

Reinisch

Analyse und Synthese  
kontinuierlicher  
Steuerungssysteme

# Theoretische Grundlagen der automatischen Steuerung

Kybernetische Grundlagen  
und Beschreibung kontinuierlicher Systeme

Von Prof. Dr. sc. techn. K. Reinisch

Kontinuierliche Systeme

Arbeitsbuch: Aufgaben und Anwendungen

Von Doz. Dr.-Ing. J. Sponer

Analyse und Synthese  
kontinuierlicher Steuerungssysteme

Von Prof. Dr. sc. techn. K. Reinisch

Kontinuierliche Steuerungen

Arbeitsbuch: Aufgaben und Anwendungen

Von Doz. Dr.-Ing. J. Sponer

Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik

Von Prof. Dr. sc. techn. K. Göldner und Prof. Ing. St. Kubik DrSc.

**Reinisch Analyse und Synthese  
kontinuierlicher  
Steuerungssysteme**

TP271  
R3

8263753

# Analyse und Synthese kontinuierlicher Steuerungssysteme

Von Prof. Dr. sc. techn. Karl Reinisch

2., bearbeitete Auflage



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

667619

Für meine Frau,  
für Andrea, Bernhard und Bettina

© VEB Verlag Technik, Berlin, 1979

Bearbeitete Auflage: © VEB Verlag Technik, Berlin, 1982

Lizenz 201 · 370/68/82

DK 62-50 : 621.391 (075) · LSV 3044 · VT 3/5468-2

Lektor: *Jürgen Reichenbach*

Schutzumschlag: *Kurt Beckert*

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: Offizin Andersen Nexö, Graphischer Großbetrieb, Leipzig III/18/38

Bestellnummer: 553 1075

DDR 32,- M

## Vorwort

Aufbauend auf den im Grundlagenband (Kybernetische Grundlagen und Beschreibung kontinuierlicher Systeme) eingeführten Begriffen und Beschreibungsweisen werden in diesem Band die Analyse der Steuer- und Beobachtbarkeit und der Stabilität, die experimentelle und analytische Modellbildung und die Synthese der Regelungsalgorithmen für Ein- und Mehrgrößensysteme dargestellt. Die Synthese erfolgt durch Bemessungsverfahren auf Grund von Näherungsbeziehungen und durch Parameteroptimierung bei vorgegebener Reglerstruktur und schließt mit einer Einführung in die Systemoptimierung/Optimalsteuerung und dezentralen Regelungen. Das geschieht unter Beschränkung auf deterministische Verfahren und im Arbeitspunkt linearisierte Systeme. Die Nichtlinearität realer Systeme findet nur insoweit Beachtung, als das zur Absicherung der linearen Behandlungsweise notwendig ist. Nichtlineare, stochastische und diskontinuierliche Analyse- und Syntheseprobleme sind ebenso wie Methoden der Optimalsteuerung stationärer und dynamischer Prozesse einer späteren Darstellung vorbehalten.

Wie im Grundlagenband wird eine einheitliche Behandlung von sog. klassischen – vorzugsweise im Frequenzbereich formulierten – Methoden und den im Zeitbereich unter Einführung des Zustandes entwickelten Verfahren der modernen Steuerungstheorie erstrebt. Das ermöglicht eine exakte Begründung und Angabe der Anwendungsbedingungen für die klassischen Methoden (die in Büchern der klassischen Regelungstechnik meist fehlen), die Darlegung solcher klassischer Verfahren, die weiterhin Bedeutung besitzen (obwohl sie in Büchern der modernen Steuerungstheorie gewöhnlich übergangen werden) sowie die Einbeziehung moderner Verfahren der gezielten Polverschiebung und Optimalsteuerung, die auf der Zustandsbeobachtung und -rückführung basieren und durch die wachsenden technischen Möglichkeiten (Mikroprozessor-Regler) gegenwärtig an Bedeutung gewinnen.

Insgesamt wurden – neben einigen historisch wichtigen Entwicklungen – solche Verfahren ausgewählt, die ein vertieftes Verständnis von dynamischen (Steuerungs-) Prozessen gewähren, und solche, die nach Aufwand, Genauigkeit und Optimalitätsgrad für die verschiedenen Aufgabenklassen angemessen und besonders geeignet sind. Diese Aufgaben reichen vom einschleifigen Regelkreis bis zur Steuerung von Großsystemen.

Die Verfahrensauswahl wird durch die Möglichkeiten des rechnergestützten Entwurfs wesentlich mitbestimmt.

Obwohl dieses Buch von der Darstellungsart als Lehrbuch konzipiert ist, überschreitet es hinsichtlich des Stoffumfangs den Charakter eines Lehrbuches. Mit Unterstützung des Literaturnachweises soll es auch die Funktion eines Handbuches erfüllen, in dem Ingenieure und Wissenschaftler bei Modellbildungs- und Steuerungsproblemen nachschlagen und zumindest eine einführende Information erhalten können. Zur Er-

leichterung dieser mehrfachen Funktion wurden besondere Darstellungshilfen gegeben (s. Hinweise zum Studium).

