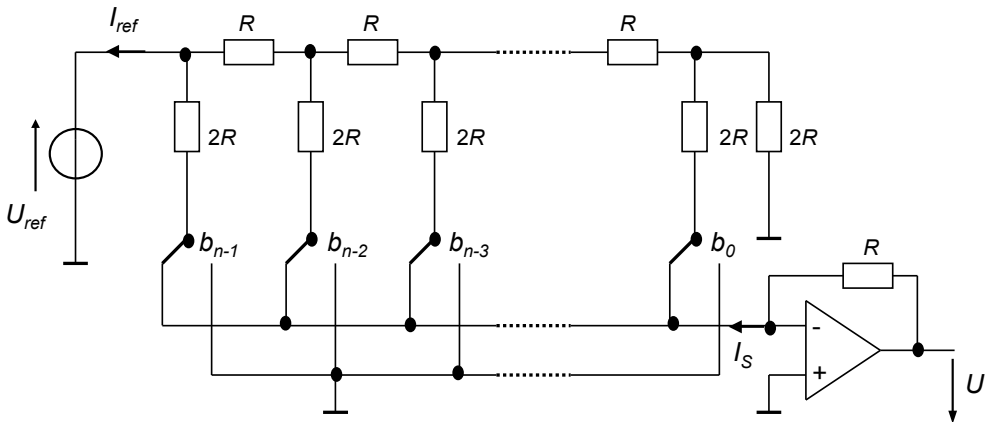


Bild 2.5 DAU mit R-2R-Leiternetz

Das Widerstandsnetzwerk bewirkt für die Spannungsquelle U_{ref} einen Gesamtwiderstand von R mit dem Gesamtstrom $I_{ref} = U_{ref}/R$ und an den Stromknoten jeweils die Halbierung des Stromes. Je nach Schalterstellung fließen die so binär gewichteten Ströme durch die Widerstände $2R$ nach Masse oder zum Summationspunkt am Operationsverstärker (OPV).

Ordnet man den Schaltern in Bild 2.5 die binären Variablen b_0 bis b_{n-1} zu, mit

$b_i = 0$, wenn der Schalter an Masse liegt

und

$b_i = 1$, wenn der Schalter am Summationspunkt des OPV liegt (gezeichnete Schalterstellung),

dann lässt sich die Stromsumme I_s am Summationspunkt des OPV in folgender Weise ausdrücken:

$$I_s = b_{n-1} \cdot \frac{I_{ref}}{2} + b_{n-2} \cdot \frac{I_{ref}}{4} + \dots + b_0 \cdot \frac{I_{ref}}{2^n}; \quad \text{mit } I_{ref} = \frac{U_{ref}}{R}$$

oder

$$I_s = \frac{I_{ref}}{2^n} \cdot (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_0 \cdot 2^0)$$

Der Ausdruck in der Klammer stellt eine Dualzahl N mit n Bits dar, also folgt:

$$I_s = \frac{I_{ref}}{2^n} \cdot N$$

Der Strom I_s führt über den Rückkopplungswiderstand R am OPV zur Ausgangsspannung U :

$$U = R \cdot I_s = R \cdot \frac{I_{ref}}{2^n} \cdot N = R \cdot \frac{U_{ref}}{R \cdot 2^n} \cdot N = \frac{U_{ref}}{2^n} \cdot N$$

und somit zur Funktionsgleichung eines DAU.

DAU-Verfahren in der Übersicht

In Tabelle 2.1 sind häufig angewendete Verfahren zur DA-Umsetzung zusammengefasst.

Tabelle 2.1 DAU-Verfahren

Verfahren	Eigenschaften	Einsatzbeispiele
R-2R-DA-Umsetzer	gute Genauigkeit, da nur zwei Widerstandswerte niederohmige Widerstandswerte für schnelle Anwendungen möglich	Mikrocontroller, Messkarten
stromgewichtete DA-Umsetzer	einfacher Aufbau bei hoher Auflösung großer Widerstandsbereich erforderlich	Messtechnik, Mikrocontroller
Sigma-Delta- DA-Umsetzer	hohe Auflösung bis 24 Bit gute Linearität	Audiotechnik

■ 2.3 Fehlerbetrachtung

Bei realen DA-Wandlern weicht die Kennlinie vom idealen Verlauf ab. In Bild 2.6 ist dies stark übertrieben dargestellt. Die Abweichungen sind entsprechend als Fehler definiert. (Diese allgemein üblichen Fehlerdefinitionen sind in analoger Weise auch für andere Elektronik-Bausteine festgelegt.)

