

## Regelungs- und Steuerungstechnik

H. Unbehauen, F. Ley

### Regelungstechnik

H. Unbehauen

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung der Regelungs- und Steuerungstechnik	1
1.2	Darstellung im Blockschaltbild	1
1.3	Unterscheidung zwischen Regelung und Steuerung	2
1.4	Beispiele von Regel- und Steuerungssystemen	3
<b>2</b>	<b>Modelle und Systemeigenschaften</b>	<b>4</b>
2.1	Mathematische Modelle	4
2.2	Systemeigenschaften	5
	2.2.1 Lineare und nichtlineare Systeme – 2.2.2 Systeme mit konzentrierten und verteilten Parametern – 2.2.3 Zeitvariante und zeitinvariante Systeme – 2.2.4 Systeme mit kontinuierlicher und diskreter Arbeitsweise – 2.2.5 Systeme mit deterministischen oder stochastischen Variablen – 2.2.6 Kausale Systeme – 2.2.7 Stabile und instabile Systeme – 2.2.8 Eingrößen- und Mehrgrößensysteme	
<b>3</b>	<b>Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Zeitbereich</b>	<b>9</b>
3.1	Beschreibung mittels Differenzialgleichungen	9
	3.1.1 Elektrische Systeme – 3.1.2 Mechanische Systeme – 3.1.3 Thermische Systeme	
3.2	Beschreibung mittels spezieller Ausgangssignale	11
	3.2.1 Die Übergangsfunktion (Normierte Sprungantwort) – 3.2.2 Die Gewichtsfunktion (Impulsantwort) – 3.2.3 Das Faltungintegral (Duhamel'sches Integral)	
3.3	Zustandsraumdarstellung	12
	3.3.1 Zustandsraumdarstellung für Eingrößensysteme – 3.3.2 Zustandsraumdarstellung für Mehrgrößensysteme	
<b>4</b>	<b>Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Frequenzbereich</b>	<b>14</b>
4.1	Die Laplace-Transformation	14
4.2	Die Fourier-Transformation	15
4.3	Der Begriff der Übertragungsfunktion	16
	4.3.1 Definition – 4.3.2 Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion – 4.3.3 Das Rechnen mit Übertragungsfunktionen – 4.3.4 Zusammenhang zwischen $G(s)$ und der Zustandsraumdarstellung – 4.3.5 Die komplexe $G$ -Ebene	
4.4	Die Frequenzgangdarstellung	18
	4.4.1 Definition – 4.4.2 Ortskurvendarstellung des Frequenzganges – 4.4.3 Darstellung des Frequenzganges durch Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm)	
4.5	Das Verhalten der wichtigsten Übertragungsglieder	20
	4.5.1 Das proportional wirkende Glied (P-Glied) – 4.5.2 Das integrierende Glied (I-Glied) – 4.5.3 Das differenzierende Glied (D-Glied) – 4.5.4 Das Verzögerungsglied 1. Ordnung (PT <sub>1</sub> -Glied) – 4.5.5 Das Verzögerungsglied 2. Ordnung (PT <sub>2</sub> -Glied und PT <sub>2</sub> S-Glied) – 4.5.6 Bandbreite eines Übertragungsgliedes – 4.5.7 Systeme mit minimalem und nichtminimalem Phasenverhalten	
<b>5</b>	<b>Das Verhalten linearer kontinuierlicher Regelkreise</b>	<b>26</b>
5.1	Dynamisches Verhalten des Regelkreises	26
5.2	Stationäres Verhalten des Regelkreises	27
5.3	Der PID-Regler und die aus ihm ableitbaren Reglertypen	28
<b>6</b>	<b>Stabilität linearer kontinuierlicher Regelsysteme</b>	<b>31</b>
6.1	Definition der Stabilität	31
6.2	Algebraische Stabilitätskriterien	32
	6.2.1 Das Hurwitz-Kriterium – 6.2.2 Das Routh-Kriterium	
6.3	Das Nyquist-Verfahren	34

