

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>15</b>
1.1	Umfang und Bedeutung der elektrischen Messtechnik	15
1.2	Naturkonstanten und Maßeinheiten	17
1.2.1	Naturkonstanten	17
1.2.2	Internationales Einheitensystem, SI-Einheiten	18
1.2.3	Definition und Darstellung der Sekunde	20
1.2.4	Definition und Darstellung des Meters	22
1.2.5	Definition und Darstellung des Kilogramms	22
1.2.6	Definition und Darstellung der elektrischen Einheiten	24
1.2.7	Die SI-Einheiten der Temperatur, der Stoffmenge und der Lichtstärke	28
1.2.8	Größen- und Zahlenwertgleichungen	28
1.3	Statisches Verhalten der Messgeräte; Kennlinie und Empfindlichkeit	29
1.4	Messfehler und Messunsicherheiten	31
1.4.1	Bekannte Einflüsse; Korrektur des bekannten Messfehlers	32
1.4.2	Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; eine einzige Messgröße $X$	33
1.4.3	Unbekannte, normalverteilte Unsicherheiten; verknüpfte Messgrößen $Y = f(X_i)$	38
1.4.4	Student'sche $t$ -Verteilung	41
1.4.5	Unbekannte, systematische Unsicherheiten	42
1.4.6	Korrelierte Messgrößen	43
1.4.7	Zusammenfassung	46
1.5	Dynamisches Verhalten der Messgeräte	48
1.5.1	Verzögerungsglied 1. Ordnung	48
1.5.2	Verzögerungsglied 2. Ordnung	56
1.5.3	Weitere Beispiele für das Zeitverhalten	63
1.6	Dynamische Messfehler	65
1.6.1	Fehlermöglichkeiten	65
1.6.2	Korrektur des dynamischen Fehlers	67
1.7	Strukturen von Messeinrichtungen	69
1.7.1	Kettenstruktur	69
1.7.2	Parallelstruktur	70
1.7.3	Kreisstruktur	72
1.8	Die informationstragenden Parameter der Messsignale	73
1.9	Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen	76
1.9.1	Physikalische Effekte zum elektrischen Messen nichtelektrischer Größen	76
1.9.2	Sensornahe Signalverarbeitung	77

	<b>spannungs- und stromliefernde Aufnehmer</b> .....	<b>79</b>
2.1	Elektromechanische Messgeräte und ihre Anwendung .....	79
2.1.1	Messwerke .....	79
2.1.2	Messung von Gleichstrom und Gleichspannung .....	82
2.1.3	Messung von Wechselstrom und Wechselfpannung .....	88
2.1.4	Messung der Leistung .....	92
2.1.5	Messung der elektrischen Arbeit .....	98
2.2	Elektronenstrahl-Oszilloskop .....	99
2.2.1	Elektronenstrahl-Röhre .....	99
2.2.2	Baugruppen .....	101
2.2.3	Betriebsarten des Elektronenstrahl-Oszilloskops .....	106
2.3	Messverstärker .....	107
2.3.1	Einführung .....	107
2.3.2	Nicht invertierender Spannungsverstärker .....	112
2.3.3	Invertierender Stromverstärker .....	119
2.3.4	Anwendungen des Spannungsverstärkers .....	123
2.3.5	Anwendungen des Stromverstärkers .....	125
2.3.6	Nullpunktfehler des realen Operationsverstärkers .....	131
2.4	Elektrodynamische spannungsliefernde Aufnehmer .....	136
2.4.1	Weg- und Winkelmessung .....	136
2.4.2	Drehzahlaufnehmer .....	137
2.4.3	Hall-Sonde .....	139
2.4.4	Induktions-Durchflussmesser .....	142
2.5	Thermische spannungsliefernde Aufnehmer .....	144
2.5.1	Thermoelement .....	144
2.5.2	Integrierter Sperrschicht-Temperatur-Sensor .....	151
2.6	Chemische spannungsliefernde Aufnehmer und Sensoren .....	152
2.6.1	Galvanisches Element .....	152
2.6.2	pH-Messkette mit Glaselektrode .....	153
2.6.3	Sauerstoffmessung mit Festkörper-Ionenleiter .....	155
2.7	Piezo- und pyroelektrische ladungsliefernde Aufnehmer .....	158
2.7.1	Wirkungsweise und Werkstoffe .....	158
2.7.2	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer .....	160
2.7.3	Pyroelektrischer Infrarot-Sensor .....	164
2.8	Optische Aufnehmer und Sensoren .....	166
2.8.1	Fotoelement und Fotodiode .....	168
2.8.2	Fotosensoren für Positionsmessungen und zur Bilderzeugung ...	170
2.8.3	Fotozelle .....	172
2.8.4	Fotovervielfacher und Mikrokanalplatte .....	172
2.9	Aufnehmer für ionisierende Strahlung .....	173
2.9.1	Ionisationskammer .....	173
2.9.2	Halbleiter-Strahlungsdetektor .....	176