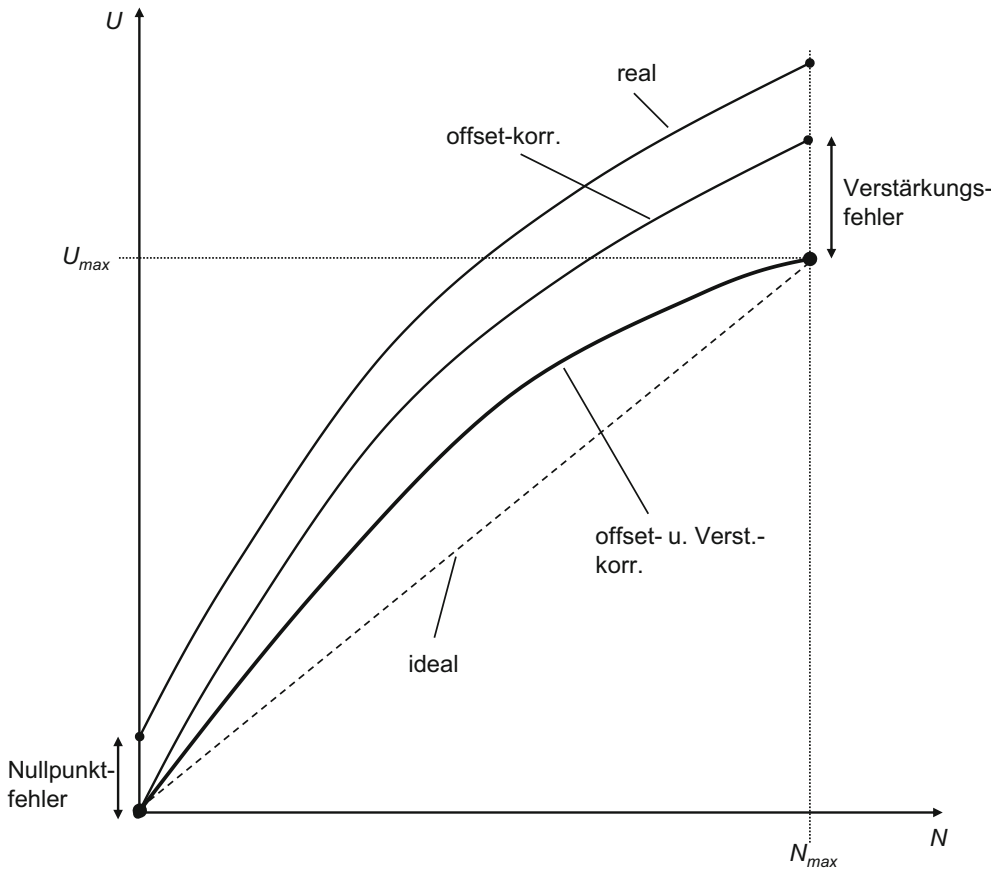


Bild 2.6 Reale DAU-Kennlinie

Nullpunktfehler (offset error)

Der Nullpunktfehler ist die Spannungsabweichung zwischen dem realen und idealen Nullpunkt (siehe Bild 2.6).

$$F_{\text{offset}} = U(N=0) - U_{\text{LSB}} \cdot 0 = U(N=0) \quad (2.2)$$

Er wird in der Regel abgeglichen (Verschiebung der realen Kennlinie über ein offset-Potentiometer in den idealen Nullpunkt).

