

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung in die Messtechnik . . . . .	1
1.1.1 Bedeutung der Messtechnik . . . . .	1
1.1.2 Grundbegriffe der Messtechnik . . . . .	3
1.1.3 Struktur einer Messeinrichtung . . . . .	6
1.2 Beispiel für eine Messeinrichtung . . . . .	8
1.3 Anwendungen von Sensoren im Kraftfahrzeug . . . . .	9
1.4 Eigenschaften von Messgeräten . . . . .	12
1.2.1 Übertragungsverhalten . . . . .	12
1.2.2 Messunsicherheit . . . . .	14
1.2.3 Betriebsverhalten . . . . .	17
1.5 Grundlagen aus der Elektrotechnik . . . . .	18
1.3.1 Spannungsquelle . . . . .	18
1.3.2 Stromquelle . . . . .	20
1.3.3 Spannungsteiler . . . . .	22
1.3.4 Tiefpass . . . . .	23
1.3.5 Hochpass . . . . .	27
1.3.6 Komplexe Impedanzen . . . . .	29
1.3.7 Bandpass. Impulsformer . . . . .	32
<b>2 Analog-Messgeräte</b>	<b>34</b>
2.1 Operationsverstärker . . . . .	34
2.1.1 Arbeitsweise von Operationsverstärkern . . . . .	34
2.1.2 Elektrische Kenngrößen von Operationsverstärkern . . . . .	39
2.1.3 Dynamisches Verhalten von Operationsverstärkern . . . . .	40
2.1.4 Hersteller-Daten von Operationsverstärkern . . . . .	43
2.2 Einfache Messschaltungen mit Operationsverstärkern . . . . .	44
2.2.1 Invertierende Schaltung zur Strom- und Spannungsmessung . . . . .	44
2.2.2 Nichtinvertierende Schaltung zur Spannungsmessung . . . . .	50
2.2.3 Spannungsausgang . . . . .	55
2.2.4 Verstärker als Integrator oder Tiefpass . . . . .	56
2.3 Verstärker für die Messsignalverarbeitung . . . . .	58
2.3.1 Addierer. Subtrahierer . . . . .	58
2.3.2 Differenzverstärker. Instrumentenverstärker . . . . .	61

---

2.3.3	Spannungsgesteuerte Stromquelle . . . . .	64
2.3.4	Einfluss von Störgrößen auf das Messignal . . . . .	66
2.3.5	Rauschen . . . . .	72
2.3.6	Trägerfrequenz-Verfahren. Lock-in-Verstärker . . . . .	75
2.3.7	Übertragung von analogen Messsignalen . . . . .	79
<b>3</b>	<b>Digital-Messgeräte</b>	<b>81</b>
3.1	Grundschaltungen für die Digitaltechnik . . . . .	81
3.1.1	Bistabile Kippglieder (Flipflops) . . . . .	81
3.1.2	Komparator. Schwellenwertschalter . . . . .	85
3.1.3	Monostabile und astabile Kippschaltung. . . . .	88
3.2	Zähler für Ereignisse, Zeit oder Frequenz . . . . .	93
3.2.1	Messglieder des Universalzählers . . . . .	93
3.2.2	Anwendungen elektronischer Zähler . . . . .	97
3.3	Analog-Digital-Umsetzer für zeitliche Mittelwerte . . . . .	101
3.3.1	AD-Umsetzer nach dem Dual-Slope-Verfahren . . . . .	102
3.3.2	Spannungs-Frequenz-Umformer. Frequenz-Spannungs-Umformer . . . . .	104
3.3.3	Dämpfen von Störwechselspannungen durch Integration . . . . .	108
3.4	Analog-Digital-Umsetzer für den Augenblickswert . . . . .	110
3.4.1	Einführung . . . . .	110
3.4.2	Abtast- und Haltekreis. Sample and Hold . . . . .	113
3.4.3	DA-Umsetzer für die Rückführung . . . . .	117
3.4.4	AD-Umsetzer mit sukzessiver Approximation . . . . .	121
3.4.5	Sigma-Delta-AD-Umsetzer . . . . .	123
3.4.6	Kenngrößen von DA- und AD-Umsetzern . . . . .	125
3.4.7	Hersteller-Daten für AD-Umsetzern . . . . .	128
3.5	Mikrocomputer in der Sensor-Messtechnik . . . . .	129
3.5.1	Aufbau und Funktionsweise von Mikrocomputern . . . . .	130
3.5.2	Anwendung von Mikrocontrollern in Messsystemen . . . . .	135
3.5.3	Übertragung von digitalen Messsignalen mittels Feldbus . . . . .	137
<b>4</b>	<b>Sensoren aus passiven elektrischen Messgliedern</b>	<b>142</b>
4.1	Anpassungsschaltungen für Widerstände . . . . .	142
4.1.1	Grundgleichungen für die Messbrücke . . . . .	142
4.1.2	Abgleich-Messbrücke . . . . .	145
4.1.3	Ausschlag-Messbrücke . . . . .	148
4.1.4	Messen durch Stromeinprägen . . . . .	149
4.2	Widerstände als Sensoren . . . . .	152
4.2.1	Elektrische Leitung . . . . .	152
4.2.2	Abhängigkeit von der Kontaktstellung. Potentiometer . . . . .	153
4.2.3	Abhängigkeit von der Temperatur . . . . .	154
4.2.4	Messen der Temperatur mit Widerständen . . . . .	157
4.2.5	Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke. Photowiderstand . . . . .	166
4.2.6	Abhängigkeit von Verformung . . . . .	168
4.2.7	Messen mit Dehnungsmessstreifen . . . . .	171
4.2.8	Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte. Magnetowiderstand . . . . .	177

