

# Regelungstechnik in der Versorgungstechnik

herausgegeben  
vom Arbeitskreis der Dozenten  
für Regelungstechnik:

Hans Bach, Siegfried Baumgarth, Kurt Forsch, Josef Reeker,  
Hans Krininger, Ernst Ruosch, Augustin Schäfer, Joachim Schiele,  
Harald Schröder, Wilfried Treusch



Verlag C. F. Müller GmbH  
Karlsruhe

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
<b>Vorwort</b>		<b>XIII</b>
<b>1</b>	<b>Einführung in die Regelungstechnik</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1	Begriffe und Benennungen . . . . .	1
1.1.1	Regelung . . . . .	2
1.1.2	Signalflußplan eines Regelkreises . . . . .	4
1.1.3	Steuerung . . . . .	5
1.1.4	Regelkreise . . . . .	6
1.2	Weitere Beispiele für Regelkreise . . . . .	6
1.3	Folgeregelung . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Beharrungsverhalten und Zeitverhalten von Regelkreisgliedern</b> . . . . .	<b>15</b>
2.1	Beharrungsverhalten von Regelkreisgliedern . . . . .	17
2.2	Zeitverhalten von Regelkreisgliedern . . . . .	22
2.2.1	Sprungantwort elementarer Regelkreisglieder . . . . .	23
2.2.1.1	Proportionalglied oder P-Glied . . . . .	23
2.2.1.2	Verzögerungsglied erster Ordnung oder P-T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	25
2.2.1.3	Integrierendes Glied oder I-Glied . . . . .	30
2.2.1.4	Differenzierendes Glied oder D-Glied . . . . .	33
2.2.1.5	Totzeitglied oder T <sub>1</sub> -Glied . . . . .	37
2.2.1.6	Zusammenfassung . . . . .	38
2.2.2	Frequenzgang elementarer Regelkreisglieder . . . . .	38
2.2.2.1	Proportionalglied . . . . .	40
2.2.2.2	Verzögerungsglied erster Ordnung . . . . .	41
2.2.2.3	Integrierendes Glied . . . . .	46
2.2.2.4	Differenzierendes Glied . . . . .	48
2.2.2.5	Totzeitglied . . . . .	50
2.2.2.6	Zusammenfassung . . . . .	52
2.2.3	Frequenzgang zusammengesetzter Regelkreisglieder . . . . .	52
2.2.3.1	Reihenschaltung von Regelkreisgliedern . . . . .	53
2.2.3.2	Parallelschaltung von Regelkreisgliedern . . . . .	53
2.2.3.3	Kreisschaltung zweier Regelkreisglieder . . . . .	54
2.2.3.4	Graphische Darstellung des Gesamtfrequenzganges mehrerer in Reihe geschalteter Regelkreisglieder . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Regelstrecken</b> . . . . .	<b>59</b>
3.1	Abgrenzung gegenüber der Regeleinrichtung . . . . .	61
3.2	Ermittlung der Kennwerte von Regelstrecken . . . . .	62