Verstärkungsfehler (gain error, full scale error)

Nach Abgleich des Nullpunktfehlers verbleibt ein Verstärkungsfehler. Er gibt die Abweichung der maximalen Ausgangsspannung vom idealen Wert für U_{max} an (siehe Bild 2.6).

$$F_{\text{FS}} = U(N = N_{\text{max}}) - U_{\text{LSB}} \cdot N_{\text{max}} \quad (2.3)$$

Er wird z. B. in Prozent vom Endwert (full scale) oder als Vielfaches von U_{LSB} angegeben.

Auch der Verstärkungsfehler wird üblicherweise abgeglichen (Drehung der offset-korrigierten Kennlinie über ein Verstärkungs-Potentiometer in den idealen Endpunkt).

Nach Abgleich von Nullpunkt- und Verstärkungsfehler werden die verbleibenden Nichtlinearitäten in der Kennlinie wie folgt angegeben:

Integrale Nichtlinearität INL (integral non linearity)

Sie ist die Differenz zwischen der tatsächlichen Spannung U und der idealen Spannung, die durch $U_{LSB} \cdot N$ bestimmt ist.

$$INL(N) = U(N) - U_{LSB} \cdot N \quad (2.4)$$

Differentielle Nichtlinearität DNL (differential non linearity)

Es werden zwei benachbarte Punkte der Kennlinie betrachtet und die Abweichung zwischen der tatsächlichen Spannungsdifferenz und der idealen Spannungsdifferenz U_{LSB} ermittelt.

$$DNL(N, N+1) = (U(N+1) - U(N)) - U_{LSB} \quad (2.5)$$

Beispiel 2.3:

Bei der Messung an einem 3-Bit-DAU mit $U_{ref} = 10 \text{ V}$ wurden folgende Werte (Tabelle 2.2) ermittelt:

Tabelle 2.2 DAU-Messwerte

N	0	1	2	3	4	5	6	7
U/V	0,30	1,85	3,40	5,45	6,00	8,05	9,60	11,15

- Berechnen Sie U_{LSB} .
- Wie groß ist die maximale Spannung U_{max} , die der DAU liefern müsste?
- Korrigieren Sie den Nullpunktfehler.
- Korrigieren Sie den Verstärkungsfehler.
- Ermitteln Sie die maximale integrale Nichtlinearität INL_{max} des DAU.
- Ermitteln Sie die maximale differentielle Nichtlinearität DNL_{max} des DAU.
- Stellen Sie in einem Diagramm die ideale Kennlinie und die reale (offset- und verstärkungskorrigierte) Kennlinie dar.

Lösung 2.3:

$$\text{a) } U_{LSB} = \frac{10 \text{ V}}{2^3} = 1,25 \text{ V}$$

$$\text{b) } U_{max} = U_{LSB} \cdot N_{max} = 1,25 \text{ V} \cdot 7 = 8,75 \text{ V}$$

c) Zur Korrektur des Nullpunktfehlers muss von allen Punkten der gemessenen Kennlinie der Nullpunktfehler von 0,3 V subtrahiert werden. Das Ergebnis ist aus der Zeile zwei (U/V offset-korrigiert) von Tabelle 2.3 zu entnehmen.

d) Nach der Offset-Korrektur beträgt die max. Spannung 10,85 V. Der ideale Spannungswert ist 8,75 V. Zur Korrektur des Verstärkungsfehlers ist die offset-korrigierte Kennlinie mit dem Faktor $8,75 \text{ V}/10,85 \text{ V} = 0,8065$ in den idealen Endpunkt zu „drehen“. Das Ergebnis zeigt Zeile drei (U/V verstärkungskorrigiert) von Tabelle 2.3.

e) Die integrale Nichtlinearität INL ergibt sich nach Gleichung 2.4 aus der Differenz der Spannungswerte der Zeilen drei (U/V verstärkungskorrigiert) und vier (U/V ideal). Sie ist der fünften Zeile (INL/V) zu entnehmen. Der Maximalwert INL_{max} beträgt 0,40 V.

f) Die differentielle Nichtlinearität DNL ergibt sich nach Gleichung 2.5 aus der Differenz zweier aufeinanderfolgender Spannungswerte der Zeile drei (U/V verstärkungskorrigiert) im Vergleich zum idealen Wert U_{LSB} . Das Ergebnis zeigt die Zeile sechs (DNL/V). Der betragsmäßig maximale Wert liegt bei $DNL_{max} = 0,81 \text{ V}$.

g) In Bild 2.7 sind ideale und reale Kennlinie dargestellt.

