

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1 Umfang und Bedeutung der elektrischen Meßtechnik	1
1.2 Maßeinheiten	3
1.2.1 Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten	4
1.2.2 Einheiten und Naturkonstanten	7
1.2.3 Darstellung der Grundeinheiten	8
1.2.4 Größen- und Zahlenwertgleichungen	11
1.2.5 Umrechnung nichtkohärenter Einheiten	12
1.3 Statisches Verhalten der Meßgeräte	12
1.4 Statische Meßfehler und Meßunsicherheiten	14
1.4.1 Voraussetzungen für eine fehlerfreie Messung	14
1.4.2 Systematische Meßfehler	15
1.4.3 Zufällige Meßfehler	17
1.4.4 Meßunsicherheit bei bekannten Garantiefehlergrenzen	26
1.5 Dynamisches Verhalten der Meßgeräte	28
1.5.1 Verzögerungsglied 1. Ordnung	29
1.5.2 Verzögerungsglied 2. Ordnung	37
1.5.3 Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	45
1.6 Dynamische Meßfehler	48
1.6.1 Fehlermöglichkeiten	48
1.6.2 Korrektur des dynamischen Fehlers	51
1.7 Strukturen von Meßeinrichtungen	53
1.7.1 Kettenstruktur	53
1.7.2 Parallelstruktur	54
1.7.3 Kreisstruktur	57
1.8 Die informationstragenden Parameter der Meßsignale	58
1.9 Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	61
1.9.1 Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	61
1.9.2 Technologien zur Sensorfertigung	61
1.9.3 Sensornähe Signalverarbeitung	67
<b>2 Messung von Strom und Spannung; spannung- und stromliefernde Aufnehmer</b>	<b>69</b>
2.1 Elektromechanische Meßgeräte und ihre Anwendung	69
2.1.1 Meßwerke	69
2.1.2 Messung von Gleichstrom und Gleichspannung	76
2.1.3 Messung von Wechselstrom und Wechselspannung	84
2.1.4 Messung der Leistung	92
2.1.5 Messung der elektrischen Arbeit	99
2.2 Kompensatoren	100
2.2.1 Gleichspannungskompensation	101
2.2.2 Gleichstromkompensation	102
2.2.3 Servomultiplizierer und -dividierer	103
2.3 Meßwerk- und Kompensationsschreiber	104
2.3.1 Konstruktionsmerkmale	104

2.3.2	Ausführungsformen . . . . .	105
2.3.3	Anwendungsbereiche der verschiedenen Systeme . . . . .	108
2.4	Elektronenstrahl-Oszilloskop . . . . .	109
2.4.1	Elektronenstrahl-Röhre . . . . .	109
2.4.2	Baugruppen . . . . .	111
2.4.3	Spezial-Oszilloskope . . . . .	118
2.4.4	Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops . . . . .	119
2.5	Meßverstärker . . . . .	121
2.5.1	Einführung . . . . .	121
2.5.2	Nichtinvertierender Spannungsverstärker . . . . .	128
2.5.3	Invertierender Stromverstärker . . . . .	135
2.5.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers . . . . .	140
2.5.5	Anwendungen des Stromverstärkers . . . . .	142
2.5.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers . . . . .	148
2.5.7	Modulationsverstärker . . . . .	155
2.6	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer . . . . .	161
2.6.1	Weg- und Winkelmessung . . . . .	162
2.6.2	Analoge Drehzahlmessung . . . . .	164
2.6.3	Hall-Sonde . . . . .	165
2.6.4	Induktions-Durchflußmesser . . . . .	169
2.7	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer . . . . .	171
2.7.1	Thermoelement . . . . .	171
2.7.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor . . . . .	179
2.8	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren . . . . .	180
2.8.1	Galvanisches Element . . . . .	180
2.8.2	pH-Meßkette mit Glaselektrode . . . . .	181
2.8.3	Ionensensitiver Feldeffekt-Transistor . . . . .	184
2.8.4	Gassensitiver Feldeffekt-Transistor . . . . .	186
2.8.5	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter . . . . .	186
2.9	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer . . . . .	190
2.9.1	Wirkungsweise und Werkstoffe . . . . .	190
2.9.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer . . . . .	192