3.3	Strecken mit Ausgleich	64
3.3.1	Kennlinie und Übertragungsbeiwert	66
3.3.2	Reale, nicht-lineare Kennlinie	68
3.3.3	Bedeutung eines konstanten Übertragungsbeiwertes	68
3.3.4	Kennlinien-Linearisierung	69
3.3.5	Gleichung der P-Strecke ohne Berücksichtigung von Störgrößen	70
3.3.6	Berücksichtigung von Störgrößen, Störstrecken-Übertragungsbeiwert $K_{Sz}$	73
3.3.7	Gleichung und Kennlinie der P-Strecke mit Berücksichtigung von Störgrößen	74
3.3.8	Beispiel zur P-Strecke mit Berücksichtigung einer Störgröße	75
3.4	Strecken ohne Ausgleich	78
3.5	Das Zeitverhalten von P-Strecken	81
3.5.1	P-Strecke 1. Ordnung ( $n = 1$ )	82
3.5.2	P-Strecke 2. Ordnung ( $n = 2$ )	84
3.5.3	P-Strecken höherer Ordnung ( $n$ . Ordnung)	86
3.5.4	Die Strukturen von Regelstrecken höherer Ordnung	88
3.5.5	Beispiel zur Ermittlung der kritischen Kreisverstärkung einer einfachen Lüftungsanlage aus den Einzel-Zeitkonstanten	91
<b>4</b>	<b>Regleinrichtungen:</b>	
	Aufbau, Verhalten, Einsatz, Gerätetechnik	95
4.1	Eigenschaften von Reglerarten	97
4.1.1	Der Proportionalregler, P-Regler	98
4.1.2	Der Integralregler, I-Regler	100
4.1.3	Der Proportional-Differential-Regler, PD-Regler	101
4.1.4	Der Proportional-Integral-Regler, PI-Regler	102
4.1.5	Der PID-Regler	103
4.1.6	Reale Übergangsfunktionen von Reglern	104
4.2	Auswahl von Regelgeräten	106
4.3	Stetig arbeitende Regelgeräte, Aufbau, Wirkungsweise	106
4.3.1	Elektronische Regler mit P-, PI- und PID-Verhalten	108
4.3.1.1	P-Regler	108
4.3.1.2	PI-Regler	109
4.3.1.3	PD-Regler	111
4.3.1.4	PID-Regler	112
4.3.2	Pneumatische Regler	113
4.3.2.1	P-Regler	116
4.3.2.2	PI-Regler	116
4.3.2.3	PD-Regler	116
4.3.3	Regler ohne Hilfsenergie	116
4.3.3.1	Temperaturregler mit Ausdehnungsfühler	117
4.3.3.2	Druckregler	121
4.3.3.3	Differenzdruckregler, Überströmventile	124

4.4	Zweipunkt-Regler . . . . .	126
4.4.1	Zweipunktregler ohne Rückführung . . . . .	129
4.4.2	Zweipunktregler mit Rückführung . . . . .	135
4.5	Stetig-ähnliche Regler, Dreipunktregler mit Motor-Stellantrieb . . . . .	138
4.5.1	Dreipunktregler mit PI-Verhalten . . . . .	139
4.5.2	Dreipunktregler mit P-Verhalten . . . . .	141
4.6	Meßeinrichtungen . . . . .	143
4.6.1	Temperaturmessung . . . . .	145
4.6.1.1	Elektrische Widerstandsthermometer . . . . .	145
4.6.1.2	Thermoelemente . . . . .	149
4.6.1.3	Mechanische Temperaturfühler . . . . .	150
4.6.2	Messung der Luftfeuchte . . . . .	151
4.6.2.1	Lithium-Chlorid-Feuchtefühler . . . . .	151
4.6.2.2	Messung der relativen Feuchte . . . . .	153
4.6.3	Messung der Enthalpie . . . . .	154
4.6.4	Druckmessung . . . . .	155
4.6.5	Durchflußmessung . . . . .	158
4.6.5.1	Wirkdruck-Meßverfahren . . . . .	158
4.6.5.2	Volumetrische Durchflußmessung . . . . .	158
4.6.6	Meßumformer . . . . .	159
4.6.6.1	Brückenschaltungen . . . . .	159
4.6.6.2	i/p-Meßumformer . . . . .	160
4.7	Stellantriebe . . . . .	161
4.7.1	Elektromotorische Stellantriebe . . . . .	161
4.7.2	Elektro-hydraulische Stellantriebe . . . . .	164
4.7.3	Elektro-thermische Hubantriebe . . . . .	165
4.7.4	Der elektromagnetische Stellantrieb . . . . .	166
4.7.5	Pneumatische Stellantriebe . . . . .	167
4.7.6	Stellungsregler für Stellantriebe . . . . .	168
5	Stellglieder . . . . .	173
5.1	Begriffe und Aufgaben . . . . .	175
5.2	Stellventile . . . . .	179
5.2.1	Typische Bauformen der Stellventile . . . . .	179
5.2.2	Die Kennwerte von Stellventilen (VDI/VDE 2173) . . . . .	181
5.2.3	Die Grundkennlinien der Ventile . . . . .	187
5.2.3.1	Die lineare Kennlinie . . . . .	187
5.2.3.2	Die gleichprozentige Kennlinie . . . . .	188
5.2.3.3	Realer Verlauf der Grundkennlinien (Messung) . . . . .	191
5.2.4	Betriebskennlinie, Ventilautorität . . . . .	194
5.2.5	Hydraulische Grundsaltungen . . . . .	198
5.2.5.1	Beschreibung der hydraulischen Schaltungen, Gesamt- druckgefälle . . . . .	198
5.2.5.2	Wahl der Ventilautorität $P_v$ zur Dimensionierung des Ventils . . . . .	201
5.2.5.3	Hydraulischer Abgleich . . . . .	201

