

HANSER



Leseprobe

Thomas Beier, Thomas Mederer

Messdatenverarbeitung mit LabVIEW

ISBN (Buch): 978-3-446-44265-8

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

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44265-8>

sowie im Buchhandel.

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

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

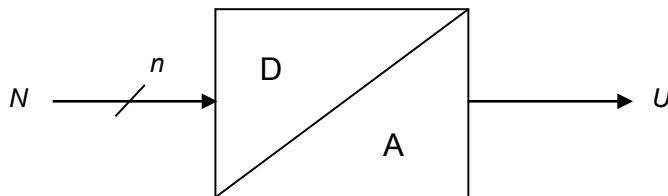


Bild 2.1 Blockbild DA-Umsetzer

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 $U_{ref} = 2,4$ 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.

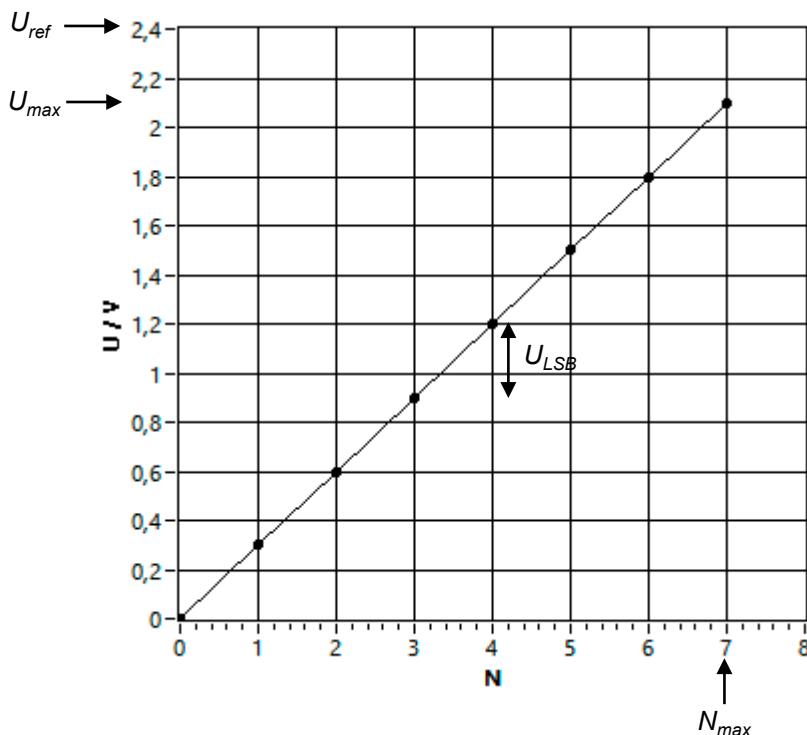


Bild 2.2 DAU-Kennlinie

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.

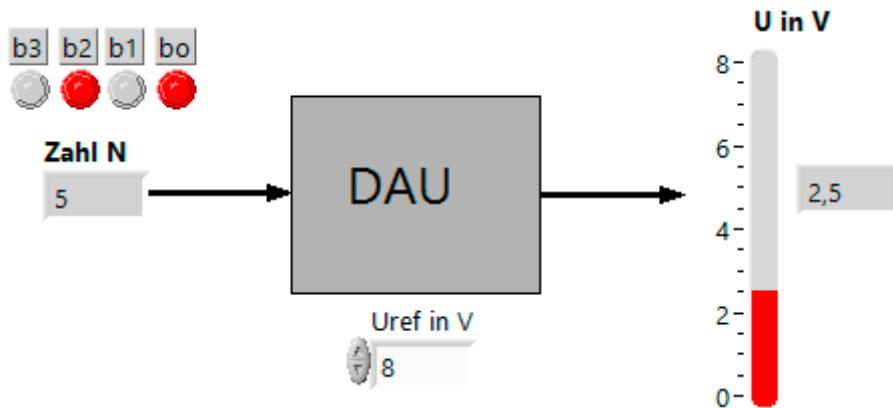


Bild 2.3 Schematische Darstellung im Panel

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.

