

Rainer Eckl/Leonhard Pütgens/Jürgen Walter

# A/D-und D/A- Wandler

Ein Arbeitsbuch mit Grundlagen,  
Prinzipschaltungen und Applikationen

Mit 243 Abbildungen und 33 Tabellen

***Franzis***

# Inhalt

	<b>Analog/Digital-Umsetzer</b> . . . . .	<b>.11</b>
.1	Einleitung . . . . .	.11
.2	Umsetzverfahren . . . . .	.11
.2.1	Analog/Digital-Wandlung mit Spannungs/Frequenz-Umsetzer . . . . .	.11
.2.1.1	Direktes Zählverfahren . . . . .	.13
.2.1.2	Das Verhältniszählverfahren . . . . .	.16
.2.2	Umsetzung nach dem Rampenverfahren . . . . .	.18
.2.2.1	Das Ein-Rampen-Verfahren . . . . .	.18
.2.2.2	Zwei-Rampen-(Dual-Slope-) Analog/Digital-Umsetzer . . . . .	.20
.2.2.3	Das Vier-Rampen-Verfahren (Quad-Slope) . . . . .	.22
.2.3	Umsetzung nach dem Wägeverfahren . . . . .	.26
.2.4	Parallelumsetzer . . . . .	.30
.2.5	Halb-Parallel-Umsetzer . . . . .	.35
.3	Hinweise zur Schaltungsentwicklung mit A/D-Umsetzern . . . . .	.38
.3.1	Pufferverstärker . . . . .	.39
.3.2	Halteverstärker (Sample + Hold, Track + Hold) . . . . .	.43
.3.3	Datenerfassungssysteme . . . . .	.47
.3.4	Tips zur Schaltplanerstellung . . . . .	.52
.3.5	Layout . . . . .	.52
.3.6	Gehäuse . . . . .	.53
.4	Die digitale Darstellung von Zahlunge (Coding) . . . . .	.58
1.4.1	Binäre Darstellung von ganzen und gebrochenen Zahlen . . . . .	.58
1.4.1.1	DerBCD-Code (Binary-Coded-Decimal) . . . . .	.59
1.4.1.2	Gray-Code . . . . .	.60
1.4.1.3	Invertierte Codes . . . . .	.60
1.4.2	Bipolare Codes für positive und negative Zahlenwerte . . . . .	.60
1.4.2.1	Vorzeichen + Betrag (Sign-Magnitude) . . . . .	.61
1.4.2.2	Binär-Offset (Offset Binary) . . . . .	.61
1.4.2.3	Das Zweierkomplement (Two's Complement) . . . . .	.61
1.4.2.4	Das Einerkomplement (Ones Complement) . . . . .	.62
1.4.2.5	Weitere bipolare Codes . . . . .	.62
1.5	Zukunftsaussichten bei A/D-Umsetzern . . . . .	.64
<b>2</b>	<b>Digital/Analog-Umsetzer</b> . . . . .	<b>.65</b>
2.1	Einleitung . . . . .	.65
2.2	Digital/Analog-Umsetzverfahren . . . . .	.69
2.2.1	Das Parallelverfahren . . . . .	.69

ht auf die  
id dürfen  
r Sorgfalt  
reprodu-  
wungen,  
gendeine  
Mitteilung

## Inhalt

2.2.2	Das Wägeverfahren	.72
2.2.3	Das R-2R-Netzwerk	.75
2.2.4	Das Zählverfahren	.79
2.2.5	Das D/A-Umsetzverfahren mit Kondensatoren (C-DAU)	.81
2.3	Herstellungstechniken	.83
2.3.1	Die Bipolar-Technik	.84
2.3.1.1	Zur Funktion der bipolaren D/A-Umsetzer	.86
2.3.1.2	Aufbau der Stromschalter	.89
2.3.2	Die CMOS-Technik	.92
2.3.2.1	Das Ersatzschaltbild des CMOS-DAU	.94
2.3.2.2	Latch-up in CMOS-Schaltungen	.96
2.3.2.3	Grundsaltungen für CMOS-D/A-Umsetzer im stromschaltenden Mode	.98
2.3.2.4	Spannungschaltende DAUs für unipolare Versorgungsspannungen	.104
2.4	Der Glitcheffekt	.109
2.5	Logarithmische D/A-Umsetzer	.113
2.6	D/A-Umsetzer für Videoanwendungen	.117
<b>3</b>	<b>Messungen an Umsetzern</b>	<b>.124</b>
3.1	Einleitung	.124
3.2	Messungen an D/A-Umsetzern	.124
3.2.1	Spezifikationen	.124
3.2.1.1	Offsetfehler	.126
3.2.1.2	Verstärkungsfehler	.127
3.2.1.3	Linearitätsfehler	.128
3.2.1.4	Übersicht der wichtigsten Tests eines DAU	.132
3.2.2	Testschaltungen für D/A-Umsetzer	.132
3.3	Statische Tests an A/D-Umsetzern	.135
3.3.1	DC-Spezifikationen	.135
3.3.1.1	Offsetfehler	.137
3.3.1.2	Verstärkungsfehler	.138
3.3.1.3	Linearitätsfehler	.139
3.3.1.4	Problematik: Codeübergang	.140
3.3.1.5	Übersicht der wichtigsten DC-Tests eines ADU	.141
3.3.2	Testschaltungen für A/D-Umsetzer	.144
3.3.2.1	ADU-Test nach dem Wobbel-Prinzip	.144
3.3.2.2	Rechnergesteuerte Testschaltung	.145
3.4	Dynamische Tests an A/D-Umsetzern	.149
3.4.1	Einleitung	.149
3.4.2	AC-Spezifikationen	.150
3.4.2.1	Signal-Rauschabstand (SNR)	.150
3.4.2.2	Effektive Genauigkeit (ENOB, Effective Number of Bits)	.152
3.4.2.3	Klirrfaktor (Total Harmonic Distortion, THD)	.153
3.4.2.4	Intermodulations-Verzerrungen (IMD, Intermodulation Distortion)	.153
3.4.2.5	Rauschleistungs-Verhältnis (NPR, Noise Power Ratio)	.154
3.4.2.6	Aperturzeit (Aperture Time),-Unsicherheit (Uncertainty)	.154