Viele der vorgelegten Untersuchungen und Methoden werden nicht nur dem Techniker nützlich sein, sondern können auch dazu beitragen, das in aller Welt beobachtbare erfolgreiche Eindringen kybernetischer/steuerungstheoretischer Denkansätze und Methoden in fast alle Bereiche menschlicher – analysierender und einwirkender – Tätigkeit zu fördern.

Es darf somit erwartet werden, daß mit diesem Buch sowohl den Studierenden der Technischen Kybernetik und Automatisierungstechnik und der Systemanalyse ein ausgewogenes modernes Lehrbuch als auch den Ingenieuren und Wissenschaftlern, die mit Modellbildung und Steuerung von technischen und nichttechnischen, industriellen und nichtindustriellen Prozessen befaßt sind, ein nützliches Handbuch zur Verfügung steht.

Dieses Vorwort kann nicht ohne einen Dank an alle früheren und jetzigen Kollegen und Mitarbeiter in Dresden und Ilmenau beendet werden, die durch Gemeinsamkeit in Lehre und Forschung über viele Jahre zur Reifung der vorliegenden Konzeption und Darlegungen beigetragen haben. Namentlich möchte ich denjenigen danken, die durch Durchsicht einzelner Abschnitte und wertvolle Hinweise mir geholfen haben. Das gilt in besonderem Maße für Prof. Dr. sc. techn. *U. Korn*, für Frau Dr.-Ing. *B. Spietschka*, für Doz. Dr.-Ing. *J. Sponer*, für Doz. Dr. sc. techn. *J. Wernstedt* sowie für das Gutachten von Prof. Dr. sc. techn. *H. Strobel*, für Dr.-Ing. *M. Radtke*, Dr.-Ing. *H. Puta* und Dr.-Ing. *J. Lunze*. Ohne die mit hohem persönlichem Einsatz und Können geleistete Hilfe von Frau *G. Puta* bei der Fertigstellung des Manuskriptes und die konstruktive Zusammenarbeit mit dem Lektor Dipl.-Ing. *J. Reichenbach* sowie dem VEB Verlag Technik würde dieses Buch kaum heute so vorliegen.

Ilmenau

*Karl Reinisch*

## Vorwort zur 2. Auflage

Das Erscheinen der 2. Auflage gibt die Möglichkeit, einige Ergänzungen anzubringen. Diese betreffen insbesondere die Stabilisier- und Erkennbarkeit und neuere Ergebnisse zur synthetischen Störaufschaltung und Störunterdrückung bei Mehrgrößenregelungen sowie einen Überblick über Verfahren zum Entwurf dezentraler Regelungen.

Ilmenau

*K. Reinisch*

# Hinweise zum Studium dieses Buches



Um dem besonderen Charakter dieses Buches als *Lehrbuch* und auch als *Handbuch* und den unterschiedlichen Voraussetzungen und Zielen der zu erwartenden Lesergruppen Rechnung zu tragen, werden einige Hilfen gegeben:

Für die *Lehre* sind ein Lehrbuch, ein Wissensspeicher und ein Arbeits- (Übungs-) Buch erstrebenswert. Der vorliegende Band vereinigt Lehrbuch und Wissensspeicher. Wichtige Definitionen und Aussagen sowie Zusammenfassungen wichtiger Ergebnisse wurden durch Linien hervorgehoben. Sie bilden einen von Beweisführungen und Erläuterungen befreiten komprimierten Wissensspeicher. Wie schon für den Grundlagenband (*Sponer*: Kontinuierliche Systeme), so wird auch für den vorliegenden Band ein Arbeitsbuch vorbereitet, das zur Verdeutlichung, Festigung und Vertiefung des Lehrbuchstoffes eine Vielzahl von Beispielen bringt (*Sponer*: Kontinuierliche Steuerungen). Für Verweise wurden Definitionen (D) sowie Sätze und Zusammenfassungen (S) durchnummeriert. Beispiele und ergänzende Ausführungen sowie Methoden, die bei einem ersten Eindringen in den Stoff übergangen werden können, wurden im Kleindruck gebracht. Das soll dem Lernenden helfen, den roten Faden zu erkennen und zu behalten. Hierzu dienen auch immer wieder eingefügte Übersichten.

Um auch als *Handbuch* für Fragen der Modellbildung, Stabilitätsanalyse und Regelungssynthese dienen zu können, wurden in das Buch Verfahren aufgenommen, mit denen Ingenieure und Wissenschaftler heute in Praxis und Literatur konfrontiert werden, obwohl sie in einem einführenden Lehrbuch übergangen werden könnten. Mit gleicher Zielsetzung wurden neben dem Quellennachweis für die vorgestellten Verfahren und der Angabe von Arbeiten, die die vorliegenden Ausführungen beeinflusst haben, auch weiterführende und ergänzende Aufsätze und Bücher zitiert. Wegen der notwendigen Umfangsbeschränkung mußte eine enge Auswahl getroffen werden, wobei bei umfangreicheren Werken Ausgaben in deutscher Sprache bevorzugt wurden.

Dieses Buch knüpft direkt an den vom Autor verfaßten Grundlagenband „Kybernetische Grundlagen und Beschreibung kontinuierlicher Systeme“ der Lehrbuchreihe an. Das macht häufige Verweisungen auf Sätze und Gleichungen dieses Bandes notwendig oder wünschenswert. Sie sind von Gleichungen usw. des vorliegenden Bandes durch ein angehängtes A unterschieden, z. B. Gl. (8.20-A); S 5.2-A; Abschn. 4.1.4.-A.