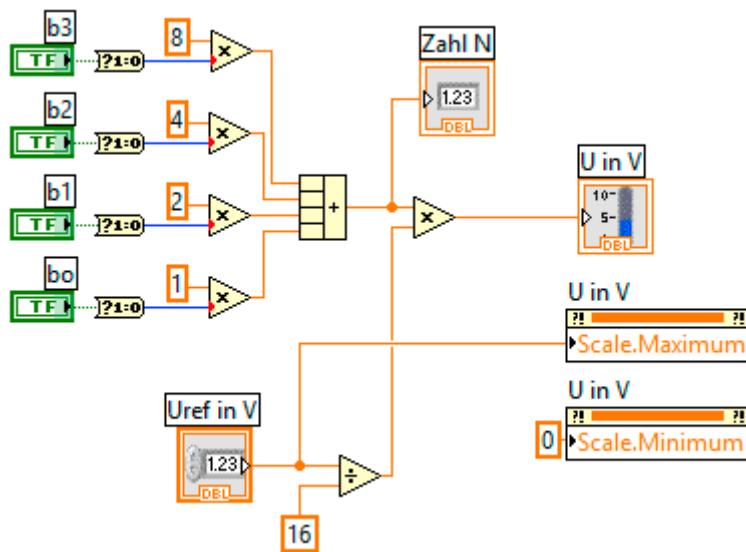


Bild 2.4 LabVIEW-Programm

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.

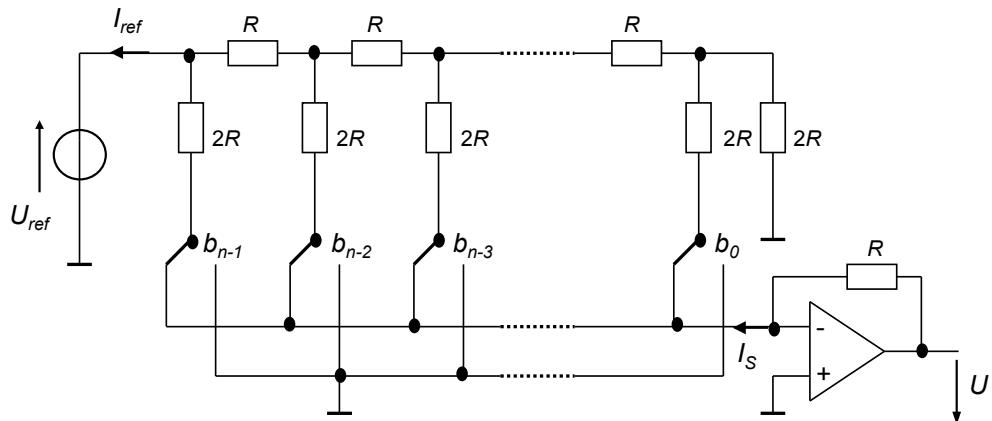


Bild 2.5 DAU mit R-2R-Leiternetz

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:

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

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 niedrige 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.)