2.9.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor . . . . .	198
2.10	Optische Aufnehmer und Sensoren . . . . .	201
2.10.1	Photoelement und Photodiode . . . . .	202
2.10.2	Photosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung . . . . .	205
2.10.3	Photozelle . . . . .	207
2.10.4	Photovervielfacher . . . . .	208
2.11	Aufnehmer für ionisierende Strahlung . . . . .	208
2.11.1	Ionisationskammer . . . . .	208
2.11.2	Auslösezählrohr . . . . .	212
2.11.3	Szintillationszähler . . . . .	215
2.11.4	Halbleiter-Strahlungsdetektor . . . . .	216
<b>3</b>	<b>Messung von ohmschen Widerständen; Widerstandsaufnehmer . . . . .</b>	<b>219</b>
3.1	Strom- und Spannungsmessung . . . . .	219
3.1.1	Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom . . . . .	219
3.1.2	Vergleich mit einem Referenzwiderstand . . . . .	220
3.2	Verwendung einer Konstantstromquelle . . . . .	221

3.3	Brückenschaltungen . . . . .	226
3.3.1	Abgleich-Widerstandsmeßbrücke . . . . .	226
3.3.2	Ausschlag-Widerstandsmeßbrücke . . . . .	229
3.4	Verstärker für Brückenschaltungen . . . . .	237
3.4.1	Subtrahierer mit invertierendem Verstärker . . . . .	237
3.4.2	Subtrahierer mit Elektrometerverstärker . . . . .	238
3.4.3	Trägerfrequenz-Brücke und -Meßverstärker . . . . .	240
3.5	Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung . . . . .	243
3.6	Widerstands-Temperaturfühler . . . . .	244
3.6.1	Metall-Widerstandsthermometer . . . . .	244
3.6.2	Heißleiter . . . . .	249
3.6.3	Kaltleiter . . . . .	252
3.6.4	Silizium-Widerstandstemperatursensor . . . . .	254
3.6.5	Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berüh- rungsthermometern . . . . .	256
3.7	Indirekte Anwendung der Widerstandsthermometer für Konzentrationsmes- sungen . . . . .	257
3.7.1	LiCl-Feuchtegeber . . . . .	258
3.7.2	Gasanalyse nach dem Wärmeleitverfahren . . . . .	260
3.7.3	Gasanalyse nach dem Wärmetönungsverfahren . . . . .	261
3.7.4	Thermomagnetische Sauerstoffanalyse . . . . .	262
3.7.5	Gasaufbereitung . . . . .	263
3.8	Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden . . . . .	263
3.9	Lichtempfindlicher Widerstand . . . . .	265
3.10	Magnetisch steuerbarer Widerstand . . . . .	266
3.11	Dehnungsmeßstreifen . . . . .	268
3.11.1	Prinzip . . . . .	268
3.11.2	Metall-Dehnungsmeßstreifen . . . . .	269
3.11.3	Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen . . . . .	271
3.11.4	Störgrößen . . . . .	271
3.11.5	Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse . . . . .	272
3.12	Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien . . . . .	276
3.12.1	Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand . . . . .	277
3.12.2	Messung des Spannungsabfalls an Differential- Widerstandsaufnehmern . . . . .	280
3.12.3	Differential-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke . . . . .	281
4	<b>Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer</b> . . . . .	282
4.1	Strom- und Spannungsmessung . . . . .	283
4.1.1	Messung der Effektivwerte . . . . .	283
4.1.2	Vergleich mit Referenzelement . . . . .	284
4.1.3	Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstands . . . . .	285
4.1.4	Messung eines Phasenwinkels . . . . .	286
4.1.5	Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis . . . . .	288
4.2	Wechselstrom-Abgleichbrücke . . . . .	289
4.2.1	Prinzip . . . . .	289
4.2.2	Kapazitätsmeßbrücke nach Wien . . . . .	290
4.2.3	Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell . . . . .	292
4.2.4	Induktivitätsmeßbrücke nach Maxwell-Wien . . . . .	292
4.2.5	Phasenschieberbrücke . . . . .	293

4.3	Wechselstrom-Ausschlagbrücke . . . . .	293