6.3.1	Das Nyquist-Kriterium in der Ortskurvendarstellung – 6.3.2 Das Nyquist-Kriterium in der Frequenzkennliniendarstellung – 6.3.3 Vereinfachte Formen des Nyquist-Kriteriums	
<b>7</b>	<b>Das Wurzelortskurvenverfahren</b>	<b>37</b>
7.1	Der Grundgedanke des Verfahrens	37
7.2	Regeln zur Konstruktion von Wurzelortskurven	38
<b>8</b>	<b>Entwurfsvorverfahren für lineare kontinuierliche Regelsysteme</b>	<b>40</b>
8.1	Problemstellung	40
8.2	Entwurf im Zeitbereich	40
	8.2.1 Gütemaße im Zeitbereich – 8.2.2 Integralkriterien – 8.2.3 Quadratische Regelfläche – 8.2.4 Ermittlung optimaler Einstellwerte eines Reglers nach dem Kriterium der minimalen quadratischen Regelfläche – 8.2.5 Empirisches Vorgehen	
8.3	Entwurf im Frequenzbereich	45
	8.3.1 Kenndaten des geschlossenen Regelkreises im Frequenzbereich und deren Zusammenhang mit den Gütemaßen im Zeitbereich – 8.3.2 Kenndaten des offenen Regelkreises und deren Zusammenhang mit den Gütemaßen des geschlossenen Regelkreises im Zeitbereich – 8.3.3 Reglerentwurf nach dem Frequenzkennlinien-Verfahren – 8.3.4 Korrekturglieder für Phase und Amplitude – 8.3.5 Reglerentwurf mit dem Wurzelortskurvenverfahren	
8.4	Analytische Entwurfsvorverfahren	50
	8.4.1 Vorgabe des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises – 8.4.2 Das Verfahren nach Truxal-Guillemain – 8.4.3 Algebraisches Entwurfsvorverfahren	
<b>9</b>	<b>Nichtlineare Regelsysteme</b>	<b>55</b>
9.1	Allgemeine Eigenschaften nichtlinearer Regelsysteme	55
9.2	Regelkreis mit Zwei- und Dreipunktreglern	55
9.3	Analyse nichtlinearer Regelsysteme mithilfe der Beschreibungsfunktion	57
	9.3.1 Definition der Beschreibungsfunktion – 9.3.2 Stabilitätsuntersuchung mittels der Beschreibungsfunktion	
9.4	Analyse nichtlinearer Regelsysteme in der Phasenebene	58
	9.4.1 Zustandskurven – 9.4.2 Anwendung der Methode der Phasenebene zur Untersuchung von Relaisssystemen	
9.5	Stabilitätstheorie nach Ljapunow	60
	9.5.1 Der Grundgedanke der direkten Methode von Ljapunow – 9.5.2 Stabilitätssätze von Ljapunow – 9.5.3 Ermittlung geeigneter Ljapunow-Funktionen	
9.6	Das Stabilitätskriterium von Popov	61
	9.6.1 Absolute Stabilität – 9.6.2 Formulierung des Popov-Kriteriums – 9.6.3 Geometrische Auswertung der Popov-Ungleichung	
<b>10</b>	<b>Lineare zeitdiskrete Systeme: Digitale Regelung</b>	<b>63</b>
10.1	Arbeitsweise digitaler Regelsysteme	63
10.2	Darstellung im Zeitbereich	64
10.3	Die z-Transformation	66
	10.3.1 Definition der z-Transformation	
10.4	Darstellung im Frequenzbereich	66
	10.4.1 Die Übertragungsfunktion diskreter Systeme – 10.4.2 Die z-Übertragungsfunktion kontinuierlicher Systeme	
10.5	Stabilität diskreter Regelsysteme	68
	10.5.1 Stabilitätsbedingungen – 10.5.2 Stabilitätskriterien	
10.6	Regelalgorithmen für die digitale Regelung	70
	10.6.1 PID-Algorithmus – 10.6.2 Der Entwurf diskreter Kompensationsalgorithmen – 10.6.3 Kompensationsalgorithmus für endliche Einstellzeit	
<b>11</b>	<b>Zustandsraumdarstellung linearer Regelsysteme</b>	<b>73</b>
11.1	Allgemeine Darstellung	73
11.2	Normalformen für Eingrößensysteme	74
11.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	75

11.4	Synthese linearer Regelsysteme im Zustandsraum . . . . .	76
11.4.1	Das geschlossene Regelsystem – 11.4.2 Der Grundgedanke der Reglersynthese – 11.4.3 Die modale Regelung – 11.4.4 Das Verfahren der Polvorgabe – 11.4.5 Optimaler Zustandsregler nach dem quadratischen Gütekriterium – 11.4.6 Das Messproblem	
12	<b>Systemidentifikation</b> . . . . .	80
12.1	Deterministische Verfahren zur Systemidentifikation . . . . .	80
12.1.1	Wendetangenten- und Zeitprozentkennwerte-Verfahren – 12.1.2 Identifikation im Frequenzbereich – 12.1.3 Berechnung des Frequenzganges aus der Übergangsfunktion – 12.1.4 Berechnung der Übergangsfunktion aus dem Frequenzgang	
12.2	Statistische Verfahren zur Systemidentifikation . . . . .	83
12.2.1	Korrelationsanalyse – 12.2.2 Spektrale Leistungsdichte – 12.2.3 Statistische Bestimmung dynamischer Eigenschaften linearer Systeme – 12.2.4 Systemidentifikation mittels Parameterschätzverfahren	
13	<b>Weitere Reglerentwurfsverfahren</b> . . . . .	86
13.1	Übersicht . . . . .	86
13.2	Einige weitere klassische Regelkreisstrukturen . . . . .	86
13.2.1	Vermaschte Regelkreise – 13.2.2 Smith-Prädiktor – 13.2.3 IMC-Regler	
13.3	Robuste Regler . . . . .	89
13.4	Modellbasierte prädiktive Regler . . . . .	89
13.5	GMV-Regler . . . . .	90
13.6	Adaptive Regler . . . . .	91
13.7	Nichtlineare Regler . . . . .	91
13.8	„Intelligente“ Regler . . . . .	92

## *Steuerungstechnik*

F. Ley

14	<b>Binäre Steuerungstechnik</b> . . . . .	93
14.1	Grundstruktur binärer Steuerungen . . . . .	93
14.1.1	Signalflussplan – 14.1.2 Klassifizierung binärer Steuerungen	
14.2	Grundlagen der kombinatorischen und der sequentiellen Schaltungen . . . . .	95
14.2.1	Kombinatorische Schaltungen – 14.2.2 Synthese und Analyse sequentieller Schaltungen	
14.3	Darstellung von Zuständen durch Zustandsgraphen und Petri-Netze . . . . .	97
14.4	Technische Realisierung von verbindungsprogrammierten Steuerungseinrichtungen . . . . .	100
14.4.1	Relaistechnik – 14.4.2 Diskrete Bausteinsysteme (DTL- und TTL-Logikfamilien)	
14.5	Speicherprogrammierbare Steuerungen . . . . .	100
14.5.1	Sprachen für Steuerungen nach der Norm IEC61131-3 – 14.5.2 SPS und Prozessrechner – 14.5.3 Prozesssignale von Speicherprogrammierbaren Steuerungen	
	<b>Formelzeichen der Regelungs- und Steuerungstechnik</b> . . . . .	116
	<b>Literatur</b> . . . . .	117