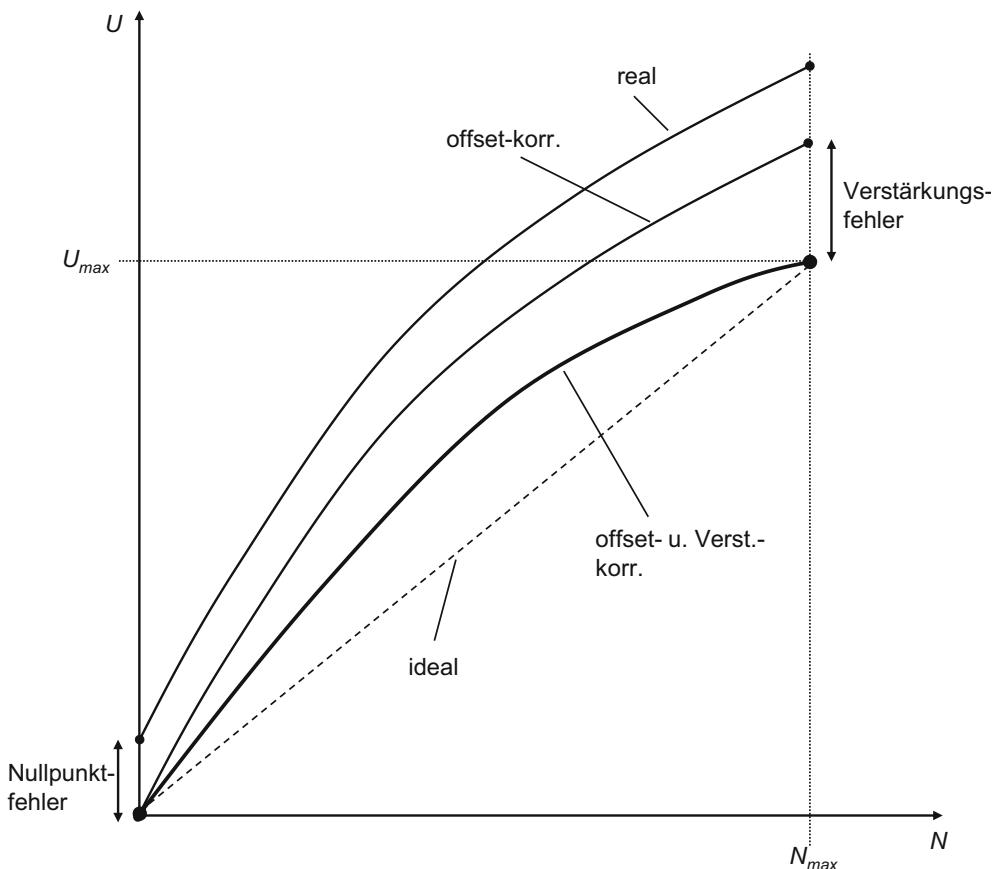


Bild 2.6 Reale DAU-Kennlinie

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).

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

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 $U_{ref} = 10$ 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

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

Lösung 2.3:

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

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

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

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

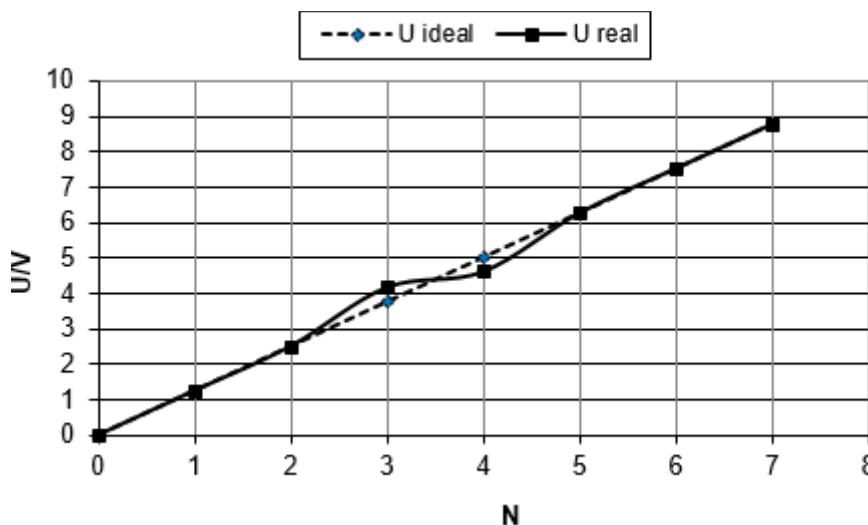


Bild 2.7 DAU-Kennlinien zu Beispiel 2.3

Index

A

Ableitung 102
Abtastfrequenz 42 f., 48
Abtastintervall 42
Abtastsignale 183
Abtast-Theorem 49
Abtastung 52
Abtastwerte 48
Acquisition Time 40
AD-Umsetzer 27, 41
ADC 27
Addierer 108
ADU-Integrationsverfahren 32
ADU-Kennlinie 28
ADU-Parallelverfahren 32
ADU-Sigma-Delta-Verfahren 32
ADU-Verfahren 30, 32
ADU-Wandlungsfunktion 27
Aliasing Effekt 50
ALU 202
Amplituden 105
Amplitudendämpfung 53 f.
Amplitudenfehler 54
Amplitudenfehler-Reduzierung 55
Anti-Aliasing-Filter (AAF) 52
Aperture Delay Time 40

B

Bandpassfilter 126
Bandsperrfilter 126
Barrel-Shifter 204
Bessel-Tiefpass-Filter 130
bipolare Wandler 35
Bitreverse-Adressierung 205
Bodediagramm 105
Butterworth-Tiefpass 130