4.4	Induktive Aufnehmer . . . . .	295
4.4.1	Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung . . . . .	295
4.4.2	Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung . . . . .	298
4.4.3	Kurzschlußring-Sensor . . . . .	300
4.4.4	Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber . . . . .	300
4.4.5	Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen . . . . .	302
4.4.6	Magnetoelastische Kraftmeßdose . . . . .	302
4.5	Kapazitive Aufnehmer . . . . .	303
4.5.1	Änderung des Plattenabstands . . . . .	303
4.5.2	Änderung der Plattenfläche . . . . .	304
4.5.3	Geometrische Änderung des Dielektrikums . . . . .	306
4.5.4	Änderung der Dielektrizitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur . . . . .	308
4.6	Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer . . . . .	309
4.6.1	Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes . . . . .	310
4.6.2	Größe der Brückenschaltung entnehmbare Leistung . . . . .	311
4.6.3	Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer . . . . .	312
<b>5</b>	<b>Digitale Meßtechnik; kodierte und inkrementale Meßwertgeber . . . . .</b>	<b>314</b>
5.1	Binäre Signale und ihre logischen Verknüpfungen . . . . .	314
5.1.1	Binäre Signale . . . . .	314
5.1.2	Logische Verknüpfungen binärer Signale . . . . .	315
5.1.3	Gatter . . . . .	318
5.2	Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Meßwerte . . . . .	320
5.2.1	Duales Zahlensystem . . . . .	320
5.2.2	Binärcodes für Dezimalzahlen . . . . .	321
5.2.3	Code-Umsetzer . . . . .	323
5.2.4	Ziffernanzeigen . . . . .	324
5.2.5	Vergleich der Ziffern- mit der Skalenanzeige . . . . .	325
5.2.6	Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer . . . . .	326
5.3	Bistabile Kippstufen . . . . .	327
5.3.1	Asynchrones RS-Speicherglied . . . . .	327
5.3.2	Taktgesteuertes RS-Speicherglied . . . . .	329
5.3.3	Taktflankengesteuertes D-Speicherglied . . . . .	330
5.3.4	Taktflankengesteuertes JK-Speicherglied . . . . .	330
5.3.5	Taktflankengesteuertes T-Speicherglied . . . . .	331
5.4	Zähler . . . . .	332
5.4.1	Asynchroner Vorwärts-Dualzähler . . . . .	332
5.4.2	Asynchroner Rückwärts-Dualzähler . . . . .	333
5.4.3	Umschaltung der Zählrichtung . . . . .	334
5.4.4	Synchroner Vorwärts-Dualzähler . . . . .	335
5.4.5	Synchroner Vorwärts-BCD-Zähler . . . . .	336
5.4.6	Synchroner Ringzähler . . . . .	337
5.4.7	Skalenanzeige einer Zählgröße . . . . .	338
5.5	Register . . . . .	339
5.5.1	Parallelregister . . . . .	339
5.5.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung . . . . .	340
5.5.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung . . . . .	341

5.6	Umschalter . . . . .	343
5.6.1	Multiplexer für binäre Signale . . . . .	343
5.6.2	Umschalter mit Relaiskontakten für analoge Signale . . . . .	343
5.6.3	Umschalter mit Feldeffekttransistoren für analoge Signale . . . . .	344
5.6.4	Abtast- und Haltekreis . . . . .	345
5.7	Direktvergleichende A/D-Umsetzer für elektrische Spannungen . . . . .	346
5.7.1	Komparator . . . . .	346
5.7.2	Komparator mit Hysterese . . . . .	347
5.7.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren . . . . .	349
5.7.4	Inkrementaler A/D-Stufenumsetzer . . . . .	350
5.7.5	Inkrementaler A/D-Nachlaufumsetzer . . . . .	351
5.7.6	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Meßwert . . . . .	352
5.8	A/D-Umsetzer für mechanische Größen; kodierte und inkrementale Längen- und Winkelgeber . . . . .	354
5.8.1	Endlagenschalter . . . . .	355
5.8.2	Kodierte Längen- und Winkelgeber . . . . .	356
5.8.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber . . . . .	358
