
HANS-JÜRGEN GEVATTER (Hrsg.)

Handbuch der Meß- und Automatisierungstechnik

mit 640 Abbildungen und 91 Tabellen



Springer

Inhalt

A	Begriffe, Benennungen, Definitionen	1
1	Begriffe, Definitionen	3
1.1	Aufgabe der Automatisierung	3
1.2	Methoden der Automatisierung	4
1.3	Information, Signal	4
1.4	Signalarten	5
1.4.1	Amplitudenanaloge Signale	6
1.4.2	Frequenzanaloge Signale	6
1.4.3	Digitale Signale	6
1.4.4	Zyklisch-absolute Signale	7
1.4.5	Einheitssignale	7
1.5	Hilfsenergie	7
2	Grundlagen der Systembeschreibung	9
2.1	Glieder in Steuerungen und Regelungen – Darstellung im Blockschaltbild	9
2.2	Kennfunktion und Kenngrößen von Gliedern	11
2.3	Untersuchung und Beschreibung von Systemen	13
2.3.1	Experimentelle Untersuchung	13
2.3.2	Mathematische Beschreibung	16
3	Umgebungsbedingungen	19
3.1	Gehäusesysteme	19
3.1.1	Aufgabe und Arten	19
3.1.2	Konstruktionsmäßiger Aufbau	19
3.2	Einbauorte	21
3.3	Schutzarten	22
3.3.1	Einteilung und Einsatzbereiche	22
3.3.2	Fremdkörperschutz	23
3.3.3	Explosionsschutz	24
3.4	Elektromagnetische Verträglichkeit	28
B	Meßumformer, Sensoren	31
1	Kraft, Masse, Drehmoment	33
1.1	Kraftmessung	33
1.1.1	Kompensationsverfahren	33
1.1.2	Federwaagenkonzept	35
1.1.3	Resonante Kraftsensoren	47
1.1.4	Mehrkomponenten-Kraftaufnehmer	49
1.2	Massenbestimmung	49
1.3	Messung des Drehmoments	52
2	Druck, Druckdifferenz	59
2.1	Aufgabe der Druckmeßtechnik und Druckarten	59

2.1.1	Zu den Ausführungen über Druckmeßeinrichtungen	59
2.1.2	Aufgabe und Druckarten [DIN 23412]	59
2.1.3	Aufbau von Druckmeßeinrichtungen	61
2.1.4	Verfahren der Druckmessung	62
2.2	Druck- und Differenzdruckmeßeinrichtungen	63
2.2.1	Meßeinrichtungen auf der Grundlage mechanischer Prinzipie der Druckwandlung	63
2.2.2	Meßeinrichtungen auf der Grundlage elektrischer Prinzipie der Druckwandlung	68
2.2.3	Druckwandlung auf der Grundlage mechanisch-pneumatischer Prinzipie	82
2.2.4	Intelligente Druckmeßeinrichtungen und Meßsignalverarbeitung	84
2.2.5	Meßanordnungen zur Druckmessung	91
2.2.6	Meßanordnungen zur Füllstandmessung	93
3	Beschleunigung	99
3.1	Einleitung	99
3.2	Messung translatorischer Beschleunigung	99
3.2.1	Beschleunigungsaufnehmer nach dem Ausschlagverfahren (Open-loop-Aufnehmer)	100
3.2.2	Beschleunigungsaufnehmer nach dem Kompensationsverfahren (Closed-loop-Aufnehmer)	102
3.2.3	Daten typischer Beschleunigungsaufnehmer	104
3.3	Aufnehmer für rotatorische Beschleunigungen	104
3.3.1	Mechanische Kreisel – Drallsatz	104
3.3.2	Optische Kreisel – Sagnac-Effekt	105
3.3.3	Ozillierende Kreisel – Coriolis-Effekt	107
3.3.4	Magnetohydrodynamischer Kreisel	107
3.3.5	Daten typischer Drehratenaufnehmer	108
3.4	Integralinvariante	108
4	Winkelgeschwindigkeits- und Geschwindigkeitsmessung	111
4.1	Einleitung	111
4.2	Sensor-Parameter	111
4.2.1	Linearität	111
4.2.2	Symmetrie	112
4.3	Winkelgeschwindigkeitsmessung	112
4.3.1	Gleichstromtachogeneratoren	112
4.3.2	Wechselstromtachogeneratoren	113
4.3.3	Stroboskop	115
4.3.4	Schlupfspule	115
4.3.5	Digitale Winkelgeschwindigkeitsmessung	116
4.4	Geschwindigkeitsmessung	123
4.4.1	Dopplerverfahren	125
4.4.2	Laufzeitkorrelationsverfahren	125
5	Längen-/Winkelmessung	127
5.1	Analoge Verfahren	127
5.1.1	Amplituden-analoge Weg-/Winkelmessung	127
5.1.2	Laufzeitverfahren	167
5.2	Digitale geometrische Meßverfahren	174
5.2.1	Dingliche Maßstäbe	175
5.2.2	Interferometer	179
5.3	Dehnungsmessung	182
5.3.1	Dehnungsmeßstreifen (DMS)	182