<b>Widerstandsaufnehmer</b> .....	<b>178</b>
3.1 Strom- und Spannungsmessung .....	178
3.1.1 Gleichzeitige Messung von Spannung und Strom .....	178
3.1.2 Vergleich mit einem Referenzwiderstand .....	179
3.2 Anwendung einer Konstantstromquelle .....	180
3.3 Brückenschaltungen .....	182
3.3.1 Abgleich-Widerstandsmessbrücke .....	182
3.3.2 Ausschlag-Widerstandsmessbrücke .....	184
3.4 Verstärker für Brückenschaltungen .....	189
3.4.1 Subtrahierer mit invertierendem Verstärker .....	189
3.4.2 Subtrahierer mit Elektrometer-Verstärkern .....	190
3.4.3 Trägerfrequenz-Brücke und -Messverstärker .....	193
3.5 Widerstandsaufnehmer zur Längen- und Winkelmessung .....	196
3.6 Widerstandstemperaturfühler .....	197
3.6.1 Metall-Widerstandsthermometer .....	197
3.6.2 Heißeleiter .....	201
3.6.3 Kaltleiter .....	203
3.6.4 Silizium-Widerstandstemperatursensor .....	205
3.6.5 Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berüh- rungsthermometern .....	206
3.7 Ermittlung verfahrenstechnischer Größen durch Temperaturmessungen .....	207
3.7.1 Füllstandswächter .....	207
3.7.2 Thermischer Massenstrommesser .....	208
3.7.3 Messung der Luftfeuchte; Messung von Gaskonzentrationen .....	211
3.8 Gassensoren mit halbleitenden Metalloxiden .....	212
3.9 Lichtempfindlicher Widerstand .....	213
3.10 Magnetisch steuerbarer Widerstand .....	214
3.10.1 Feldplatte .....	214
3.10.2 Anisotroper Magnetoresistiver Effekt (AMR) .....	215
3.10.3 Spinventil, Riesenmagnetowiderstand und Kolossaler Magneto- widerstand .....	216
3.11 Dehnungsmessstreifen .....	216
3.11.1 Prinzip .....	216
3.11.2 Metall-Dehnungsmessstreifen .....	217
3.11.3 Störgrößen .....	219
3.11.4 Anwendung der DMS zur Spannungsanalyse .....	220
3.11.5 Halbleiter-Dehnungsmessstreifen .....	223
3.12 Linearisieren der Widerstandsaufnehmer-Kennlinien .....	224
3.12.1 Linearisieren durch einen Vor- und/oder Parallelwiderstand .....	224
3.12.2 Messung der Spannungsdifferenz bei Differenzial-Widerstands- aufnehmern .....	227
3.12.3 Differenzial-Widerstandsaufnehmer in einer Halbbrücke .....	228

<b>induktive und kapazitive Aufnehmer</b> .....	<b>229</b>
4.1 Strom- und Spannungsmessung .....	230
4.1.1 Messung der Effektivwerte .....	230
4.1.2 Vergleich mit Referenzelement .....	231
4.1.3 Getrennte Ermittlung des Blind- und Wirkwiderstandes .....	232
4.1.4 Messung eines Phasenwinkels .....	233
4.1.5 Strommessung in einem fremderregten Schwingkreis .....	235
4.2 Wechselstrom-Abgleichbrücke .....	236
4.2.1 Prinzip .....	236
4.2.2 Kapazität-Messbrücke nach Wien .....	237
4.2.3 Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell .....	238
4.2.4 Induktivitäts-Messbrücke nach Maxwell-Wien .....	238
4.2.5 Phasenschieber-Brücke .....	239
4.3 Wechselspannungs-Ausschlagbrücke .....	239
4.4 Induktive Aufnehmer .....	240
4.4.1 Tauchanker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung .....	241
4.4.2 Queranker-Aufnehmer zur Längen- und Winkelmessung .....	243
4.4.3 Kurzschlussring-Sensor .....	245
4.4.4 Anwendung der induktiven Längen- und Winkelgeber .....	245
4.4.5 Induktiver Schleifendetektor zur Erfassung von Fahrzeugen .....	246
4.4.6 Magnetoelastische Kraftmessdose .....	247
4.5 Kapazitive Aufnehmer .....	248
4.5.1 Änderung des Plattenabstands .....	248
4.5.2 Änderung der Plattenfläche .....	249
4.5.3 Geometrische Änderung des Dielektrikums .....	250
4.5.4 Änderung der Permittivitätszahl durch Feuchtigkeit oder Temperatur .....	252
4.6 Einsatz der induktiven und kapazitiven Abgriffe in Differenzdruck-Messumformern .....	252
4.7 Vergleich der induktiven und der kapazitiven Längenaufnehmer .....	254
4.7.1 Energie des magnetischen und des elektrischen Feldes .....	255
4.7.2 Größte der Brückenschaltung entnehmbare Leistung .....	256
4.7.3 Steuerleistung zum Verstellen der Aufnehmer .....	257