Die klassische Behandlung im Frequenzbereich (insbesondere Frequenzkennlinien- und Pol-Nullstellen-Verfahren) findet der Leser insbesondere in den Abschnitten 3., 5., 7., 8.1 und 8.2., die moderne Behandlung im Zeitbereich unter Einbeziehung des Zustandes in den Abschnitten 1., 2. und 8.3. Die in diesem Buch vorgenommene Vereinigung beider Verfahrensgruppen ermöglicht gerade eine den verschiedenen theoretischen Problemen und konkreten Anwendungsbedingungen angemessene, besonders günstige Behandlungsweise.



# Inhaltsverzeichnis

<b>0. Einführung</b> .....	19
0.1. Zielstellung: Analyse, Identifikation und Synthese von Steuerungssystemen .....	19
0.2. Zusammenstellung wichtiger Beziehungen .....	20
0.3. Symbole für Aussageverknüpfungen .....	22

## Teil I

### Analyse kontinuierlicher Systeme

<b>1. Steuer- und Beobachtbarkeit</b> .....	25
1.1. Definition der Steuer- und Beobachtbarkeit .....	25
1.2. Bedingungen für vollständige Steuerbarkeit bei kanonischer Systembeschreibung .....	25
1.3. Kriterium für vollständige Steuerbarkeit auf Grund der allgemeinen Zustandsgleichung .....	27
1.4. Bedingungen für vollständige Beobachtbarkeit bei kanonischer Systembeschreibung .....	29
1.5. Kriterium für vollständige Beobachtbarkeit auf Grund der allgemeinen Ausgangsgleichung .....	30
1.6. Beispiel zur Steuer- und Beobachtbarkeit .....	30
1.6.1. Prüfung der Steuerbarkeit .....	31
1.6.2. Prüfung der Beobachtbarkeit .....	31
1.6.3. Zusammenhang mit Übertragungsfunktion .....	32
1.7. Zusammenhang mit Übertragungsfunktion .....	32
1.8. Klassifizierung, Stabilisierbarkeit und Erkennbarkeit .....	33
1.9. Steuer- und Beobachtbarkeit von Systemen mit Rückführung .....	36
<b>2. Stabilität: Definition und Bedingungen</b> .....	37
2.1. Problemformulierung .....	37
2.1.1. Zustands- und Ausgangsstabilität .....	37
2.1.2. Gleichgewichtspunkte .....	37
2.1.3. Stabilität des ungestörten und des gestörten Systems .....	38
2.2. Stabilitätsdefinition für ungestörte Systeme nach Ljapunow .....	39
2.2.1. Norm des Zustandsvektors und Umgebung des Gleichgewichtszustands .....	39
2.2.2. Stabilitätsdefinition im Sinne von Ljapunow .....	39
2.2.3. Stabilitätsbereich, lokale und globale asymptotische Stabilität .....	40
2.2.4. Beispiele zur Klassifizierung von Gleichgewichtszuständen .....	41
2.3. Stabilitätsbedingung für lineare ungestörte Systeme (Stabilität der freien Bewegung) .....	42
2.3.1. Allgemeine Bedingung für Zustandsbeschränkung .....	42
2.3.2. Allgemeine Stabilitätsbedingung .....	43