4.2.9	Abhängigkeit von der Ionenkonzentration in Elektrolyten. Konduktometrie . . . . .	182
4.2.10	Halbleiter-Gassensoren. . . . .	184
4.3	Kondensatoren als Sensoren . . . . .	186
4.3.1	Anpassungsschaltungen für Kapazitäten . . . . .	187
4.3.2	Abhängigkeit von der Elektrodenfläche . . . . .	190
4.3.3	Abhängigkeit vom Dielektrikum . . . . .	192
4.3.4	Abhängigkeit vom Elektrodenabstand . . . . .	194
4.4	Drosselspulen als Sensoren . . . . .	196
4.4.1	Magnetischer Kreis . . . . .	196
4.4.2	Induktive Weg- und Positions-Sensoren . . . . .	198
4.4.3	Anpassungsschaltungen für Drosselspulen . . . . .	202
<b>5</b>	<b>Sensoren mit Spannung als Messsignal</b>	<b>209</b>
5.1	Thermoelektrische Effekte . . . . .	209
5.1.1	Seebeck-Effekt. Peltier-Effekt . . . . .	209
5.1.2	Temperaturmessung mit Thermoelementen . . . . .	212
5.1.3	Diode als Temperatursensor . . . . .	215
5.2	Elektrochemische Spannung. Potentiometrie . . . . .	219
5.2.1	pH-Messkette . . . . .	219
5.2.2	Ionenselektive Elektroden . . . . .	224
5.2.3	Redox-Elektroden . . . . .	225
5.2.4	Gassensitive Elektroden. Lambda-Sonde . . . . .	226
5.2.5	Ionensensitive Feldeffekt-Transistoren . . . . .	231
5.3	Magnetisch-induktive Sensoren . . . . .	233
5.3.1	Lorentzkraft. Induktionsgesetz . . . . .	233
5.3.2	Impulsgeber. Drehzahlmesser. Tachogenerator . . . . .	234
5.3.3	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser . . . . .	238
5.3.4	Hall-Sensor . . . . .	239
5.3.5	Differentialtransformator . . . . .	244
5.3.6	Magnetoelastischer Kraftmesser . . . . .	245
5.3.7	Anwendungen der Tauchspule . . . . .	246
<b>6</b>	<b>Sensoren mit Strom oder Ladung als Messsignal</b>	<b>248</b>
6.1	Photoelektrischer Effekt . . . . .	248
6.1.1	Grundlagen . . . . .	249
6.1.2	Photoelement . . . . .	258
6.1.3	Photodiode . . . . .	260
6.1.4	Phototransistor . . . . .	264
6.1.5	CCD und Aktiv-Pixel CMOS Bildsensoren . . . . .	265
6.1.6	Photozelle . . . . .	270
6.1.7	Photovervielfacher . . . . .	271
6.2	Ionisation durch energiereiche Strahlung . . . . .	273
6.2.1	Ionisierende Strahlung, Radioaktivität . . . . .	274
6.2.2	Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie . . . . .	279
6.2.3	Ionisationskammer. Zählrohr . . . . .	285
6.2.4	Szintillationsdetektor . . . . .	293