5.1 Darstellung, Anzeige und Ausgabe numerischer Messwerte .....	259
5.1.1 Duales Zahlensystem .....	259
5.1.2 Binärcodes für Dezimalzahlen .....	260
5.1.3 Ziffernanzeige; Vergleich mit Skalenanzeige .....	262
5.1.4 Umsetzung eines digitalen Signals in eine Spannung; Digital/Analog-Umsetzer; digital steuerbare Spannungsquelle .....	262
5.2 Bistabile Kippstufen .....	264
5.2.1 Asynchrones <i>RS</i> -Speicherglied .....	264
5.2.2 Taktgesteuertes <i>RS</i> -Speicherglied .....	265
5.2.3 Taktflankengesteuertes <i>D</i> -Speicherglied .....	266

5.2.4	Taktflankengesteuertes JK-Speicherglied	267
5.2.5	Taktflankengesteuertes T-Speicherglied	267
5.3	Zähler	268
5.3.1	Synchroner Vorwärts-Dualzähler	268
5.4	Register	269
5.4.1	Parallelregister	269
5.4.2	Schieberegister zur Parallel/Serien-Umsetzung	270
5.4.3	Schieberegister zur Serien/Parallel-Umsetzung	271
5.4.4	Multiplexer als Parallel/Serien-Umsetzer	272
5.5	Digitale Zeitmessung	273
5.5.1	Einführung	273
5.5.2	Digitale Messung eines Zeitintervalls	274
5.5.3	Messung einer Periodendauer	274
5.5.4	Messung eines Phasenwinkels	275
5.6	Digitale Frequenzmessung	276
5.6.1	Digitale Messung einer Frequenz oder einer Impulsrate	276
5.6.2	Messung des Verhältnisses zweier Frequenzen oder Drehzahlen	277
5.6.3	Messung der Differenz zweier Frequenzen oder Drehzahlen	277
5.6.4	Universalzähler	277
5.7	Analoge Messung eines Zeitintervalls oder einer Frequenz	279
5.7.1	Analoge Messung eines Zeitintervalls; $t/u$ -Umformung	279
5.7.2	Analoge Messung einer Frequenz oder Impulsrate; $f/u$ -Umformung	279

## 6

### Analog/Digital-Umsetzer für elektrische

	<b>und mechanische Größen</b>	<b>282</b>
6.1	Abtast- und Halteglied	282
6.2	Direkt vergleichende A/D-Umsetzer	284
6.2.1	Komparator	284
6.2.2	Komparator mit Hysterese	285
6.2.3	A/D-Umsetzer mit parallelen Komparatoren	286
6.2.4	Kaskaden-Parallel-Umsetzer	287
6.2.5	A/D-Umsetzer mit sukzessiver Annäherung an den Messwert	288
6.3	Spannung/Zeit- und Spannung/Frequenz-Umsetzer	290
6.3.1	$u/t$ -Zweirampen-Umsetzer	290
6.3.2	$u/f$ -Umsetzer nach dem Ladungsbilanzverfahren	292
6.3.3	Delta-Sigma-Umsetzer	294
6.4	Kenngrößen der Analog/Digital-Umsetzer	297
6.4.1	Kennlinie	297
6.4.2	Abtasttheorem	298
6.4.3	Umsetzrate und Auflösung	299
6.4.4	Quantisierungsrauschen, Zahl der effektiven Bit	300
6.5	Analog/Digital-Umsetzer in Messgeräten	302
6.5.1	Digital-Multimeter	302
6.5.2	Digitales Speicher-Oszilloskop	303
6.6	A/D-Umsetzer für mechanische Größen	306
6.6.1	Endlagenschalter	306
6.6.2	Codierte Längen- und Winkelgeber	307