2.3.3.	Allgemeine Bedingung für asymptotische Stabilität .....	44
2.3.4.	Stabilitätsbedingung und Eigenwerte .....	45
2.4.	Stabilitätsdefinition und -bedingungen bei linearen gestörten Systemen (Stabilität der erzwungenen Bewegung) .....	47
2.4.1.	Stabilitätsdefinition für gestörte Systeme .....	47
2.4.2.	Allgemeine Stabilitätsbedingung für lineare gestörte zeitinvariante Systeme .....	48
2.4.3.	Stabilität der erzwungenen Bewegung und Eigenwerte .....	49
2.5.	Zur Stabilitätsprüfung anhand der Übertragungsfunktion .....	49
2.5.1.	Voraussetzung für Prüfung der Zustandsstabilität anhand der Übertragungsfunktion .....	49
2.5.2.	Charakteristische Gleichung bei Regelkreisen und anderen Rückführschaltungen .....	50
<b>3.</b>	<b>Stabilitätsanalyse linearisierter Systeme .....</b>	<b>52</b>
3.1.	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms .....	53
3.1.1.	Notwendige Stabilitätsbedingung anhand der Polynomkoeffizienten .....	53
3.1.2.	Notwendige und hinreichende Stabilitätsbedingung anhand der Polynomkoeffizienten: Hurwitz-Kriterium .....	54
3.1.3.	Stabilitätsprüfung bei Totzeitsystemen mittels Padé-Approximation .....	55
3.1.4.	Notwendige und hinreichende Bedingung anhand der Polynomkoeffizienten: Routh-Kriterium .....	57
3.1.5.	Stabilitätsprüfung anhand der Ortskurve des charakteristischen Polynoms: Kriterium von Michailow-Leonhard .....	58
3.1.6.	Ermittlung von Stabilitätsbereichen: Methode der D-Zerlegung .....	59
3.2.	Analyse anhand des PN-Bildes: Wurzelortverfahren .....	61
3.2.1.	Definition des Wurzelorts .....	61
3.2.2.	Grundregel zur grafischen Konstruktion der Wurzelortkurven .....	63
3.2.3.	Asymptotisches Verhalten der Wurzelortkurven .....	64
3.2.4.	Weitere Regeln zur Konstruktion der Wurzelortkurven .....	66
3.2.5.	Ermittlung des Verstärkerparameters an der Stabilitätsgrenze und für andere Punkte der Wurzelortkurve .....	68
3.2.6.	Allgemeine Einschätzung des Wurzelortverfahrens .....	70
3.3.	Stabilitätsprüfung anhand des Frequenzgangs der offenen Kette .....	71
3.3.1.	Schließungsbedingung beim Regelkreis, Selbsterregungsbedingung nach Barkhausen .....	71
3.3.2.	Ortskurven-Umlauf-Kriterium (Nyquist-Kriterium) .....	72
3.3.2.1.	Satz von den Polen und Nullstellen einer Funktion .....	72
3.3.2.2.	Umlaufkriterium (Nyquist) .....	73
3.3.2.3.	Ortskurvenverlauf bei Polen von $G_0$ auf der imaginären Achse .....	75
3.3.2.4.	Konforme Abbildung eines Streifens der $p$ -Ebene, Linke-Hand-Regel .....	76
3.3.2.5.	Beispiel zur vereinfachten Anwendung des Nyquist-Kriteriums .....	77
3.3.3.	Phasenrand-Stabilitätskriterium .....	78
3.3.3.1.	Phasenrandkriterium für Ortskurvendarstellung .....	78
3.3.3.2.	Anwendung des Phasenrandkriteriums auf Systeme mit Bandpaßcharakter .....	79
3.3.3.3.	Phasenrandkriterium bei Frequenzkennliniendarstellung .....	80
3.3.4.	Übergänge-Stabilitätskriterium .....	81
3.3.4.1.	Übergängekriterium für Ortskurvendarstellung .....	81
3.3.4.2.	Übergängekriterium im Frequenzkennliniendiagramm .....	82
3.3.5.	Modifiziertes Phasenrandkriterium für Totzeitsysteme .....	82
3.3.5.1.	Stabilitätsprüfung von Totzeitsystemen mittels Ortskurve .....	82
3.3.5.2.	Stabilitätsprüfung von Totzeitsystemen im Frequenzkennliniendiagramm .....	84

3.3.5.3. Beispiel zur Anwendung des Phasenrandkriteriums .....	85
3.3.6. Stabilitätsprüfung mehrschleifiger Systeme mittels Frequenzgang .....	85
3.3.6.1. Problematik der Stabilitätsprüfung mehrschleifiger Systeme .....	85
3.3.6.2. Verallgemeinertes Umlaufkriterium bei Schließung mehrschleifiger Systeme .....	86
3.3.6.3. Verallgemeinertes Übergängekriterium zur Stabilitätsprüfung mehrschleifiger Systeme im Bode-Diagramm .....	87
3.4. Stabilitätsanalyse anhand grob approximierter Übergangsfunktionen der offenen Kette .....	88
<b>4. Zur Stabilitätsanalyse nichtlinearer Systeme, Linearisierung .....</b>	<b>90</b>
4.1. Zur Notwendigkeit der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten bei der Stabilitätsprüfung .....	90
4.2. Lokale Stabilitätsprüfung mittels Linearisierung: Methode der ersten Näherung von Ljapunow .....	91
4.2.1. Linearisierung der Zustandsgleichungen im Arbeitspunkt .....	91
4.2.2. Kriterien der Methode der ersten Näherung .....	93
4.3. Nachweis von Stabilitätsbereichen mit der direkten Methode von Ljapunow .....	93
4.3.1. Physikalische Begründung .....	93
4.3.2. Definite und semidefinite Funktionen, Ljapunow-Funktion .....	95
4.3.3. Kriterien der direkten Methode von Ljapunow .....	97
4.3.4. Zur Aufstellung von Ljapunow-Funktionen, Beispiel .....	98
4.4. Prüfung der absoluten Stabilität: Kriterium von V. M. Popow .....	100
4.4.1. Nichtlinearer Standardregelkreis; Definition der absoluten Stabilität .....	100
4.4.2. Kriterium der absoluten Stabilität nach V. M. Popow; analytische Form .....	101
4.4.3. Grafische Form des Popow-Kriteriums .....	103
4.4.4. Vergleich mit Nyquist-Kriterium, Aisermansche Vermutung .....	105