5.3.2	Faseroptische Dehnungssensoren	189
5.3.3	Resonante Dehnungssensoren	191
5.4	Dickenmessung	191
5.4.1	Bestimmung der totalen Dicke	193
5.4.2	Messung von Oberflächenschichten	197
5.5	Füllstandsmessung	198
5.5.1	Echte Bestimmung der Füllmenge	198
5.5.2	Füllstand	198
6	Temperatur	205
6.1	Einleitung	205
6.2	Temperaturmeßgeräte mit elektrischem Ausgangssignal	205
6.2.1	Sensoren	205
6.2.2	Analoge Temperaturmeßverfahren	218
6.2.3	Digitale Temperaturmeßverfahren	225
6.3	Temperaturmeßgeräte mit mechanischem Ausgangssignal	226
6.3.1	Flüssigkeits-Glasthermometer	227
6.3.2	Zeigerthermometer	228
6.4	Temperaturmeßgeräte mit optischem Ausgangssignal	231
6.5	Besondere Temperatursensoren und Meßverfahren	231
6.5.1	Rauschthermometer	231
6.5.2	Akustische Thermometer	232
7	Durchfluß	235
7.1	Einleitung	235
7.2	Aufnehmer für Volumina	235
7.2.1	Unmittelbare Aufnehmer	235
7.2.2	Mittelbare Aufnehmer	239
7.2.3	Anpassungsschaltungen für Aufnehmer für Volumina	241
7.3	Aufnehmer für den Durchfluß	245
7.3.1	Volumendurchfluß	245
7.3.2	Massendurchfluß	252
7.3.3	Anpassungsschaltungen für Druckaufnehmer	254
7.3.4	Anpassungsschaltungen für Laser-Doppler-Velozimeter	256
7.3.5	Anpassungsschaltungen für Schwebekörper-Aufnehmer	257
7.3.6	Anpassungsschaltungen für thermische Durchflußmesser	258
7.4	Signalverarbeitung	258
7.5	Elektromagnetische Verträglichkeit der Meßeinrichtungen (EMV)	259
8	pH-Wert, Redoxspannung, Leitfähigkeit	263
8.1	pH-Wert	263
8.1.1	Defintion	263
8.1.2	Bedeutung	263
8.1.3	Einheit	263
8.1.4	Grundlagen	263
8.1.5	Meßprinzip	264
8.1.6	Sensoren	264
8.1.7	Temperatureinfluß	266
8.1.8	Übertragungsfunktion	267
8.1.9	Meßwertumformer	267
8.1.10	Justieren	268
8.1.11	Standards	269
8.1.12	Meßunsicherheit	269
8.2	Redoxspannung	270

