

H. Unbehauen · F. Ley

Das
Ingenieurwissen
Regelungs-
und Steuerungs-
technik

 Springer Vieweg

Ingenieurwissen

Das Ingenieurwissen: Regelungs- und Steuerungstechnik

Heinz Unbehauen • Frank Ley

Das Ingenieurwissen: Regelungs- und Steuerungstechnik

Heinz Unbehauen
Ruhr-Universität Bochum
Bochum, Deutschland

Frank Ley
Fachhochschule Dortmund
Dortmund, Deutschland

ISBN 978-3-662-44025-4
DOI 10.1007/978-3-662-44026-1

ISBN 978-3-662-44026-1 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

Das vorliegende Buch ist Teil des ursprünglich erschienenen Werks „HÜTTE – Das Ingenieurwissen“, 34. Auflage.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die HÜTTE Das Ingenieurwissen ist ein Kompendium und Nachschlagewerk für unterschiedliche Aufgabenstellungen und Verwendungen. Sie enthält in einem Band mit 17 Kapiteln alle Grundlagen des Ingenieurwissens:

- Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen
- Technologische Grundlagen
- Grundlagen für Produkte und Dienstleistungen
- Ökonomisch-rechtliche Grundlagen

Je nach ihrer Spezialisierung benötigen Ingenieure im Studium und für ihre beruflichen Aufgaben nicht alle Fachgebiete zur gleichen Zeit und in gleicher Tiefe. Beispielsweise werden Studierende der Eingangsemester, Wirtschaftsingenieure oder Mechatroniker in einer jeweils eigenen Auswahl von Kapiteln nachschlagen. Die elektronische Version der Hütte lässt das Herunterladen einzelner Kapitel bereits seit einiger Zeit zu und es wird davon in beträchtlichem Umfang Gebrauch gemacht.

Als Herausgeber begrüßen wir die Initiative des Verlages, nunmehr Einzelkapitel in Buchform anzubieten und so auf den Bedarf einzugehen. Das klassische Angebot der Gesamt-Hütte wird davon nicht betroffen sein und weiterhin bestehen bleiben. Wir wünschen uns, dass die Einzelbände als individuell wählbare Bestandteile des Ingenieurwissens ein eigenständiges, nützliches Angebot werden.

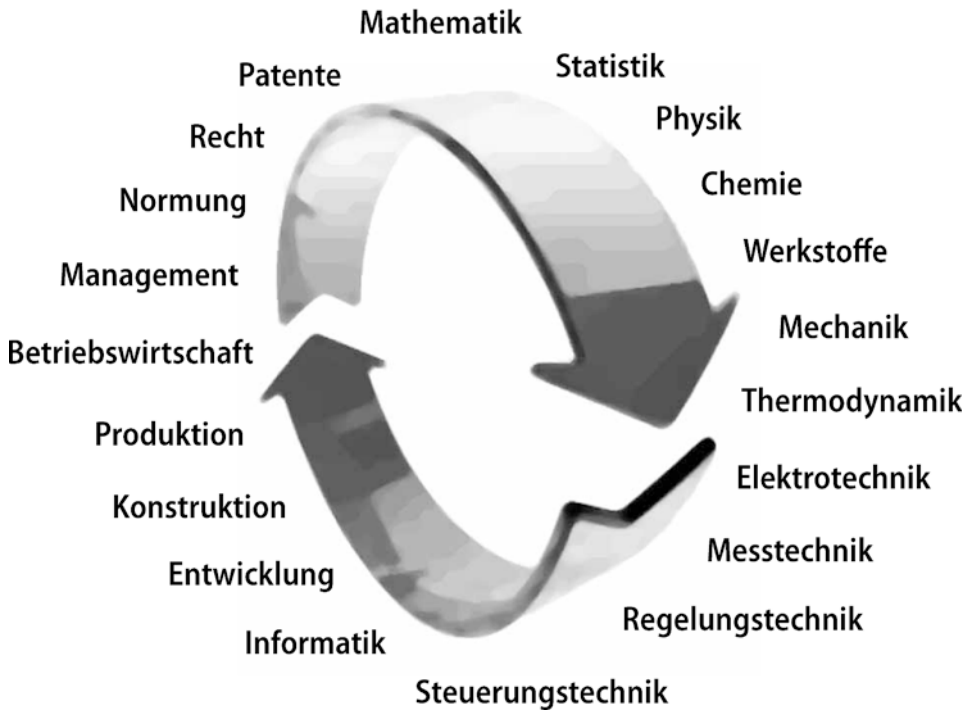
Unser herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Beiträge und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlages für die sachkundige redaktionelle Betreuung sowie dem Verlag für die vorzügliche Ausstattung der Bände.