6.6.3	Inkrementale Längen- und Winkelgeber .....	308
6.6.4	Vergleich der codierten und inkrementalen Längengeber .....	312

## 7

<b>7</b>	<b>Schwingungsmessungen .....</b>	<b>313</b>
7.1	Astabile Kippschaltungen als Frequenzumsetzer .....	313
7.1.1	Kippschaltung mit Verstärker und Komparator .....	313
7.1.2	Kippschaltung mit stabilisierten Hilfsspannungen .....	316
7.2	Harmonische Oszillatoren .....	318
7.2.1	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen .....	318
7.2.2	LC-Oszillator .....	319
7.2.3	RC-Oszillator .....	322
7.3	Piezoelektrische Resonatoren .....	324
7.3.1	Volumenschwingende Quarze .....	324
7.3.2	Oberflächenwellen OFW in Quarzen .....	331
7.3.3	Funkabfragbare Sensoren .....	334
7.3.4	Ultraschall-Durchflussmesser .....	336
7.4	Mechanische Schwingungen .....	339
7.4.1	Charakteristische Größen .....	339
7.4.2	Relative Schwingungsmessung .....	340
7.4.3	Absolute Schwingungsmessung .....	343
7.4.4	Monolithisch integrierter Beschleunigungssensor .....	345
7.4.5	Schwingsaiten-Frequenzumsetzer .....	346
7.4.6	Stimmgabel-Frequenzumsetzer .....	347
7.4.7	Coriolis-Massendurchflussmesser .....	349

## 8

<b>8</b>	<b>Spektralanalyse .....</b>	<b>351</b>
8.1	Aufgabenstellung .....	351
8.2	FTC eines zeitkontinuierlichen Signals .....	351
8.3	FTD eines zeitdiskreten Signals .....	352
8.3.1	Übergang vom zeitkontinuierlichen zum zeitdiskreten Signal .....	352
8.3.2	Unterschiede bei der Transformation eines zeitkontinuierlichen und eines zeitdiskreten Signals .....	353
8.3.3	Abtasttheorem .....	354
8.4	DFT eines abgetasteten, zeitbegrenzten Signals .....	355
8.4.1	Datensatz mit endlich vielen Werten; diskrete Spektralfunktion ..	355
8.4.2	Zusammenhang zwischen FTD und DFT; Anhängen von Nullen ..	359
8.4.3	Wahl der Abtastfrequenz .....	362
8.4.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT .....	363
8.5	DFT eines abgetasteten, nicht zeitbegrenzten Signals .....	365
8.5.1	Konstantes Signal .....	365
8.5.2	Periodisches Signal .....	368
8.5.3	Anhängen von Nullen, Abtastfrequenz und Messzeit .....	373
8.5.4	Inverse Diskrete Fouriertransformation IDFT .....	373
8.6	Fensterfunktionen .....	375
8.6.1	Kriterien zur Beurteilung .....	375
8.6.2	Fensterfunktionen und ihre Spektren .....	376
8.6.3	Fensterung bei transienten Signalen .....	383

8.7	Anwendungen der DFT .....	384
8.8	Leistungsmessung im Zeit- und Frequenzbereich .....	385

**9**

**Rechnerunterstützte Messsysteme ..... 390**

9.1	Einführung .....	390
9.2	Aufbau eines Personal Computers .....	390
9.2.1	Gerätetechnik .....	390
9.2.2	Software .....	391
9.3	Schnittstellen und Bussysteme .....	391
9.3.1	Einführung .....	391
9.3.2	Serielle RS-232-Schnittstelle und abgeleitete Schnittstellen .....	394
9.3.3	Universal Serial Bus USB .....	397
9.3.4	Paralleler IEC-Bus (GPIB-Bus, IEEE-488-Bus) .....	397
9.3.5	Kabellose Netzwerke; Bluetooth, WLAN und IrDA .....	401
9.4	Messgeräte mit integrierter digitaler Schnittstelle .....	402
9.4.1	Anschluss .....	402
9.4.2	Steuerung .....	403
9.5	Messgeräte ohne integrierte Schnittstelle .....	404
9.5.1	Prinzip .....	404
9.5.2	Aufbau einer Messkarte .....	404
9.6	Messprogramme .....	408
9.6.1	Aufgaben der Messprogramme .....	408
9.6.2	Ablauf eines rechnergestützten Messprozesses .....	409
9.6.3	Virtuelles Messgerät .....	412
9.6.4	LabVIEW .....	413
9.6.5	MATLAB .....	418
9.7	Energieautarke, funkabfragbare verteilte Messsysteme .....	423

**Literatur ..... 429**

**Index ..... 439**