## Teil II

### Identifikation/Modellbildung kontinuierlicher Prozesse

<b>5. Experimentelle Identifikation kontinuierlicher Systeme .....</b>	<b>109</b>
5.1. Ziele der Identifikation und Lösungswege .....	109
5.1.1. Signal- und Systemidentifikation, Modellbildung und Parameteridentifikation .....	109
5.1.2. Theoretische (analytische) und experimentelle Identifikation .....	110
5.1.3. Direkte und adaptive/indirekte Identifikationsmethoden .....	113
5.1.4. Lösungswege und -schritte der experimentellen Identifikation .....	114
5.1.5. Programmübersicht .....	117
5.2. Direkte Identifikation mit aperiodischen Testsignalen .....	118
5.2.1. Auswahl der Testsignale und Modellansätze .....	118
5.2.1.1. Wahl von Sprung- oder Impulsfunktion im Hinblick auf die Identifikation des dynamischen Verhaltens .....	118
5.2.1.2. Wahl des Testsignals hinsichtlich der Bestimmung der Übertragungsfaktoren (des stationären Verhaltens) .....	119
5.2.1.3. Modellansatz hinsichtlich des stationären Verhaltens (P-, I-, D-Glieder); Rückführung der Identifikation von I- und D-Gliedern auf die von P-Gliedern .....	120
5.2.1.4. Modellansatz bezüglich des dynamischen Verhaltens (Trägheits- und Vorhaltglieder) .....	122

5.2.2.	Auswertung von Übergangsfunktionen anhand charakteristischer Funktionswerte mit speziellen Approximationsansätzen .....	123
5.2.2.1.	Ermittlung des Übertragungsfaktors von P-Gliedern .....	123
5.2.2.2.	Identifikation von $T_1$ -, $T_1-T_{D1}$ - und D- $T_1$ -Gliedern .....	123
5.2.2.3.	Identifikation von $T_2$ -Gliedern .....	125
5.2.2.4.	Identifikation von $T_n$ - und $T_n-T_i$ -Gliedern mit $n > 2$ .....	126
5.2.2.5.	Zur Identifikation weiterer Klassen von P-Gliedern .....	130
5.2.2.6.	Identifikation von $I_1-T_n-T_i$ -Gliedern mittels Übergangsfunktion .....	130
5.2.3.	Auswertung von Übergangsfunktionen durch Integration und Approximation mit rationalen Übertragungsfunktionen .....	131
5.2.3.1.	Ermittlung der Summenzeitkonstante .....	132
5.2.3.2.	Ermittlung der Polynomkoeffizienten der Übertragungsfunktion durch Mehrfachintegration der Übergangsfunktion .....	133
5.2.3.3.	Momentenmethode .....	133
5.2.4.	Auswertung von Antwortfunktionen auf Rechteck- und Dreieckimpulse und Schrittsignale .....	134
5.2.4.1.	Konstruktion der Übergangsfunktion aus gemessenen Impuls- und Schritt-signalantworten .....	134
5.2.4.2.	Direkte Auswertung von Gewichtsfunktionen und Impulsantworten anhand charakteristischer Funktionswerte .....	135
5.2.4.3.	Auswertung von Impulsantworten anhand grafisch tabellierter Funktionsverläufe .....	137
5.2.5.	Ermittlung der Gewichtsfunktion aus allgemeinen Ein- und Ausgangssignalen .....	138
5.2.5.1.	Ermittlung diskreter Werte der Gewichtsfunktion mittels Entfaltung .....	138
5.2.5.2.	Ermittlung diskreter Werte der Gewichtsfunktion mittels Ausgleichsverfahren (Methode des kleinsten mittleren quadratischen Fehlers) .....	139
5.2.5.3.	Gewinnung eines analytischen Modells der Gewichtsfunktion mittels Interpolations- und Ausgleichsmethode .....	140
5.2.6.	Ermittlung diskreter Frequenzgangwerte durch Transformation von (zeitdiskreten) Übergangsfunktionen und Impulsantworten .....	141
5.2.6.1.	Laplace-Transformation approximierter Antwortfunktionen mit asymptotisch zeitlinearem Verhalten .....	142
5.2.6.2.	Ermittlung von Frequenzgangwerten aus einer Übergangsfunktion .....	143
5.2.6.3.	Ermittlung von Frequenzgangwerten aus Impulsantworten bei größeren Impulsbreiten .....	143
5.2.6.4.	Ermittlung von Frequenzgangwerten aus Gewichtsfunktionen .....	144
5.3.	Direkte Identifikation mit periodischen Testsignalen .....	144
5.3.1.	Frequenzgangmessung mit Sinussignalen .....	145
5.3.1.1.	Synchronaufzeichnungsverfahren .....	145
5.3.1.2.	Kompensationsverfahren .....	146
5.3.1.3.	Abtastverfahren .....	146
5.3.1.4.	Komponentenverfahren (Korrelationsverfahren) .....	147
5.3.1.5.	Vergleichende Bemerkungen .....	148
5.3.2.	Frequenzgangmessung mit Rechteckwellen .....	148
5.3.2.1.	Aufzeichnungsverfahren mit Rechteck- und Dreieckwellen .....	148
5.3.2.2.	Komponentenverfahren mit Rechteck- und Dreieckwellen .....	150
5.3.3.	Kombinierte Meßverfahren und Maßnahmen bei Störungen .....	151
5.3.3.1.	Kombination aperiodischer Testsignale und Genauigkeitsverbesserung durch Mittelwertbildung .....	151
5.3.3.2.	Kombination aperiodischer und periodischer Testsignale und Maßnahmen bei Strecken mit Unzulässigkeit bleibender Störungen .....	152

