

---

# Elektronische Meßtechnik

---

Eine Einführung für angehende  
Wissenschaftler

---

Von  
Georg Heyne

---

Oldenbourg Verlag München Wien

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1 Einleitung .....	3
2.2 Rauschen .....	3
2.2.1 Thermisches Rauschen (Johnson noise) .....	3
2.2.2 1/f - Rauschen (flicker noise) .....	4
2.3 Meßstrecke .....	5
2.3.1 Quelle .....	5
2.3.2 Strecke .....	5
2.3.3 Senke .....	5
2.4 Spannungsquelle .....	6
2.4.1 Spannungsteiler .....	7
2.5 Stromquelle .....	8
<b>3. Spezifikationen .....</b>	<b>10</b>
3.1 Einleitung .....	10
3.2 Auflösung .....	11
3.3 Genauigkeit .....	11
3.3.1 Absolute Genauigkeit .....	12
3.3.2 Relative Genauigkeit .....	13
3.4 Empfindlichkeit .....	13
3.5 Stabilität .....	13
3.6 Bandbreite .....	13
3.7 Einschwingzeit .....	17
<b>4. Meßleitung .....</b>	<b>18</b>
4.1 Wellenwiderstand .....	19
4.2 Reflexionen - abgeschlossene Leitung .....	20
4.3 Leitungsarten .....	21
4.3.1 Doppelleitung .....	21
4.3.1.1 Geschirmte Doppelleitung .....	22
4.3.2 Koaxialleitung .....	22
4.3.3 Triaxleitung .....	24
4.3.4 Spezialleitungen .....	24
4.3.4.1 Hochspannungsleitung .....	24
4.3.4.2 Flachbandleitung .....	25
4.3.4.3 Thermoausgleichsleitung .....	26
4.3.4.4 Videoleitung .....	27
4.3.4.5 Strommeßleitung .....	28
4.3.4.6 Wärmebeständige Leitungen .....	28
<b>5. Meßwertverarbeitung .....</b>	<b>29</b>
5.1 Sensoren .....	29
5.1.1 Passive Sensoren .....	29
5.1.2 Aktive Sensoren .....	30
5.2 Vorverstärker .....	31
5.3 Übertragungsstrecke .....	34
5.4 Datenempfänger .....	34

<b>6. Temperaturmessung</b>	<b>36</b>
6.1 Einleitung	36
6.2 Widerstandsthermometer	36
6.2.0.1 Bauformen	36
6.2.0.2 Meßaufbau	37
6.2.1 Thermistoren	39
6.3 Halbleitertemperaturfühler	40
6.4 Thermoelemente	40
6.4.1 Einleitung	40
6.4.2 Toleranzen	42
6.4.3 Linearität	42
6.4.4 Alterung der Thermoelemente	44
6.4.5 Meßaufbau	45
6.4.6 Vergleichsstelle	46
<b>7. Temperaturregler</b>	<b>49</b>
7.1 Einleitung	49
7.2 Steuerung	49
7.3 Regelung	50
7.4 Regler	53
7.4.1 Unstetige Regler	53
7.4.1.1 Leistungsdimensionierung	54
7.4.2 Stetige Regler	54
7.4.2.1 Regelstrecke	55
7.4.2.2 Sprungantwort einer Regelstrecke	55
7.4.2.3 P-Regler	56
7.4.2.4 PT1-Regler	57
7.4.2.5 PT2-Regler	59
7.4.2.6 I-Regler	59
7.4.2.7 D-Regler	61
7.4.2.8 DT1-Glied	62
7.4.2.9 Totzeitglied	62
<b>8. Verstärker</b>	<b>63</b>
8.1 Einleitung	63
8.2 Operationsverstärker	64
8.2.1 Einleitung	64
8.2.2 Gegenkopplung	64
8.2.3 Reale Operationsverstärker	65
8.3 Grundsaltungen des OPs	67
8.3.1 Einleitung	67
8.3.2 Invertierender Verstärker	67
8.3.3 Nicht invertierender Verstärker	68
8.4 Frequenzgang des Operationsverstärkers	69
8.4.1 Phasenverschiebung	72
8.4.2 Frequenzkompensation	73
8.4.2.1 Kapazitive Belastung des Operationsverstärkers	73
8.4.3 Stromversorgung	74
8.4.4 Power supply rejection ratio (PSRR)	75
8.4.5 Common mode rejection (CMMR)	75
8.4.6 Eingangsoffsetspannung	76