8.2.1	Defintion	270
8.2.2	Bedeutung	270
8.2.3	Einheit	270
8.2.4	Grundlagen	270
8.2.5	Meßprinzip	270
8.2.6	Sensoren	271
8.2.7	Temperatureinfluß	272
8.2.8	Übertragungsfunktion	272
8.2.9	Meßwertumformer	272
8.2.10	Justieren	272
8.2.11	Standards	273
8.2.12	Meßunsicherheit	273
8.2.13	rh-wert	274
8.3	Leitfähigkeit	274
8.3.1	Defintion	274
8.3.2	Bedeutung	274
8.3.3	Einheit	274
8.3.4	Grundlagen	275
8.3.5	Meßprinzip	275
8.3.6	Sensoren	276
8.3.7	Temperatureinfluß	277
8.3.8	Übertragungsfunktion	277
8.3.9	Meßwertumformer	277
8.3.10	Justieren	279
8.3.11	Standards	279
8.3.12	Meßunsicherheit	279
9	Gasfeuchte	281
9.1	Begriffe, Definitionen, Umrechnungen	281
9.1.1	Allgemeines	281
9.1.2	Definitionen und Bedeutung der Kenngrößen	281
9.2	Allgemeines zur Feuchtemessung	283
9.3	Verfahren der Gasfeuchtemessung	283
9.3.1	Tauspiegel-Hygrometer	283
9.3.2	Psychrometer	284
9.3.3	Haar- bzw. Faserhygrometer	285
9.3.4	Kapazitive Feuchtesensoren	286
9.3.5	LiCl-Sensoren	287
9.3.6	Aluminiumoxid-Sensoren	287
9.3.7	Sonstige Verfahren	288
10	Gasanalyse	291
10.1	Einleitung	291
10.2	Fotometrische Verfahren	292
10.3	Paramagnetische Sauerstoffmessung	296
10.4	Wärmeleitfähigkeitsanalysator	299
10.5	Flammenionisationsdetektor FID	301
10.6	Chemosensoren	302
10.7	Gaschromatographie GC	303
10.8	Analysensysteme (Anwendungen)	306
C	Bauelemente für die Signalverarbeitung mit elektrischer Hilfsenergie	311
1	Regler	317
1.1	Allgemeine Eigenschaften	317

1.2	Verhalten linearer kontinuierlicher Regelkreise	317
1.2.1	Dynamisches Verhalten	317
1.2.2	Stationäres Verhalten	318
1.3	Reglertypen	319
1.4	Digitale Regler	320
1.4.1	Prinzip	320
1.4.2	Regler mit Mikrocomputern	322
2	Schaltende Regler	325
2.1	Begriffsbestimmung	325
2.2	Reglertypen	325
3	Elektrische Signalverstärker	329
3.1	Einteilung und Anforderungen	329
3.2	Verstärkergrundtypen	330
3.3	Einfache Verstärkerstufen mit Bipolar- und Feldeffekttransistoren	330
3.3.1	Bipolartransistor	330
3.3.2	Feldeffekttransistor (FET)	331
3.3.3	Schaltungen mit einem Eingang	331
3.3.4	Differenzverstärker	335
3.3.5	Kopplung zwischen zwei Stufen	336
3.4	Operationsverstärker	336
3.4.1	Kenngößen und Grundsaltungen	336
3.4.2	Direktgekoppelte Gleichspannungsverstärker	341
3.4.3	Modulationsverstärker	343
3.4.4	Verstärker mit Driftkorrektur	348
3.4.5	Zur Auswahl von Operationsverstärkern	349
3.5	Verstärkergrundtypen mit OV	350
3.6	Instrumentationsverstärker	351
3.7	Trennverstärker (Isolationsverstärker)	356
3.8	Ladungsverstärker	358
4	Elektrische Leistungsverstärker	361
4.1	Grundprinzipien der Leistungselektronik	361
4.1.1	Aufgaben und Einsatzgebiete der Leistungselektronik	361
4.1.2	Schalt- und Kommutierungsvorgänge in leistungselektronischen Einheiten ...	362
4.1.3	Leistungselektronische Schalter	365
4.1.4	Leistungselektronische Grundsaltungen	369
4.1.5	Prinzipien zur Energiezwischenspeicherung	370
4.1.6	Leistungselektronische Stellglieder, Stromrichteranlagen	372
4.2	Bauelemente der Leistungselektronik	372
4.2.1	Einteilung leistungselektronischer Bauelemente	372
4.2.2	Leistungshalbleiter	375
4.3	Leistungselektronische Schaltungstechnik	381
4.3.1	Vorbemerkung	381
4.3.2	Pulsstellerschaltungen	381
4.3.3	Wechselspannungssteller	383
4.3.4	Netzgelöschte Wechsel- und Gleichrichter	386
4.3.5	Spannungswechselrichter und -gleichrichter	387
4.3.6	Stromwechselrichter und -gleichrichter	389
4.3.7	Zwischenkreisumrichter	391
5	Analogschalter und Multiplexer	395
5.1	Analogschalter	395
5.2	Multiplexer für analoge Signale	395