5.3.4.	Grafische Ermittlung von Übertragungsfunktionen durch Auswertung von Frequenzkennlinien .....	153
5.3.4.1.	Beziehungen zwischen Amplituden- und Phasengang, Phasenminimumsysteme .....	153
5.3.4.2.	Grafische Approximation von Amplituden- und Phasenkennlinien durch rationale Übertragungsfunktionen zuzüglich Totzeit .....	155
5.3.5.	Analytische Approximation von Frequenzgängen .....	157
5.3.5.1.	Wahl des strukturellen Ansatzes anhand der Ortskurve .....	158
5.3.5.2.	Approximation eines Frequenzgangs durch die Übertragungsfunktion eines $P-T_n$ - bzw. $I_T-T_n$ -Gliedes mittels Interpolation .....	160
5.3.5.3.	Approximation eines Frequenzgangs durch rationale Übertragungsfunktionen mit Polen und Nullstellen mit Interpolationsmethode .....	162
5.3.5.4.	Approximation von Frequenzgängen durch rationale Übertragungsfunktionen im quadratischen Mittel mit Fehlerausgleich .....	164
5.4.	Adaptive Identifikationsverfahren (Modellmethoden) .....	165
5.4.1.	Modellmethode mit parallelem Zeitkonstantenmodell und Handabgleich ..	166
5.4.1.1.	Auswerteanordnung und Verfahren der sukzessiven Polkompensation ...	166
5.4.1.2.	Paralleles Zeitkonstantenmodell, Ermittlung des Übertragungsfaktors und der Summenzeitkonstante .....	167
5.4.1.3.	Identifikation der Trägheits- und Vorhaltzeitkonstanten von P-Gliedern ...	169
5.4.1.4.	Identifikation rationaler I-Glieder .....	171
5.4.2.	Verbesserung der Identifikation durch zusätzliche Modellkorrektur auf Grund des Vergleichs der gegengekoppelten Kreise .....	172
5.4.3.	Automatischer Abgleich eines parallelen Polynommodells .....	174
5.4.4.	Identifikation mittels paralleler orthogonaler Filter und mit verallgemeinertem Modell .....	176
5.4.5.	Automatische Identifikation mit in Kette geschaltetem Polynommodell ...	178
5.4.6.	Zur Identifikation von Regelstrecken im geschlossenen Kreis .....	179
5.4.7.	Zur Identifikation nichtlinearer Regelstrecken .....	180
<b>6.</b>	<b>Zur analytischen Modellbildung (Systemanalyse) .....</b>	<b>182</b>
6.1.	Schritte zur analytischen Lösung des Identifikationsproblems .....	182
6.2.	Zerlegung in Teilprozesse und Bilanzräume .....	184
6.3.	Aufstellung von Bilanzgleichungen für die Bilanzräume und von Verknüpfungsbeziehungen anhand von Beispielen .....	186
6.3.1.	Allgemeine Form der Bilanzgleichungen .....	186
6.3.2.	Beispiel eines Stoffprozesses .....	187
6.3.3.	Beispiel eines Prozesses mit stofflichen und energetischen Veränderungen	189
6.4.	Allgemeines Schema der Modellsynthese mittels Konstruktion eines Signalfußgraphen .....	192
6.5.	Modellvereinfachung und Reduktion des Zustandsgraphen zum Übertragungsgraphen .....	194
6.5.1.	Modellvereinfachung und Transformation in Bildbereich .....	194
6.5.2.	Umformungsregeln für Signalfußgraphen .....	195
6.5.3.	Beispiel zur Reduktion von Signalfußgraphen .....	195
6.5.4.	Lösungsweg zur schrittweisen Reduktion von Signalfußgraphen .....	197
6.6.	Unmittelbare Ermittlung von Eingangs-Ausgangs-Beziehungen aus dem Zustandsgraphen .....	198
6.6.1.	Einige graphentheoretische Begriffe .....	198
6.6.2.	Unmittelbare Bestimmung der Übertragungsfunktion zwischen zwei Knoten nach der Formel von Mason .....	199