5.2.5.4	Einsatzgebiete der hydraulischen Grundsaltungen . . . . .	202
5.2.6	Die Regelung von wasserbeheizten Wärmeübertragern . . . . .	203
5.2.6.1	Kenngößen von wasserbeheizten Wärmeübertragern . . . . .	203
5.2.6.2	Ermittlung der Streckenkennlinie aus der Betriebskennlinie des Ventils und der Kennlinie des Wärmeübertragers . . . . .	206
5.2.6.3	Regelungstechnisch günstige Wahl von $P_v$ und $a$ . . . . .	207
5.2.6.4	Richtlinien zur Ventildimensionierung . . . . .	211
5.3	Stellklappen . . . . .	213
5.3.1	Bauformen . . . . .	213
5.3.2	Strömungstechnische Kenngößen . . . . .	214
5.3.2.1	Stellwinkel und Anschlagwinkel . . . . .	214
5.3.2.2	Durchflußbeiwerte $k_v$ . . . . .	216
5.3.2.3	Stellverhältnis . . . . .	217
5.3.3	Kennlinien . . . . .	217
5.3.3.1	Grundkennlinien . . . . .	217
5.3.3.2	Betriebskennlinien . . . . .	219
5.4	Weitere Stellglieder . . . . .	223
5.4.1	Hähne . . . . .	223
5.4.2	Pumpen . . . . .	225
5.4.3	Ventilatoren . . . . .	233
5.4.4	Elektrische Leistungssteller . . . . .	235
5.4.4.1	Elektromotorische Programmschaltwerke . . . . .	235
5.4.4.2	Elektromotorische Stufenschalter . . . . .	237
5.4.4.3	Stelltransformatoren . . . . .	238
5.4.4.4	Phasenanschnitt-gesteuerte Steller für Wechsel- und Drehstrom . . . . .	239
5.4.4.5	Vollwellengesteuerte Leistungssteller für Wechsel- und Drehstrom . . . . .	241
5.4.4.6	Thyristor-gesteuerte Stromrichtergeräte . . . . .	243
5.4.4.7	Statische Umrichtergeräte für Drehstrom-Asynchronmotoren . . . . .	245
<b>6</b>	<b>Der geschlossene Regelkreis . . . . .</b>	<b>247</b>
6.1	Der geschlossene Regelkreis als schwingungsfähiges System . . . . .	248
6.2	Stabilitätskriterium . . . . .	250
6.3	Stabilitätsverhalten einiger Regelkreise . . . . .	251
6.3.1	Grundsätzlich stabile Regelkreise . . . . .	251
6.3.2	Grundsätzlich instabile Regelkreise . . . . .	255
6.4	Stabilitätsreserve . . . . .	256
6.5	Bode-Diagramm . . . . .	257
6.6	Näherungsweise Abschätzung der Stabilität . . . . .	263
6.7	Beharrungsverhalten von Regelkreisen mit P-RE . . . . .	268
<b>7</b>	<b>Einstellregeln . . . . .</b>	<b>273</b>
7.1	Gebräuchliche Einstellregeln und Optimierung . . . . .	273
7.2	Optimierungsverfahren . . . . .	273