Tabelle 2.3 Lösungen zu Beispiel 2.3

N	0	1	2	3	4	5	6	7
U/V offset-korrigiert	0,00	1,55	3,10	5,15	5,70	7,75	9,30	10,85
U/V verstärkungskorrigiert	0,00	1,25	2,50	4,15	4,60	6,25	7,50	8,75
U/V ideal	0,00	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75
INL/V	0,00	0,00	0,00	0,40	-0,40	0,00	0,00	0,00
DNL/V	—	0,00	0,00	0,40	-0,81	0,40	0,00	0,00

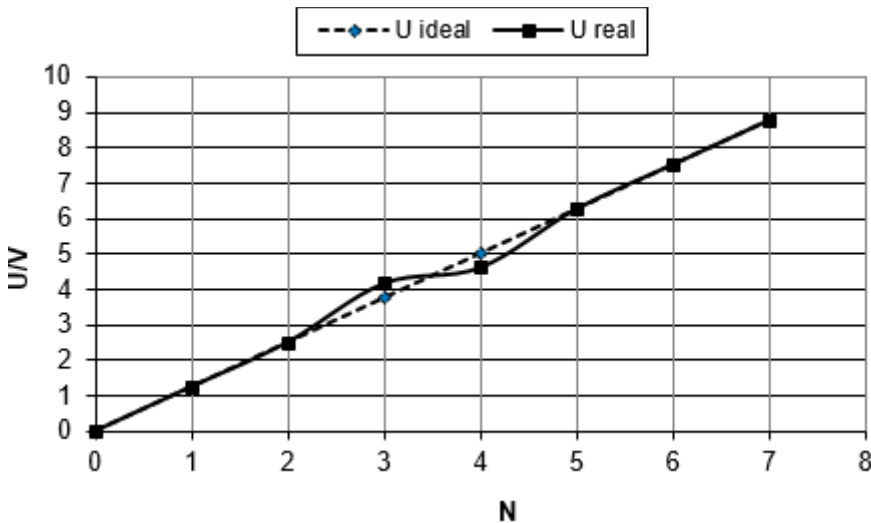


Bild 2.7 DAU-Kennlinien zu Beispiel 2.3

■ 2.4 Übungen

Aufgabe 2.1:

An einen 4-Bit-DAU werden die Eingangswerte $N = 10, 3$ und 7 angelegt und dabei die Ausgangsspannungen $U = 1 \text{ V}, 0,3 \text{ V}$ und $0,7 \text{ V}$ gemessen.

Welche maximale Ausgangsspannung U_{\max} hat der DAU?

Aufgabe 2.2:

Ein DAU mit dem Ausgangsspannungsbereich $0 \text{ V} \leq U \leq 2,5 \text{ V}$ soll eine Auflösung $U_{\text{LSB}} \leq 10 \text{ mV}$ haben.

Wie viele Bits muss der DAU mindestens haben?

Aufgabe 2.3:

Welche Fehlerarten lassen sich bei üblichen DA-Umsetzern extern abgleichen und wie wird der Abgleich prinzipiell durchgeführt?

Aufgabe 2.4:

Ein 5-Bit-DAU hat eine maximale Ausgangsspannung von $4,65 \text{ V}$.

Welche Ausgangsspannung ergibt sich bei einer Eingangsgröße von $N = 9$?

Aufgabe 2.5:

Bei einem 3-Bit-DAU mit $U_{\text{ref}} = 2 \text{ V}$ werden nacheinander die Ausgangsspannungen $0 \text{ V}; 0,3 \text{ V}; 0,4 \text{ V}; 0,75 \text{ V}; 1,0 \text{ V}; 1,2 \text{ V}; 1,5 \text{ V}; 1,75 \text{ V}$ gemessen.

Bestimmen Sie die maximalen Linearitätsfehler (Betrag) INL_{\max} und DNL_{\max} .