**Teil III****Synthese linearisierter kontinuierlicher Regelungssysteme**

<b>7. Bemessung einschleifiger Regelkreise mit Ausgangsrückführung</b> .....	203
7.1. Problemformulierung und Charakterisierung der Verfahren .....	203
7.1.1. Problematik der Anwendung technologischer und ökonomischer Kriterien	203
7.1.2. Statische und dynamische Gütekriterien .....	204
7.1.3. Bemessungsverfahren, Parameter- und Systemoptimierung .....	206
7.1.4. Charakterisierung und Klassifizierung von Handverfahren zur Parameterbemessung .....	209
7.1.5. Untersucher Standardregelkreis und allgemeiner Weg zur Aufstellung von Bemessungsregeln .....	210
7.2. Reglerbemessung an unbekannter und grob bekannter Strecke .....	212
7.2.1. Experimentelle Bemessung von Reglern an unbekannter Strecke: Einfahrstrategien .....	212
7.2.1.1. Lösungsweg .....	212
7.2.1.2. Einstellregeln von Ziegler und Nichols .....	212
7.2.1.3. Einstellregeln von Janssen und Offereins .....	213
7.2.1.4. Einschätzung der experimentellen Einstellverfahren .....	214
7.2.2. Reglerbemessung auf Grund grob approximierter Streckenübergangsfunktionen .....	214
7.3. Bemessung von Regelkreisen und Rückführungen anhand der Frequenzkennlinien der offenen Kette bzw. Strecke .....	215
7.3.1. Näherungsbeziehungen zwischen Frequenzkennlinien der offenen Kette und Zeitverhalten des geschlossenen Kreises .....	215
7.3.1.1. Bereiche der Frequenzkennlinien, die für das stationäre bzw. das Übergangsverhalten maßgebend sind .....	216
7.3.1.2. Gütekenngrößen des für das stationäre Verhalten maßgebenden tiefrequenten Bereichs I .....	217
7.3.1.3. Gütekenngrößen des für das Übergangsverhalten maßgebenden mittelfrequenten Bereichs II .....	221
7.3.1.4. Möglichkeiten der Gütebeurteilung nur anhand der Amplitudenkennlinie	227
7.3.2. Prinzipien der Güteverbesserung von Regelkreisen und Rückführschaltungen .....	230
7.3.2.1. Regeln zur Verbesserung des stationären Verhaltens .....	231
7.3.2.2. Regeln zur Verbesserung des Übergangsverhaltens .....	232
7.3.2.3. Gleichzeitige Verbesserung von stationärem und Übergangsverhalten, Auswirkung von Verstärkungsänderungen .....	234
7.3.3. Bemessung in Kette geschalteter Korrekturglieder anhand der Amplitudenkennlinien .....	236
7.3.3.1. Grundtypen einfacher Korrekturglieder (RC-Glieder) .....	236
7.3.3.2. Wahl und Bemessung von RC-Korrekturgliedern, Beispiele .....	238
7.3.3.3. Allgemeines Bemessungsverfahren für Kettenkorrekturglieder .....	239
7.3.4. Reglerbemessung anhand der Frequenzkennlinien unter Verwendung des Phasenrands .....	242
7.3.4.1. Frequenzkennlinien idealer und realer linearer Regler .....	243
7.3.4.2. Reglerbemessung mittels Phasenrands .....	245
7.3.5. Güteverbesserung durch interne Rückführung in der offenen Kette und deren Bemessung .....	248
7.3.5.1. Verringerung der Trägheiten von Trägheitsgliedern mittels starrer Rückführung .....	249

7.3.5.2. Synthese einer internen Rückführung zur Erzielung einer gewünschten Übertragungsfunktion der offenen Kette .....	250
7.3.5.3. Programmablauf und Beispiel zur Bemessung einer Rückführung .....	251
7.3.5.4. Grundtypen einfacher Rückführglieder .....	252
7.3.5.5. Vergleich mit Kettenkorrektur und Zusammenfassung .....	254
7.3.6. Direkt im Frequenzbereich formulierte Gütekriterien und Bemessungsvorschriften .....	254
7.3.6.1. Bemessung anhand Amplituden- und Phasenrand .....	255
7.3.6.2. Bemessung anhand des Störfrequenzgangs, dynamischer Regelfaktor ....	255
7.3.6.3. Gütekriterien des Führungsfrequenzgangs, Nichols-Diagramm .....	257
7.3.6.4. Ergänzende Bemerkungen .....	258
7.4. Reglerbemessung für vorgegebenes Zeitverhalten anhand der Übertragungsfunktion der Strecke .....	258
7.4.1. Problemstellung und Lösungsweg .....	258
7.4.1.1. Zielstellung .....	258
7.4.1.2. Voraussetzungen .....	259
7.4.1.3. Lösungsweg .....	260
7.4.2. Bemessung von Reglern mit I-Anteil an P- $T_n$ -Strecken mit $n \leq 3$ und resultierender $I_1$ - $T_1$ -Kette .....	261
7.4.2.1. Wahl des Reglers und Bemessung der Vorhaltzeiten zur Erzielung einer resultierenden $I_1$ - $T_1$ -Kette .....	261
7.4.2.2. Bemessung der resultierenden $I_1$ - $T_1$ -Kette für gewünschte Überschwingweite, Einstellfaktor .....	263
7.4.2.3. Ermittlung von Überschwing- und Beruhigungszeit einer $I_1$ - $T_1$ -Kette, Zusammenfassung .....	265
7.4.3. Bemessung von Reglern mit I-Anteil an P- $T_n$ -Strecken höherer Ordnung anhand des Zeitkonstantenmodells, insbesondere für niedrigere Überschwingweiten .....	266
7.4.3.1. Bemessung der Reglervorhalte und Approximation der resultierenden Ketten durch $I_1$ - $T_1$ -Ketten .....	266
7.4.3.2. Bemessung der durch Approximation erhaltenen $I_1$ - $T_1$ -Ketten für kleine gewünschte Überschwingweiten .....	267
7.4.3.3. Bemessung von $I_1$ - $T_n$ -Ketten für größere Überschwingweiten anhand des Zeitkonstantenmodells .....	268
7.4.3.4. Angenäherte Bestimmung der Überschwing- und Beruhigungszeiten, Zusammenfassung .....	269
7.4.4. Bemessung von Reglern mit I-Anteil an P- $T_n$ - $T_{Dm}$ - $T_I$ -Strecken anhand des Polynommodells .....	270
7.4.4.1. Bemessung der Reglervorhalte und Approximation der resultierenden Ketten durch $I_1$ - $T_2$ -Ketten .....	270
7.4.4.2. Bemessung der durch Approximation erhaltenen $I_1$ - $T_2$ -Kette, Polynommodell .....	271
7.4.4.3. Näherungsbeziehungen für Überschwing- und Beruhigungszeit, Zusammenfassung .....	273
7.4.5. Bemessung von P- und PD-Reglern an P-Strecken für Kreisverstärkungen $V_0 > 20$ .....	274
7.4.5.1. Bedingungen für die dynamische Äquivalenz einer P- und einer I-Kette ....	274
7.4.5.2. Bemessungsvorschrift für P- und PD-Regler .....	275
7.4.6. Schätzung der maximalen Regelabweichung und Überschwingweite bei verzögerten Störungen .....	277
7.4.7. Bemessung von P- und PD-Reglern an I-Strecken .....	279