5.8.4	Vergleich der kodierten und inkrementalen Längengeber . . . . .	361
<b>6</b>	<b>Zeit- und Frequenzmessung; frequenzanaloge Meßwertgeber und Wandler . . . . .</b>	<b>362</b>
6.1	Digitale Zeitmessung . . . . .	362
6.1.1	Messung eines Zeitintervalls . . . . .	362
6.1.2	Messung einer Periodendauer . . . . .	363
6.1.3	Messung eines Phasenwinkels . . . . .	364
6.1.4	Normalfrequenz- und Zeitzeichensender . . . . .	365
6.2	Digitale Frequenzmessung . . . . .	366
6.2.1	Messung einer Frequenz oder Impulsrate . . . . .	366
6.2.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen . . . . .	367
6.2.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen . . . . .	367
6.2.4	Universalzähler . . . . .	367
6.3	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz . . . . .	369
6.3.1	Messung eines Zeitintervalls; t/u-Umformung . . . . .	369
6.3.2	Messung einer Frequenz oder Impulsrate; f/u-Umformung . . . . .	370
6.3.3	Impulsbreiten-Multiplizierer . . . . .	372
6.4	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer . . . . .	373
6.4.1	u/t-Impulsbreiten-Umsetzer . . . . .	373
6.4.2	u/t-Zweirampen-Umsetzer . . . . .	376
6.4.3	u/f-Sägezahn-Umsetzer . . . . .	379
6.4.4	u/f-Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren . . . . .	380
6.4.5	Synchroner u/f-Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren . . . . .	382
6.4.6	Delta-Sigma-Umsetzer . . . . .	384
6.5	Kenngößen für Analog/Digital-Umsetzer . . . . .	387
6.6	Messungen mit dem Analog/Digital-Umsetzer . . . . .	393
6.6.1	Zeitdiskrete Messung; Abtasttheorem . . . . .	393
6.6.2	Signalrauschen . . . . .	394
6.6.3	Digital-Multimeter . . . . .	395
6.6.4	Oszilloskop . . . . .	396
6.6.5	Meßwertverarbeitung mit dem Personal-Computer . . . . .	399

6.7	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer . . . . .	401
6.7.1	Astabile Kippschaltung aus RC-Glied und Komparator . . . . .	401
6.7.2	Astabile Kippschaltung mit Integrationsverstärker und Komparator . . . . .	403
6.7.3	Kippschaltung mit Widerstandsmeßbrücke . . . . .	406
6.7.4	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen . . . . .	407
6.7.5	u/f-Umsetzer für kleine Signale . . . . .	409
6.8	Harmonische Oszillatoren als Frequenzumsetzer . . . . .	410
6.8.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen . . . . .	411
6.8.2	LC-Oszillator . . . . .	412
6.8.3	RC-Oszillator . . . . .	415
6.9	Frequenz- oder impulsratenliefernde Aufnehmer . . . . .	418
6.9.1	Schwingquarz als Frequenznormal . . . . .	418
6.9.2	Schwingquarz als Temperaturfühler . . . . .	426
6.9.3	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer . . . . .	427
6.9.4	Stimmgabel-Frequenzumsetzer . . . . .	428
6.9.5	Drehzahlaufnehmer . . . . .	430
7	<b>Messung mechanischer Größen . . . . .</b>	<b>433</b>
7.1	Druck- und Differenzdruckmessung mit Federmeßwerken . . . . .	433
7.1.1	Direktanzeigende Manometer . . . . .	434
7.1.2	Federmeßwerke mit elektrischem Abgriff . . . . .	434
7.1.3	Differenzdruck-Meßumformer mit innenliegendem elektrischen Abgriff. . . . .	439
7.1.4	Anwendung der Druck- und Differenzdruckmeßgeräte zur Füll- standsmessung . . . . .	441
7.2	Durchflußmessung . . . . .	442
7.2.1	Durchflußmessung mit Drosselmeßgeräten . . . . .	443
7.2.2	Wirbelfrequenz-Durchflußmesser . . . . .	448
7.2.3	Thermischer Massenstrommesser . . . . .	449
7.2.4	Coriolis-Massenstrommesser . . . . .	453
7.2.5	Ultraschall-Durchflußmessung . . . . .	455
7.3	Schwingungsmessung . . . . .	460
7.3.1	Relative Schwingungsmessung . . . . .	461
7.3.2	Absolute Schwingungsmessung . . . . .	464
	Literaturverzeichnis . . . . .	472
	Sachwortverzeichnis . . . . .	479