

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Grundlagen | 1 |
| 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 Sensornahe Signalverarbeitung | 67 |
| 2 Messung von Strom und Spannung; spannung- und stromliefernde Aufnehmer | 69 |
| 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 |
| 3 | Messung von ohmschen Widerständen; Widerstandsaufnehmer | 219 |
| 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 | Heißeiter | 249 |
| 3.6.3 | Kaltleiter | 252 |
| 3.6.4 | Silizium-Widerstandstemperatursensor | 254 |
| 3.6.5 | Fehlermöglichkeiten bei der Anwendung von elektrischen Berührungsthermometern | 256 |
| 3.7 | Indirekte Anwendung der Widerstandsthermometer für Konzentrationsmessungen | 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 | Messung von Blind- und Scheinwiderständen; induktive und kapazitive Aufnehmer | 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 |
| 5 | Digitale Meßtechnik; kodierte und inkrementale Meßwertgeber | 314 |
| 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 |
| 6 | Zeit- und Frequenzmessung; frequenzanaloge Meßwertgeber und Wandler | 362 |
| 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 | Kenngrößen 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 | Messung mechanischer Größen | 433 |
| 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 |