Berlin, August 2013

H. Czichos, M. Hennecke

Das vorliegende Buch ist dem Standardwerk *HÜTTE Das Ingenieurwissen 34. Auflage* entnommen. Es will einen erweiterten Leserkreis von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern ansprechen, der nur einen Teil des gesamten Werkes für seine tägliche Arbeit braucht. Das Gesamtwerk ist im sog. Wissenskreis dargestellt.

Das Ingenieurwissen Grundlagen



Regelungs- und Steuerungstechnik

H. Unbehauen, F. Ley

Regelungstechnik

H. Unbehauen

1	Einführung	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
2	Modelle und Systemeigenschaften	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 Mehrgrößensysteme	
3	Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Zeitbereich	9
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	
4	Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Frequenzbereich	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 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 ₁ -Glied) – 4.5.5 Das Verzögerungsglied 2. Ordnung (PT ₂ -Glied und PT ₂ S-Glied) – 4.5.6 Bandbreite eines Übertragungsgliedes – 4.5.7 Systeme mit minimalem und nichtminimalem Phasenverhalten	
5	Das Verhalten linearer kontinuierlicher Regelkreise	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 Reglertypen	28
6	Stabilität linearer kontinuierlicher Regelsysteme	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	
7	Das Wurzelortskurvenverfahren	37
7.1	Der Grundgedanke des Verfahrens	37
7.2	Regeln zur Konstruktion von Wurzelortskurven	38
8	Entwurfsverfahren für lineare kontinuierliche Regelsysteme ..	40
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-Guillemin – 8.4.3 Algebraisches Entwurfsverfahren	
9	Nichtlineare Regelsysteme	55
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 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	
10	Lineare zeitdiskrete Systeme: Digitale Regelung	63
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	
11	Zustandsraumdarstellung linearer Regelsysteme	73
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	Systemidentifikation	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	Weitere Reglerentwurfverfahren	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
<i>Steuerungstechnik</i>		
F. Ley		
14	Binäre Steuerungstechnik	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	
Formelzeichen der Regelungs- und Steuerungstechnik		116
Literatur		117

Regelungs- und Steuerungstechnik

H. Unbehauen
F. Ley

REGELUNGSTECHNIK

H. Unbehauen

1 Einführung

1.1 Einordnung der Regelungs- und Steuerungstechnik







Automatisierte industrielle Prozesse sind gekennzeichnet durch selbsttätig arbeitende Maschinen und Geräte, die häufig sehr komplexe Anlagen oder Systeme bilden. Die Teilsysteme derselben werden heute durch die übergeordnete, stark informationsorientierte *Leittechnik* koordiniert. Zu ihren wesentlichen Grundlagen zählen die Regelungs- und Steuerungstechnik sowie die Prozessdatenverarbeitung. Ein typisches Merkmal von Regel- und Steuerungssystemen ist, dass sich in ihnen eine zielgerichtete Beeinflussung gewisser Größen (Signale) und eine Informationsverarbeitung abspielt, die N. Wiener [1] veranlasste, für die Gesetzmäßigkeiten dieser Regelungs- und Steuerungsvorgänge (in der Technik, Natur und Gesellschaft) den Begriff der *Kybernetik* einzuführen. Da Regelungs- und Steuerungstechnik weitgehend geräteunabhängig sind, soll im Weiteren mehr auf die systemtheoretischen als auf die gerätetechnischen Grundlagen eingegangen werden.

1.2 Darstellung im Blockschaltbild

In einem Regel- oder Steuerungssystem erfolgt eine Verarbeitung und Übertragung von Signalen. Derartige Systeme werden daher auch als Übertragungssysteme (oder Übertragungsglieder) bezeichnet. Diese besitzen eine eindeutige Wirkungsrichtung, die durch die Pfeilrichtung der Ein- und Ausgangssignale angegeben wird, und sind rückwirkungsfrei. Bei einem Eingrößensystem wirkt jeweils

ein Eingangs- und Ausgangssignal $x_e(t)$ bzw. $x_a(t)$. Bei Mehrgrößensystemen sind es dementsprechend mehrere Größen am Eingang oder Ausgang des Übertragungsgliedes (auch Teilsystem genannt). Einzelne Übertragungsglieder werden dabei durch Kästchen dargestellt, die über Signale untereinander zu größeren Einheiten (Gesamtsystemen) verbunden werden können. Der Begriff des *Systems* reicht dabei vom einfachen Eingrößensystem über das Mehrgrößensystem bis hin zu hierarchisch gegliederten Mehrstufigensystemen. Bild 1-1 zeigt ein einfaches Beispiel eines Blockschemas. Die wichtigsten bei Blockschaltbildern verwendeten Symbole sind in Tabelle 1-1 aufgeführt.