7.4.8.	Zusammenfassende Anleitung zur Anwendung des Bemessungsverfahrens; Anwendungsbeispiel .....	279
7.4.9.	Bemessung von P-Reglern an P-Strecken mit Kreisverstärkungen $V_0 < 10$	283
7.4.10.	Andere Bemessungsverfahren anhand der Übertragungsfunktion bzw. des Frequenzgangs .....	284
7.4.10.1.	Betragskriterium (Betragsoptimum) .....	284
7.4.10.2.	Symmetriekriterium (symmetrisches Optimum) .....	285
7.4.10.3.	Praktisches Kriterium (praktisches Optimum) .....	286
7.5.	Synthese von Regelkreisen anhand des Pol-Nullstellen-Bildes .....	286
7.5.1.	Zielstellung und Lösungsweg .....	286
7.5.2.	PN-Verteilungen der offenen Kette und des geschlossenen Kreises .....	287
7.5.2.1.	PN-Verteilung der offenen Kette .....	287
7.5.2.2.	PN-Verteilungen des geschlossenen Kreises .....	287
7.5.2.3.	Ermittlung der PN-Verteilung der offenen Kette aus der des geschlossenen Kreises .....	289
7.5.3.	Charakteristische PN-Verteilungen des geschlossenen Kreises und Zusammenhang mit Gütekenngößen des Zeit- und Frequenzbereichs .....	289
7.5.3.1.	Charakteristische PN-Verteilung der Führungsübertragungsfunktion .....	289
7.5.3.2.	Einfluß des dominierenden Polpaars auf dynamische Kenngrößen des Zeitbereichs .....	290
7.5.3.3.	Einfluß eines dominierenden Polpaars mit zusätzlichem reellem Pol und reeller Nullstelle auf die dynamischen Kenngrößen .....	291
7.5.3.4.	Einfluß der PN-Verteilung auf Kenngrößen für das stationäre Zeitverhalten, verallgemeinerte Fehlerkonstanten .....	293
7.5.3.5.	Einfluß der PN-Verteilung auf den Frequenzgang .....	294
7.5.3.6.	Bestimmung des PN-Bildes des geschlossenen Kreises aus den Güteforderungen .....	295
7.5.4.	Strukturauswahl und Bemessung von Reglern und Korrekturgliedern mit Hilfe von Wurzelortskurven .....	296
7.5.4.1.	Prinzip des Verfahrens; PN-Bilder linearer Regler und Korrekturglieder ..	296
7.5.4.2.	Auswahl- und Bemessungsrichtlinien für wichtige Typen von Reglern und Korrekturgliedern .....	297
7.5.5.	Syntheseverfahren mittels PN-Verteilung für halbfreie Struktur der Korrekturglieder, insbesondere Folgeregelungen .....	299
7.5.5.1.	Prinzip des Verfahrens .....	299
7.5.5.2.	Erläuterung des Syntheseverfahrens an einem Beispiel .....	300
7.6.	Zur Synthese von Regelkreisen mit Integralkriterien, Parameteroptimierung .....	301
7.6.1.	Minimierung der linearen Regelfläche .....	302
7.6.2.	Minimierung der quadratischen Regelfläche .....	304
7.6.3.	Minimierung der verallgemeinerten quadratischen Regelfläche .....	305
7.6.4.	Weitere Integralkriterien .....	306
7.7.	Empfindlichkeitsanalyse und Entwurf unempfindlicher Regelungssysteme .....	307
7.7.1.	Problemstellung .....	307
7.7.2.	Analyse der Empfindlichkeit von Regelungsvorgängen gegenüber Parameteränderungen, Empfindlichkeitsfunktionen .....	308
7.7.2.1.	Zur Symbolik der Empfindlichkeitsfunktionen .....	308
7.7.2.2.	Empfindlichkeitsanalyse der Zustands- und Ausgangssignale im Zeitbereich	308
7.7.2.3.	Empfindlichkeit der Überschwingweite gegenüber Parameteränderungen ...	310
7.7.2.4.	Empfindlichkeitsfunktionen des Frequenzbereichs .....	312
7.7.2.5.	Empfindlichkeitsfunktionen bei PN-Darstellung .....	313
7.7.3.	Zum Entwurf unempfindlicher Regelungssysteme .....	314
7.7.3.1.	Regelkreisstruktur für Entwurf parameterunempfindlicher Systeme .....	314