6	Spannungs-Frequenz-Wandler ($U/f, f/U$)	397
6.1	Wirkungsweise einer hochlinearen U/f -Wandlerschaltung	397
6.2	Taktgesteuerter U/f -Wandler	398
6.3	Typische Anwendungen	399
7	Funktionsgruppen für analoge Rechenfunktionen. Oszillatoren	401
7.1	Multiplizierer, Quadrierer, Dividierer, Radizierer	401
7.2	Generatoren für Sinusschwingungen	402
7.3	Phasenregelkreis (PLL)	404
8	Digital-Resolver- und Resolver-Digital-Umsetzer	407
8.1	Resolverwirkprinzip	407
8.2	Resolver-Digital-Umsetzer	408
8.3	Digital-Resolver-Umsetzer	409
9	Modulatoren und Demodulatoren	411
9.1	Modulatoren	411
9.1.1	Wertkontinuierliches Modulationssignal	411
9.1.2	Wertdiskretes Modulationssignal	413
9.2	Demodulatoren	413
10	Sample and Hold-Verstärker	415
11	Analog-Digital-Umsetzer	417
11.1	Umsetzverfahren	417
11.2	Parallelverfahren	419
11.3	Wägeverfahren (sukzessive Approximation)	420
11.4	Zählverfahren	420
11.4.1	Nachlauf-AD-Umsetzer	420
11.4.2	Zweiflankenverfahren (Dual-slope)	421
11.4.3	Ladungsausgleichsverfahren (Charge-balancing-Verfahren)	422
11.5	Delta-Sigma-AD-Umsetzer.Oversampling	423
11.6	Anwendungsgesichtspunkte	425
12	Digital-Analog-Umsetzer	427
13	Referenzspannungsquellen	429
13.1	Referenzspannungserzeugung mit Z-Dioden	429
13.2	Stabilisierungsschaltungen mit Regelung	430
14	Nichtlineare Funktionseinheiten	433
14.1	Verstärker, Begrenzer, Betragsbildner, Gleichrichter, analoge Torschaltungen	433
14.2	Funktionsgeneratoren	434
14.3	Grenzwertmelder (Komparatoren), Extremwertauswahl, Totzone	435
15	Filter	437
15.1	Übersicht	437
15.2	Kontinuierliche Analogfilter	439
15.2.1	Passive RLC-Filter	439
15.2.2	Aktive RC-Filter	439
15.2.3	Filter mit verteilten Elementen	441
15.3	Analoge Abtastfilter	444
15.3.1	Ladungsverschiebeelemente (Charge-Transfer Devices)	444
15.3.2	SC-Filter (Switched Capacitor)	444
15.4	Digitale Filter	446
16	Pneumatisch-elektrische Umformer	449
16.1	Einführung	449
16.2	Umformer für analoge Signale	449
16.2.1	Elektrisch-pneumatische Umformer	449

16.2.2	Pneumatisch-elektrische Umformer	451
16.3	Umformer für diskrete Signale	453
16.3.1	Elektrisch-pneumatische Umformer	453
16.3.2	Pneumatisch-elektrische Umformer	453
16.4	Entwicklungstrend	454
17	Digitale Grundsaltungen	455
17.1	Schaltungsintegration	455
17.2	Schaltkreisfamilien	456
17.2.1	Überblick	456
17.2.2	TTL-Schaltkreise	457
17.2.3	CMOS-Schaltkreise	459
17.2.4	Interfaceschaltungen. Störeinflüsse	460
17.2.5	Störemfindlichkeit	462
17.3	Kippschaltungen	462
17.3.1	Schmitt-Trigger	463
17.3.2	Flipflopstufen	464
17.3.3	Univibratoren (Monoflops)	466
17.3.4	Multivibratoren	469
17.4	Zähler und Frequenzteiler	470
17.4.1	Zähler	471
17.4.2	Frequenzteiler	473
17.5	Dekodierer	474
17.6	Multiplexer	474
17.7	Digitale Komparatoren	475
D	Bus-Systeme	477
1	Überblick und Wirkprinzipien	479
1.1	Einteilung und Grundstrukturen	479
1.2	Buszugriffsverfahren	479
1.2.1	Zufälliger Buszugriff: CSMA, CSMA/CD, CSMA/CA	480
1.2.2	Kontrollierter Buszugriff: Master-Slave, Token-Passing	481
1.3	Datensicherung / Fehlererkennung	482
1.4	Elektrische Schnittstellen als Übertragungsstandards	483
2	Parallele Busse	485
2.1	IEC-Bus	485
2.2	VMEbus	486
3	Serielle Busse	489
3.1	Mehrebenenstrukturen der industriellen Kommunikation	489
3.2	Feldbusse	490
3.2.1	PROFIBUS	490
3.2.2	INTERBUS-S	491
3.2.3	CAN	493
3.2.4	ASI-Interface	494
3.2.5	HART-Protokoll	496
3.2.6	Übersicht zu industriellen Feldbussystemen	497
E	Bauelemente für die Signalverarbeitung mit pneumatischer Hilfsenergie	499
1	Grundelemente der Pneumatik	501
1.1	Überblick	501
1.2	Strömungswiderstände	501
1.2.1	Einzelwiderstände	501