7.3	Einstellung nach Kenngrößen der Regelstrecke . . . . .	275
7.4	Experimentelle Einstellregeln nach <i>Ziegler</i> und <i>Nichols</i> nach der Stabilitätsgrenze . . . . .	277
7.5	Einfluß der Reglerparameter beim PI-Regler . . . . .	278
<b>8</b>	<b>Vermaschte Regelkreise . . . . .</b>	<b>281</b>
8.1	Einleitung . . . . .	281
8.2	Störgrößenaufschaltung . . . . .	282
8.3	Störgrößenregelung . . . . .	284
8.4	Hilfsgrößenaufschaltung . . . . .	285
8.5	Kaskadenregelung . . . . .	286
8.6	Vergleich vermaschter Regelungen . . . . .	286
<b>9</b>	<b>Digitale Regelungstechnik . . . . .</b>	<b>289</b>
9.1	Einführung . . . . .	289
9.2	Digitalisierung des Analogsignals . . . . .	290
9.2.1	Quantisierung und Abtastung . . . . .	290
9.2.2	Codierung . . . . .	294
9.3	DA- und AD-Umsetzer . . . . .	298
9.3.1	DA-Umsetzer . . . . .	298
9.3.2	AD-Umsetzer . . . . .	300
9.4	Mikrorechner . . . . .	303
9.4.1	Der Aufbau eines Mikrorechners . . . . .	304
9.4.2	Die internen Datenleitungen des Mikrorechners . . . . .	306
9.4.3	Die Arbeitsweise eines Mikrorechners . . . . .	306
9.4.4	Programmierung von Mikrorechnern . . . . .	310
9.5	Verwirklichung konventioneller Regelalgorithmen auf dem Mikrorechner . . . . .	311
9.6	Übertragung digitaler Daten . . . . .	315
<b>10</b>	<b>Zentrale Leittechnik für Betriebstechnische Anlagen in Gebäuden (ZLT-G) . . . . .</b>	<b>317</b>
10.1	Übersicht . . . . .	317
10.2	Anwendungsbereich der ZLT-G . . . . .	317
10.3	Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen . . . . .	318
10.4	Steuerprogramme . . . . .	320
10.4.1	Zeitschaltprogramme . . . . .	320
10.4.2	Optimierendes Zeitschaltprogramm . . . . .	320
10.4.3	Beleuchtungssteuerung . . . . .	322
10.4.4	Energiemanagement . . . . .	322
10.4.5	Zyklisches Ein- und Ausschalten . . . . .	323

10.4.6	Spitzenlastüberwachung mit Lastabwurf	323
10.5	Regelalgorithmen, Direct Digital Control (DDC)	324
10.6	Systemaufbau der ZLT-G	324
10.6.1	Geber und Fühler	324
10.6.2	Verbindungsleitungen zu den Gebern	326
10.6.3	Unterstationen	326
10.6.4	Unterzentrale	327
10.6.5	Übertragungsstrecke	327
10.6.6	Leitzentrale	327
10.6.7	Zusätzliche Ein- und Ausgabegeräte	327
10.7	Grundfunktionen der ZLT-G	328
10.7.1	Melden	328
10.7.2	Messen	328
10.7.3	Zählen	328
10.7.4	Befehlen, Schalt- und Stellbefehl	328
10.8	Funktion und Informationsgehalt	328
10.9	Aufgaben der Verarbeitungsfunktionen	329
<b>11</b>	<b>Beispiele zur Regelung von versorgungstechnischen Anlagen</b>	<b>333</b>
11.1	Beispiele aus der Heizungstechnik	334
11.1.1	Raumtemperatur-Regelung mit thermostatischen Heizkörper-	
	ventilen, witterungsabhängig vorgeregelt, bei einem	
	Einfamilienhaus	334
11.1.1.1	Energie-Einsparung durch die Regelanlage	335
11.1.1.2	Wahl der Regeleinrichtung	335
11.1.1.3	Anlagenschema-Übersicht	337
11.1.1.4	Die zentrale Vorregelung einschließlich Vorrang-Schaltung	
	für Warmwasser	338
11.1.1.5	Thermostatische Heizkörper-Ventile	346
11.1.1.6	Die Fühler und deren Anordnung	354
11.1.1.7	Regler-Einstellungen	356
11.1.2	Fußbodenheizung	357
11.1.2.1	Aufgabe und Funktion einer Fußbodenheizung	357
11.1.2.2	Regelung der Wärmeleistung einer Fußbodenheizung	358
11.1.2.3	Beispiel zur Bestimmung eines Dreiwege-Mischventils	362
11.1.3	Fernheizung	365
11.1.3.1	Aufgabe und Aufbau von Feinheizungsanschlüssen	365
11.1.3.2	Druckverteilung in einer Heißwasser-Fernleitung	368
11.1.3.3	Dimensionierung einer geregelten Wasser-Strahlpumpe	371
11.1.3.3.1	Allgemeines	371
11.1.3.3.2	Auslegungsverfahren	371
11.1.3.3.3	Beispiel	373
11.2	Beispiele aus der Klimatechnik	375
11.2.1	Raumtemperatur-Regelung über Zuluftkaskadenregelung	375
11.2.2	Regelung der Wäscheraustrittstemperatur (Taupunkttemperatur-	
	Regelung)	383