Aufgabe 2.6:

Skizzieren Sie die Kennlinie eines DAU mit den Daten: $FS = 4 \text{ V}; n = 4$

■ 2.5 Lösungen

Lösung 2.1:

$$U = U_{\text{LSB}} \cdot N \Rightarrow U_{\text{LSB}} = \frac{U}{N} = \frac{1 \text{ V}}{10} = 0,1 \text{ V}$$

$$U_{\max} = U_{\text{LSB}} \cdot N_{\max} = U_{\text{LSB}} \cdot (2^4 - 1) = 1,5 \text{ V}$$

Lösung 2.2:

$$U_{\text{LSB}} = \frac{U_{\text{ref}}}{2^n} \leq 10 \text{ mV} \Rightarrow 2^n \geq \frac{2,5 \text{ V}}{10 \text{ mV}} = 250$$

$$n \geq \text{ld}(250) = 7,97 \quad \text{d. h. } n \geq 8$$

Lösung 2.3:

Nullpunktfehler (offset error): Eingangsgröße $N = 0$ anlegen und über das Offset-Potentiometer auf $U = 0$ V abgleichen.

Verstärkungsfehler (full scale error): Eingangsgröße $N = N_{max}$ anlegen und über das Verstärkungs-Potentiometer auf $U = U_{max}$ abgleichen.

Lösung 2.4:

$$U_{ISB} = \frac{U_{max}}{N_{max}} = \frac{4,65\text{V}}{2^5 - 1} = 0,15\text{V}$$

$$U = U_{ISB} \cdot N = 0,15\text{V} \cdot 9 = 1,35\text{V}$$

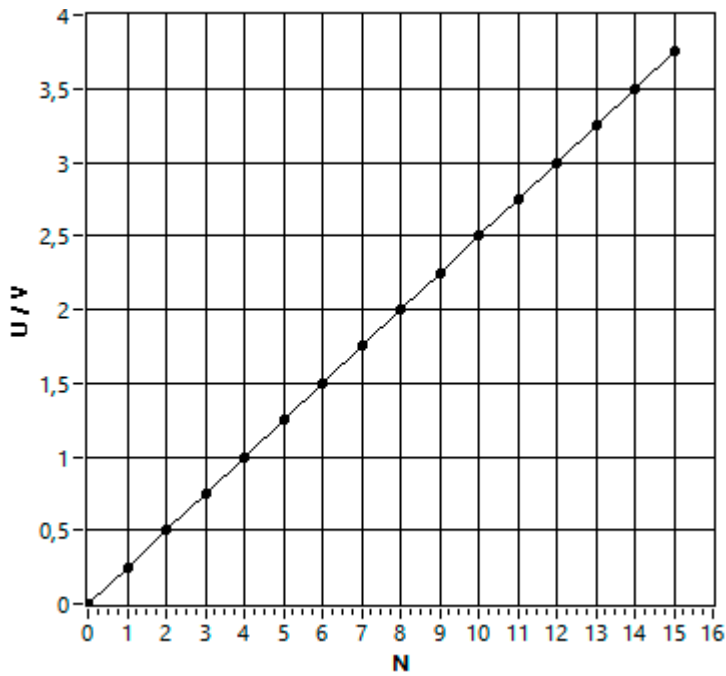
Lösung 2.5:

Nullpunkt- und Verstärkungsfehler sind nicht vorhanden bzw. abgeglichen.

Für die Linearitätsfehler ergeben sich nach Definition die Werte in Tabelle 2.4 mit $INL_{max} = 0,1$ V und $DNL_{max} = 0,15$ V (Betragswerte).

Tabelle 2.4 Aufgabe 2.5: Linearitätsfehler

N	0	1	2	3	4	5	6	7
U/V Messwerte	0,0	0,3	0,4	0,75	1,0	1,2	1,5	1,75
U/V ideal	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
INL/V	0	0,05	-0,1	0	0	-0,05	0	0
DNL/V	—	0,05	-0,15	0,1	0	-0,05	0,05	0

Lösung 2.6:**Bild 2.8** Kennlinie zu Aufgabe 2.6