1.2.2	Widerstände in Schaltungen	503
1.3	Druckteilerschaltungen	505
1.3.1	System Düse-Prallplatte	505
1.3.2	System Düse-Prallplatte mit Ejektorwirkung	507
1.3.3	System Einlaßdüse-Auslaßdüse	508
1.3.4	System Düse-Kugel	508
1.3.5	Bemerkungen	509
1.4	Volumenelemente	510
1.4.1	Starre Speicher	510
1.4.2	Elastischer Speicher	510
1.4.3	Widerstand-Speicher-Kombinationen	511
1.5	Elastische Elemente	513
1.5.1	Membranen	514
1.5.2	Metallfaltenbälge (Wellrohre)	516
1.6	Pneumatische Leitungen	518
1.6.1	Ermittlung der Leitungsparameter	518
1.6.2	Übertragung analoger Signale	519
1.6.3	Übertragung diskreter Signale	521
1.7	Strahlelemente	522
1.7.1	Strahlableitkelemente	524
1.7.2	Gegenstrahlelemente	524
1.7.3	Turbulenzelemente	525
1.7.4	Wandstrahlelemente	525
1.7.5	Wirbelkammerelemente	527
2	Analoge pneumatische Signalverarbeitung	529
2.1	Arbeitsverfahren	529
2.1.1	Ausschlagverfahren	529
2.1.2	Kompensationsverfahren	530
2.2	Verstärker	532
2.2.1	Verstärker mit bewegten Bauteilen	532
2.2.2	Verstärker ohne bewegte Bauteile	537
2.3	Rechengерäte	538
2.4	Pneumatische Regeleinrichtungen	541
2.4.1	Arbeitsweise	541
2.4.2	Regler mit bewegten Bauteilen	541
2.4.3	Regler ohne bewegte Bauteile	550
3	Pneumatische Schaltelemente	555
3.1	Arbeitsweise	555
3.2	Schaltelemente mit bewegten Bauteilen	557
3.3	Schaltelemente ohne bewegte Bauteile	560
4	Elektrisch-pneumatische Umformer	567
4.1	Ausschlagverfahren	567
4.2	Wegvergleichendes Prinzip	567
4.3	Kraftvergleichendes Prinzip	569
4.4	Drehmomentvergleichendes Prinzip	570
4.5	Elektrischvergleichendes Prinzip	572
4.6	Zusammenfassung	572
F	Elektronische Steuerungen	575
1	Speicherprogrammierbare Steuerung	577
1.1	Strukturelle Betrachtung der speicherprogrammierbaren Steuerung	577

1.1.1	Grundstruktur einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS)	577
1.1.2	Die Zentralbaugruppe	579
1.1.3	Die Peripheriebaugruppen	581
1.2.	Funktionale Betrachtung der speicherprogrammierbaren Steuerung	582
1.2.1	Aufbau der Steuerungsanweisung	582
1.2.2	Zyklische Programmbearbeitung	583
1.2.3	Zykluszeit und Reaktionszeit	584
1.3	Programmierung	585
1.3.1	Strukturierter Programmaufbau	585
1.3.2	Programmiersprachen	586
2	Numerische Steuerungen	591
2.1.	Einführung und Definition	591
2.1.1	Kartesische Kinematiken	592
2.1.2	Nichtkartesische Kinematiken	593
2.2	Bewegungssteuerung	593
2.2.1	Einführung	593
2.2.2	Interpolation	594
2.2.3	Koordinatentransformation	598
2.2.4	Sensorschnittstellen	601
2.3	Programmierung	604
2.3.1	Programmierung von NC-Maschinen	604
2.3.2	Programmierung von Industrierobotern	606
2.3.3	Kalibrierung	608
G	Bauelemente für die Signalverarbeitung mit hydraulischer Hilfsenergie	611
1	Hydraulische Signal- und Leistungsverstärker	613
1.1	Elektrische Eingangsstufe für Stetigventile	613
1.2	Hydraulische Vorsteuerstufe für Stetigventile (Verstärkerstufe)	616
2	Elektrohydraulische Umformer	619
2.1	Proportional-Wegeventile	619
2.2	Servoventile	622
2.3	Proportional-Druckventile	629
2.4	Proportional-Drosselventile	631
2.5	Proportional-Stromregelventile	633
H	Stelleinrichtungen	635
1	Aufgabe und Aufbau von Stelleinrichtungen für Stoffströme	637
1.1	Aufgabe und Wirkprinzip	637
1.2	Aufgaben und Einteilung von drosselnden Stelleinrichtungen für Stoffströme	639
1.3	Grundbegriffe [EN 60534-1]	640
1.3.1	Begriffe für Bauteile und Funktionseinheiten	640
1.3.2	Funktionsbezeichnungen	641
1.3.3	Konstruktionsanforderungen	644
1.3.4	Prüfanforderungen	644
1.3.5	Berechnungen	644
2	Arten und Eigenschaften von Stellgliedern mit Hubbewegung	647
2.1	Stellventile mit Hubbewegung des Drosselkörpers	647
2.1.1	Einsatzparameter	647
2.1.2	Stellventilkörper und Stellventilbauformen	648