6.2.5	Halbleiter-Detektor für ionisierende Strahlung . . . . .	295
6.3	Konzentrationsbestimmung durch den Grenzstrom. Amperometrie . . . . .	307
6.3.1	Flammen-Ionisations-Detektor . . . . .	307
6.3.2	Amperometrie mit flüssigen Elektrolyten . . . . .	308
6.3.3	Amperometrische Sauerstoff-Sensoren mit Festkörper-Ionenleiter . . . . .	312
6.4	Piezoelektrischer und pyroelektrischer Effekt . . . . .	313
6.4.1	Piezoelektrische Sensoren . . . . .	313
6.4.2	Pyroelektrische Sensoren . . . . .	318
<b>7</b>	<b>Messumformung in nichtelektrischen Systemen</b>	<b>321</b>
7.1	Optische Messverfahren . . . . .	321
7.1.1	Grundlagen der spektralen Extinktionsmessung . . . . .	322
7.1.2	Messen der Ionenkonzentration in Wasser . . . . .	325
7.1.3	Messen von Stoffkonzentrationen in Luft . . . . .	326
7.1.4	Lichtwellenleiter als Sensoren. . . . .	338
7.2	Ultraschall-Messverfahren . . . . .	343
7.2.1	Grundlagen . . . . .	344
7.2.2	Abstandsmessung, Wegmessung . . . . .	349
7.2.3	Geschwindigkeitsmessung . . . . .	353
7.2.4	Ultraschall-Strömungsmessung . . . . .	355
7.2.5	Messung der Zusammensetzung von Gas- und Flüssigkeitsgemischen . . . . .	360
7.2.6	Messtechnische Anwendungen von akustischen Oberflächenwellen-Übertragungsstrecken . . . . .	364
7.3	Thermische Messverfahren . . . . .	367
7.3.1	Wärmeleitung in Gasen . . . . .	367
7.3.2	Wärmetönung bei katalytischer Verbrennung . . . . .	369
7.4	Resonatoren als Messaufnehmer . . . . .	371
7.4.1	Harmonisch schwingende Systeme . . . . .	372
7.4.2	Abhängigkeit von der Masse . . . . .	378
7.4.3	Abhängigkeit von der Federkonstanten . . . . .	382
7.4.4	Abhängigkeit von der Dämpfung . . . . .	383
7.4.5	Abhängigkeit von einer äußeren Kraft . . . . .	384
7.4.6	Resonatoren zur Messung von kinematischen Größen . . . . .	386
7.4.7	Coriolis-Sensoren zur Massendurchfluss-Messung . . . . .	392
7.4.8	Coriolis-Sensor als Gyrometer im Kraftfahrzeug . . . . .	394
<b>8</b>	<b>Messen mechanischer und thermischer Größen</b>	<b>398</b>
8.1	Länge. Dicke. Winkel . . . . .	399
8.1.1	Messung von Abstand, Weg und Winkel . . . . .	399
8.1.2	Dickenmessung . . . . .	400
8.1.3	Schichtdickenmessung . . . . .	403
8.1.4	Abstands- und Dimensionsmessung im Nanometer-Bereich . . . . .	406
8.2	Dehnung. Kraft. Druck. Drehmoment . . . . .	408
8.2.1	Dehnungsmessung . . . . .	408
8.2.2	Messung von Kraft, Masse und Drehmoment . . . . .	409
8.2.3	Druckmessung im Bereich über 1 mbar . . . . .	411

8.2.4	Druckmessung im Vakuumbereich . . . . .	413
8.3	Kinematische Größen . . . . .	417
8.3.1	Messen von Schwingbewegungen und Beschleunigung . . . . .	417
8.3.2	Messen von Drehzahl und Geschwindigkeit . . . . .	418
8.4	Durchfluss. Viskosität. Füllstand . . . . .	419
8.4.1	Messen von Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	419
8.4.2	Viskositätsmessung . . . . .	429
8.4.3	Füllstandsmessung . . . . .	434
8.5	Temperatur, Luftfeuchte . . . . .	437
8.5.1	Grundlagen der Temperaturmessung . . . . .	437
8.5.2	Berührungsthermometer . . . . .	438
8.5.3	Strahlungsgesetze . . . . .	438
8.5.4	Strahlungsthermometer . . . . .	443
8.5.5	Besondere Temperaturmessverfahren . . . . .	453
8.5.6	Luftfeuchte-Messung . . . . .	455
<b>9</b>	<b>Messen von Stoffkonzentrationen</b>	<b>461</b>
9.1	Stoffkonzentrationen in Luft . . . . .	461
9.1.1	Regelungen zur Begrenzung luftfremder Stoffe . . . . .	461
9.1.2	Messverfahren für Fremdgase aus dem VDI-Handbuch „Reinhaltung der Luft“	461
9.1.3	Weitere Verfahren für die Gasanalyse . . . . .	464
9.1.4	Staubmessung . . . . .	468
9.2	Stoffkonzentrationen in Wasser . . . . .	472
9.2.1	Regelungen zur Begrenzung von Wasserinhaltsstoffen . . . . .	472
9.2.2	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	473
9.2.3	Verfahren zur Prozessanalyse von wässrigen Lösungen . . . . .	475
9.3	Stoffkonzentrationen in biologischen Flüssigkeiten . . . . .	475
9.3.1	Funktionsweise und Aufbau von Biosensoren . . . . .	475
9.3.2	Ausführungsformen und Anwendungen von Biosensoren.	477
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>481</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>		<b>491</b>