

# Regelungs- und Steuerungstechnik

H. Unbehauen, F. Ley

## Regelungstechnik

H. Unbehauen

<b>1 Einführung</b>	1
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 Modelle und Systemeigenschaften</b>	4
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 Mehrgrößenmodelle	
<b>3 Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Zeitbereich</b>	9
3.1 Beschreibung mittels Differentialgleichungen	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 Eingrößenmodelle – 3.3.2 Zustandsraumdarstellung für Mehrgrößenmodelle	
<b>4 Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Frequenzbereich</b>	14
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 Frequenzgangs – 4.4.3 Darstellung des Frequenzgangs 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 ( $PT_1$ -Glied) – 4.5.5 Das Verzögerungsglied 2. Ordnung ( $PT_2$ -Glied und $PT_2S$ -Glied) – 4.5.6 Bandbreite eines Übertragungsgliedes – 4.5.7 Systeme mit minimalem und nichtminimalem Phasenverhalten	
<b>5 Das Verhalten linearer kontinuierlicher Regelkreise</b>	26
5.1 Dynamisches Verhalten des Regelkreises	26
5.2 Stationäres Verhalten des Regelkreises	27
5.3 Der PID-Regler und die aus ihm ableitbaren Reglerarten	28
<b>6 Stabilität linearer kontinuierlicher Regelsysteme</b>	31
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	37
<b>7 Das Wurzelortskurvenverfahren . . . . .</b>	<b>37</b>
7.1 Der Grundgedanke des Verfahrens . . . . .	37
7.2 Regeln zur Konstruktion von Wurzelortskurven . . . . .	38
<b>8 Entwurfsverfahren 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 Entwurfsverfahren . . . . .	50
8.4.1 Vorgabe des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises – 8.4.2 Das Verfahren nach Truxal-Guillemain – 8.4.3 Algebraisches Entwurfsverfahren	
<b>9 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 Relaisystemen	
9.5 Stabilitätstheorie nach Ljapunow . . . . .	60
9.5.1 Der Grundgedanke der direkten Methode von Ljapunow – 9.5.2 Stabilitätsätze 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 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 Kompressionsalgorithmen – 10.6.3 Kompressionsalgorithmus für endliche Einstellzeit	
<b>11 Zustandsraumdarstellung linearer Regelsysteme . . . . .</b>	<b>73</b>
11.1 Allgemeine Darstellung . . . . .	73
11.2 Normalformen für Eingrößensysteme . . . . .	74
11.3 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	75

<b>11.4 Synthese linearer Regelsysteme im Zustandsraum . . . . .</b>	<b>76</b>
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	
<b>12 Systemidentifikation . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>12.1 Deterministische Verfahren zur Systemidentifikation . . . . .</b>	<b>80</b>
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	
<b>12.2 Statistische Verfahren zur Systemidentifikation . . . . .</b>	<b>83</b>
12.2.1 Korrelationsanalyse – 12.2.2 Spektrale Leistungsdichte – 12.2.3 Statistische	
Bestimmung dynamischer Eigenschaften linearer Systeme – 12.2.4 Systemidentifikation	
mittels Parameterschätzverfahren	
<b>13 Weitere Reglerentwurfsverfahren . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>13.1 Übersicht . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>13.2 Einige weitere klassische Regelkreisstrukturen . . . . .</b>	<b>86</b>
13.2.1 Vermischte Regelkreise – 13.2.2 Smith-Prädiktor – 13.2.3 IMC-Regler	
<b>13.3 Robuste Regler . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>13.4 Modellbasierte prädiktive Regler . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>13.5 GMV-Regler . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>13.6 Adaptive Regler . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>13.7 Nichtlineare Regler . . . . .</b>	<b>91</b>
<b>13.8 „Intelligente“ Regler . . . . .</b>	<b>92</b>

## *Steuerungstechnik*

F. Ley

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