2.1.3	Stellventilgarnitur	649
2.1.4	Abdichtung Drosselkörper – Ventilstellantrieb	652
2.2	Membranventil	652
2.3	Schlauch- oder Quetschventil	653
2.4	Gleitschieber-Stellventil	653
2.4.1	Wirkungsweise und Einsatzparameter	653
2.4.2	Körper und Bauform	655
2.4.3	Drosselelemente	655
2.4.4	Abdichtung Drosselkörper – Ventilstellantrieb	655
2.5	Vor- und Nachteile ausgewählter Hubventile	655
3	Arten und Eigenschaften von Stellgliedern mit Drehbewegung	659
3.1	Drehkegelstellventil	659
3.1.1	Drehkegelstellventil mit zylindrischem oder kegeligem Drosselkörper	659
3.1.2	Drehkegelstellventil mit kugelförmigem Drosselkörper	660
3.1.3	Drehkegelstellventil mit kugelsegmentförmigem Drosselkörper	663
3.1.4	Stellklappe	665
3.2	Vor- und Nachteile ausgewählter Stellglieder mit Dreh- (Schwenk-)Bewegung des Drosselkörpers	667
4	Bemessungsgleichungen für Stellglieder nach DIN/IEC 534	671
4.1	Berechnungsziele und Gültigkeitsbereiche der Bemessungsgleichungen	671
4.2	Ausgewählte Grundbegriffe zur Kennzeichnung der Strömung bei Fluiden	671
4.3	Zur Auswahl eines Stellgliedes	674
4.3.1	Berechnung des Durchflusses bei inkompressiblen Fluiden [DIN/IEC 534-2-1]	674
4.3.2	Berechnung des Durchflusses bei kompressiblen Fluiden [DIN/IEC 534-2-2]	680
4.3.3	Korrekturfaktoren für Rohrleitungen mit Fittings	682
4.3.4	Kennlinien von Stellgliedern	683
4.3.5	Schallemission bei drosselnden Stellgliedern	686
4.4	Werkstoffe für Stellglieder	687
I	Stellantriebe	689
1	Stellantriebe mit elektrischer Hilfsenergie	691
1.1	Allgemeines	691
1.2	Stetig rotierende Motoren	691
1.2.1	Gleichstrommotor	691
1.2.2	Elektronikmotor	700
1.2.3	Drehstrom-Asynchronmotor	707
1.3	Schrittmotoren	715
1.3.1	Allgemeines	715
1.3.2	Ausführungen	716
1.3.3	Ansteuerung	718
1.3.4	Betriebsverhalten	718
1.4	Anpassungsgetriebe	720
1.4.1	Allgemeines	720
1.4.2	Zahnradgetriebe	721
1.4.3	Reibgetriebe	723
1.4.4	Zugmittelgetriebe	723
1.4.5	Lineargetriebe	724
1.5	Direktantriebe	725
1.5.1	Elektromagnete	726