11.2.2.1	Regelungsschema für festen Zuluftfeuchtegehalt . . . . .	383
11.2.2.2	Direkte Feuchterege- lung mit Wäscheraustrittstemperatur- Regelung in Kaskade . . . . .	389
11.2.2.3	Gegenüberstellung der Regelgüte einer einfachen Raumfeuchte- Regelung zur Raumfeuchterege- lung mit Kaskadenregelung . . . . .	390
11.2.3	Regelung einer Zweikanal-Klimaanlage . . . . .	393
11.2.3	Regelung einer Zweikanal-Klimaanlage . . . . .	393
11.2.3.1	Konstante Luftzustände für Warm- und Kaltluftkanal während des gesamten Jahres . . . . .	393
11.2.3.2	Außentemperaturabhängige Warm- und Kaltluftkanal- temperaturen . . . . .	397
11.3	Regeleinrichtung für gastechnische Versorgungsanlagen . . . . .	401
11.3.1	Einleitung . . . . .	401
11.3.2	Regel- und sicherheitstechnische Einrichtungen . . . . .	402
11.3.2	Regeleinrichtungen . . . . .	406
11.4	Energiesparende Wärmeversorgung . . . . .	413
11.4.1	Solaranlagen . . . . .	413
11.4.1.1	Einleitung . . . . .	413
11.4.1.2	Solartechnisches Zusatz-System für Warmwasserbereitung . . . . .	413
11.4.1.3	Solartechnische Zusatz-Einrichtung für Warmwasserbereitung und Raumheizung . . . . .	414
11.4.1.4	Ankoppelung einer solartechnischen Zusatzeinrichtung an eine vorhandene Pumpen-Warmwasserheizung . . . . .	415
11.4.2	Regelung von Wärmepumpenanlagen . . . . .	417
11.4.2.1	Ein- und Ausschaltverfahren . . . . .	417
11.4.2.2	Mehrzylinerverdichter . . . . .	418
11.4.2.3	Aufteilung der Leistung auf mehrere Verdichter . . . . .	419
11.4.2.4	Drehzahleregelte Verdichter (Kolbenverdichter) . . . . .	419
11.4.2.5	Heißgas-Bypass-Regelung . . . . .	420
11.4.2.6	Leistungsregelung mit Einspritzung . . . . .	421
11.4.2.7	Verdampferregelung . . . . .	421
11.4.2.8	Sicherheitseinrichtungen . . . . .	422
11.4.2.9	Beispiel einer Wärmepumpenregelung . . . . .	422
11.4.2.10	Regelung von Wärmepumpen-Heizungsanlagen . . . . .	424
11.4.2.10.1	Monovalente Systeme, Beispiel Fußbodenheizung . . . . .	424
11.4.2.10.2	Bivalente Wärmepumpenheizungsanlagen . . . . .	426
	Sachregister . . . . .	429