3.4.3	Testschaltungen	.156
3.4.3.1	Rekonstruktionsverfahren	.156
3.4.3.2	Dynamischer Test mit Computerauswertung (FFT)	.157
3.4.3.3	FFT-Analyse mit Signalprozessor (SP)	.164
3.4.3.4	Histogramm-Test	.165
3.4.3.5	Messung des Rauschleistungs-Verhältnisses (NPR, Noise-Power-Ratio)	.167
3.4.3.6	Messung der Apertur-Unsicherheit (Aperture-Jitter)	.169
<b>4</b>	<b>Störeinflüsse und Fehlerquellen</b>	<b>.no</b>
4.1	Erdungsproblem und Masseführung	.170
4.2	Kompensation bei D/A-Umsetzern	.174
4.3	Puffer für schnelle A/D-Umsetzer	.180
<b>5</b>	<b>Applikationen</b>	<b>.183</b>
5.1	Analog/Digital-Umsetzer	.183
5.1.1	Relative Temperaturmessung mit digitaler Nullpunkteinstellung	.183
2	Hochintegriertes Datenerfassungssystem	.183
3	Temperaturerfassung mit 10 Bit Auflösung	.185
4	A/D-Umsetzer mit seriellem Ausgang im DFÜ-Einsatz	.188
5	Halteverstärker ohne Droop-Rate mit dem AD 7569	.190
6	Digitale Spracherfassung und-wiedergabe ohne Halteverstärker	.190
7	Galvanisch trennende Datenerfassung mit hohem Dynamikbereich	.192
8	Präzisionsmessung an Brücken mit bis zu 18 Bit Auflösung	.195
9	Variable analoge Verzögerungsleitung	.196
5.1.10	Analoge Ereignisaufnahme und-speicherung	.197
5.2	D/A-Umsetzer	.199
5.2.1	Leistungsteiler	.199
5.2.2	Digital einstellbare Stromquelle 0 ... 20 mA bzw. 4 ... 20 mA	.202
5.2.3	Präzisions-Widerstandsmessung	.203
5.2.4	Digital programmierbare Oszillatoren	.204
5.2.5	Digital einstellbare Filter	.209
5.3	Programmierbare Verstärker (PGA) mit D/A-Umsetzer und Operationsverstärker	.216
5.3.1	Grundlegendes	.217
5.3.2	Definition der Fehlerquellen	.219
5.3.2.1	Überschlagsrechnung zur Vereinfachung	.220
5.3.2.2	Krümmung der Fehlergeraden durch Verstärkungsfehler des DAU	.222
5.3.2.3	DC-Offsetfehler durch weitere Fehlerquellen	.223
5.3.2.4	Vergrößerung der Fehler durch Temperaturänderungen	.225
5.3.3	Verringerung der Fehler	.226
5.3.3.1	Verstärkungsfehler	.226
5.3.3.2	DC-Offsetfehler	.227
5.3.4	Eine Lösung mit einem 14-Bit-DAU	.228
5.3.5	Die Rauschverstärkung	.232
5.3.6	Testergebnisse	.235

Inhalt	
5.3.7	Verbesserung des Systems mit Zweifach-DAU. . . . . 238
5.3.7.1	Grundgleichungen eines Systems mit Zweifach-DAU. . . . . 239
5.3.8	Fehlervergleiche der verschiedenen Systeme untereinander. . . . . 241
5.3.9	Dynamische Probleme, Stabilität und Kompensation. . . . . 245
5.3.9.1	Kleinsignal-Bandbreite. . . . . 246
5.3.9.2	Dynamische Verstärkungsfehler. . . . . 247
5.3.9.3	Analyse des Verstärkungsfehler-Faktors. . . . . 248
5.3.9.4	Klirrfaktor und Rauschen. . . . . 250
5.3.9.5	Ausgangs-Wechselstrom-Kopplung. . . . . 252
5.3.9.6	Testergebnisse. . . . . 253
5.3.9.7	Schaltung mit zusätzlichem, festem Verstärkungsanteil. . . . . 256
<b>Anhang 1:</b>	Ableitung codeabhängiger Fehlerquellen (zu Kapitel 5.3). . . . . 258
<b>Anhang 2:</b>	Englisch/Deutsches Vokabular. . . . . 261
<b>Literaturverzeichnis.</b>	<b>.267</b>
<b>Sachverzeichnis.</b>	<b>.269</b>