8.4.7 Eingangsoffsetspannungsdrift.....	78
8.4.8 Open loop gain ( $A_{v0}$ ).....	78
8.4.9 Eingangsruhestrom.....	79
8.4.10 Eingangswiderstand.....	79
8.5 Aufbau des Operationsverstärkers .....	80
8.6 OP-Übersicht .....	82
8.6.1 Bauform .....	83
8.7 Spezialschaltungen .....	84
8.7.1 Differenzverstärker .....	84
8.7.2 Instrumentenverstärker .....	86
8.8 Analoge Rechenschaltungen.....	89
8.8.1 Addierschaltung.....	89
8.8.1.1 Offsetschaltung.....	89
8.8.2 Subtrahierschaltung .....	91
8.8.3 Integrator.....	91
8.8.3.1 Frequenzgang des Integrators .....	94
<b>9. Digitale Meßsysteme.....</b>	<b>95</b>
9.1 Einleitung .....	95
9.2 Vergleich von analoger und digitaler Messung .....	95
9.3 Analog-Digital-Wandler .....	97
9.3.1 ADC-Quantisierung.....	97
9.3.2 Fehler der Analog-Digital-Wandler .....	98
9.3.3 Offsetfehler .....	98
9.3.4 Verstärkungsfehler.....	99
9.3.5 Nichtlinearitäten.....	100
9.3.6 Aperturzeit.....	100
9.3.7 Aperturjitter .....	102
9.3.8 Abtasttheorie .....	102
9.3.9 Wandelverfahren .....	103
9.3.10 Rampenverfahren (dual slope) .....	105
9.3.11 Wägeverfahren (sukzessive Approximation).....	107
9.3.12 flash converter .....	108
9.4 Digital-Analog-Wandler .....	110
9.4.1 Parallelverfahren.....	110
9.4.2 DAC mit gewichteten Strömen.....	111
9.4.3 Glitchpulse.....	112
9.4.4 Deglitcher.....	113
9.4.5 Abgleich und Anpassung von DACs .....	113
9.5 Sample/Hold-Verstärker .....	114
9.6 Codierung der ADC- und DAC-Bausteine .....	115
9.6.1 BCD Code.....	117
9.6.2 Offset-binary-Codierung .....	117
9.6.3 Zweierkomplement-Code .....	118
9.7 Probleme beim Meßaufbau mit ADCs und DACs .....	118
9.7.1 Entkopplung von der Rechnermasse.....	119
<b>10. Störprobleme.....</b>	<b>121</b>
10.1 Einleitung.....	121
10.2 Störungen innerhalb der Schaltung.....	121
10.3 Gehäuse .....	124

10.4	Masseführung.....	126
10.5	Sternförmiger Aufbau .....	129
10.6	Trennverstärker .....	131
<b>11.</b>	<b>Sicherheit.....</b>	<b>133</b>
11.1	Sicherheitsmaßnahmen im Labor .....	133
11.2	Fehlerstromschutzschalter (FI).....	134
11.3	Schutztrennung.....	135
<b>12.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>137</b>
12.1	Leitungsquerschnitte .....	137
12.2	Spannungspegel .....	137
12.3	Widerstandswerte und -Codierung .....	138
12.3.1	Tabelle der Farbcodierung von Widerständen .....	139
12.4	Tabelle für Thermoelement Typ K (Ni/NiCr).....	140
12.5	Adressen .....	144
12.6	Hersteller elektromechanischer Komponenten.....	145
12.7	Distributoren .....	146
12.8	Literaturverzeichnis .....	147
12.9	Weiterführende Literatur .....	148
<b>Index.....</b>		<b>149</b>