1.5.2	Thermobimetalle	729
1.5.3	Formgedächtnis-Legierungen	730
1.5.4	Dehnstoff-Elemente	731
1.5.5	Elektrochemischer Aktor	732
1.5.6	Piezoelektrische Aktoren	733
1.5.7	Magnetostriktive Aktoren	738
1.5.8	Mikroaktoren	739
2	Stellantriebe mit pneumatischer Hilfsenergie	743
2.1	Wirkungsweise, Arten und ausgewählte Eigenschaften	743
2.2	Bewegungsgrößen	744
2.3	Konstruktionsausführung	746
2.3.1	Membranantriebe	746
2.3.2	Kolbenantrieb	748
2.3.3	Anpassung	748
2.4	Stellungsregler und Zusatzausrüstungen	749
2.4.1	Stellungsregler	749
2.4.2	Zusatzeinrichtungen	749
2.5	Hinweise zur Dimensionierung eines pneumatischen Stellantriebes	749
3	Stellantriebe mit hydraulischer Hilfsenergie	753
3.1	Hydraulische Schwenkmotoren	753
3.2	Hydrozylinder	756
K	Schaltgeräte	763
1	Elektromechanische Relais	765
1.1	Übersicht	765
1.2	Relaismarkt	765
1.3	Einsatzbereiche	766
1.4	Relaistypen nach DIN	767
2	Relaisausführungen	769
2.1	Elektromagnetischer Antrieb	769
2.2	Weitere Antriebe	769
2.3	Lötrelais	769
2.4	Steckrelais	770
3	Elektromagnetische Relais	771
3.1	Die Antriebseite elektromagnetischer Relais.	771
3.1.1	Typ 1 – neutrale monostabile Relais	771
3.1.2	Typ 2 – neutrale bistabile Relais	772
3.1.3	Typ 3 – Remanenzrelais	772
3.1.4	Typ 4 – gepolte bistabile Relais	773
3.1.5	Typ 5 – gepolte monostabile Relais	773
3.1.6	Schutzbeschaltung der Erregerseite	773
3.2	Kontaktseite eines elektromagnetischen Relais	774
3.2.1	Kontaktmaterialien	774
3.2.2	Lichtbogengrenzspannung	774
3.2.3	Kontaktaufbau	775
3.2.4	Schließer	775
3.2.5	Wechsler	777
3.2.6	Sonstige	778
3.2.7	Optimale Betriebsbedingungen der Lastseite	778
3.2.8	Schutzbeschaltung der Lastseite	778

3.3	Leistungsgrenzen	.778
3.3.1	Erwärmung	.779
3.3.2	Betriebsspannungsbereich	.779
3.3.3	Schaltzeiten	.779
3.3.4	Grenzdauerstrom und maximaler Spannungsabfall	.780
4	Alternativen zu Relais	.783
4.1	Halbleiterrelais	.783
4.2	Hybridrelais	.784
5	Qualität und Entsorgung	.785
5.1	Qualität	.785
5.2	Entsorgung	.785
6	Niederspannungsschaltgeräte	.787
6.1	Überblick über Funktionen	.787
6.2	Geräte für Hilfsstromkreise	.788
6.2.1	Geräte für Signaleingabe	.788
6.2.2	Geräte für Signalverknüpfung und -ausgabe	.790
6.3	Geräte für Hauptstromkreise	.792
6.3.1	Trennen und Schützen	.792
6.3.2	Schalten	.793
6.3.3	Überwachen	.795
6.3.4	Gerätekombinationen	.796
6.4	IEC-, DIN EN- und DIN VDE-Bestimmungen	.797
L	Hilfsenergiequellen	.799
1	Netzgeräte	.801
1.1	Übersicht	.801
1.1.1	Schaltungen mit Netzfrequenztransformatoren	.801
1.1.2	Schaltungen mit Hochfrequenztransformatoren	.802
1.2	Gleichrichtung	.802
1.3	Leistungsfaktorregelung	.804
1.4	Längsregler	.804
1.5	Schaltregler	.804
1.6	DC/DC-Wandler	.804
2	Druckluftversorgung	.807
2.1	Anforderungen an Druckluft und ausgewählte Eigenschaften von Druckluft ..	.807
2.2	Aufbau von Druckluftanlagen	.808
2.3	Drucklufterzeugung	.809
2.4	Regelung des Förderstromes	.810
2.5	Druckluftaufbereitung	.811
3	Druckflüssigkeitsquellen	.813
3.1	Antriebseinheiten als Energiequelle	.813
3.2	Hydropumpen als Energieumformer	.813
	Abkürzungsverzeichnis	.817
	Stichwortverzeichnis	.883