C

circulare Adressierung 205
Continuous-Scanning 65
Counter 214

D

DA-Umsetzer 16
DA-Wandler 52
DAC 16
DAQ Assistant 241
DAQ-Hardware 207
DAU-Kennlinie 16
DAU-Verfahren 20
DAU-Wandlungsfunktion 16
DFT 183, 185
Dielektrizitätskonstante 68
DIFF 62, 239
Differential-Tauchanker-Aufnehmer 78
differentielle Nichtlinearität DNL 22
Differenzengleichung 101 f., 107
digitaler Signalprozessor 201
digitaler Signalcontroller 201
digitaler Trigger 239
diskrete Fourier-Transformation 183
Droop Rate 41
DSP 107

E

Eingangsfrequenz 43
Entwurfsmethode 161
Express-Palette 240

F

Faltung 165, 189
Fast Fourier Transformation 185

Fensterfunktion 186
 Festpunkt-Arithmetik 204
 FFT 185
 Filter 86
 Filterarten 127
 Finite Impulse Response 127
 FIR 126
 Fourieranalyse 49
 Fourier-Transformation 179
 FT 179
 FTA 183
 Full Scale 16
 Funktionsgenerator 212

G

Gewichtsfunktion G 53
 Glättungs-Tiefpass 52
 Gleitkomma-Arithmetik 204
 GPIB 207 f., 210 f., 215

H

Halbbrücke 88, 91
 Harvard-Architektur 202
 Hochpassfilter 126
 Hold Settling Time 41

I

idealer Operationsverstärker 81
 IIR 126
 Infinite Impulse Response 128
 Instrumentierungs-Verstärker 85
 integrale Nichtlinearität INL 22
 Interval-Scanning 65
 invertierender Operationsverstärker 80
 I.Q Format 204

K

kapazitive Messfühler 68
 k-Faktor 67
 Kreissymbol 108

L

LabVIEW 17, 49, 209, 218, 240
 LSB 16

M

MAC-Befehl 202
 MAC-Einheit 202
 mehrkanalige Datenerfassung 65
 Messbrücken 86
 Messwerterfassung 59
 Messwerterfassungssysteme 59
 Multimeter (DMM) 213
 Multiplizierer 108

N

nichtrekursive Filter 126
 NRSE 62
 Nullpunktfehler 21

O

offset binär 35
 Operationsverstärker 80, 82
 Ortskurve 104

P

parallele Schnittstelle 207
 Phasengang 105
 Pipelining 203
 Plattenkondensator 68, 70, 72
 Poisson-Zahl 67

Q

Quantisierungseinheit 27
 Quantisierungsfehler 28, 32 f.
 Quantisierungsrauschen 34

R

R-2R Leiterernetzwerk 19
 reale SH-Schaltung 40
 Reduzierung Amplitudenfehler 55
 Referenzspannung 16, 27
 Rekonstruktion 52
 rekursive Filter 126
 relative Längenänderung 67
 Repeat-Instruktion 204
 RS-232 207
 RSE 61, 239
 Rückkopplungsanteil 127

S

Sample-Hold-Schaltkreis 39
Schnittstellen 207
serielle Schnittstelle 207
SH-Schaltkreis 41
SH-Steuersignal 41
Sigma-Delta-DA-Umsetzer 20
Signalabtastung 48
Signal/Rauschverhältnis SNR 34
Simultaneous-Scanning 65
SINAD 35
Smart-Sensor 244
SNR 34
straight binär 35
String 216
Strom-Spannungswandler 81 f.
Subtrahierschaltung 84
SubVI 50, 219
sukzessive Approximation 30
Summierschaltung 83

T

Tiefpassfilter 126
Trägerfrequenz-Messverfahren 89

Trennverstärker 86

Triggerung 65
Tschebyscheff-Tiefpassfilter 130

U

Übertragungsfunktions 131
unipolare Wandler 35
USB 208
USB-Messmodul 238 ff.

V

Verstärkungsfehler 21
Verzögerungselement 108 f.
Verzögerungszeit 108
Vollbrücke 87
von Neumann-Architektur 201

W

Wandlungszeit 37

Z

Zylinderkondensator 74