

---

# 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 Halbleiterthermaturfühler .....	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 Grundschaltungen 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. Sicherheit.....</b>	<b>133</b>
11.1 Sicherheitsmaßnahmen im Labor .....	133
11.2 Fehlerstromschutzschalter (FI) .....	134
11.3 Schutztrennung.....	135
<b>12. 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>