Tabelle 1-1. Die wichtigsten Symbole für Signalverknüpfungen und Systeme im Blockschaltbild

Benennung	Symbol	Mathematische Operation
Verzweigungspunkt		$x_3 = x_2 = x_1$
Summenpunkt		$x_3 = x_1 \pm x_2$
Multiplikationsstelle		$x_3 = x_1 x_2$
Divisionsstelle		$x_3 = x_1 / x_2$
Allgemeine lineare Operation		$x_2 = L(x_1)$
Allgemeine nicht-lineare Operation		$x_2 = N(x_1)$

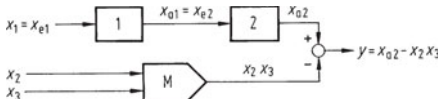


Bild 1-1. Beispiel für ein Blockschaltbild

1.3 Unterscheidung zwischen Regelung und Steuerung

Nach DIN 19226 [2] ist „*Regeln* ein Vorgang, bei dem eine Größe, die *Regelgröße*, fortlaufend erfasst (gemessen), mit einer anderen Größe, der *Führungsgröße*, verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne der Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich daraus ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem *Regelkreis*, statt“. Demgegenüber ist „*Steuern*“ der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichnend für das Steuern ist der *offene* Wirkungsablauf über das einzelne Übertragungsglied oder die Steuerkette.

Aus dem Blockschaltbild (Bild 1-2a) erkennt man leicht, dass die Regelung durch folgende Schritte charakterisiert wird:

- Messung der Regelgröße y ,
- Bildung der Regelabweichung $e = w - y$ durch Vergleich des Istwertes der Regelgröße y mit dem Sollwert w (Führungsgröße),
- Verarbeitung der Regelabweichung derart, dass durch Verändern der Stellgröße u die Regelabweichung vermindert oder beseitigt wird.

Vergleicht man nun eine Steuerung mit einer Regelung, so lassen sich folgende Unterschiede leicht feststellen:

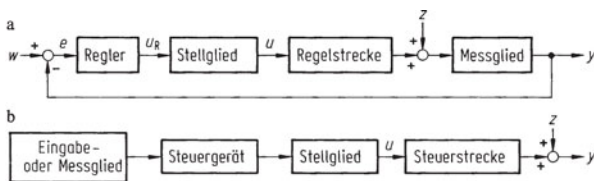


Bild 1-2. Gegenüberstellung **a** einer Regelung und **b** einer Steuerung im Blockschaltbild

Die Regelung

- stellt einen geschlossenen Wirkungsablauf (Regelkreis) dar;
- kann wegen des geschlossenen Wirkungsprinzips allen Störungen z entgegenwirken (negative Rückkopplung);
- kann instabil werden, d. h., Schwingungen im Kreis klingen dann nicht mehr ab, sondern wachsen auch bei beschränkten Eingangsgrößen w und z (theoretisch) über alle Grenzen an.

Die Steuerung

- stellt einen offenen Wirkungsablauf (Steuerkette) dar;
- kann nur den Störgrößen entgegenwirken, auf die sie ausgelegt wurde; andere Störeinflüsse sind nicht beseitigbar;
- kann, sofern das zu steuernde Objekt selbst stabil ist, nicht instabil werden.

Gemäß Bild 1-2a besteht ein Regelkreis aus 4 Hauptbestandteilen: Regelstrecke, Messglied, Regler und Stellglied.

Anhand dieses Blockschaltbildes ist zu erkennen, dass die Aufgabe der Regelung einer Anlage oder eines Prozesses (*Regelstrecke*) darin besteht, die vom *Messglied* zeitlich fortlaufend erfasste *Regelgröße* $y(t)$ unabhängig von äußeren *Störungen* $z(t)$ entweder auf einem konstanten *Sollwert* $w(t)$ zu halten (Festwertregelung oder Störgrößenregelung) oder $y(t)$ einem veränderlichen Sollwert $w(t)$ (*Führungsgröße*) nachzuführen (Folgeregelung, Nachlauf- oder Servoregelung). Diese Aufgabe wird durch ein Rechenggerät, den *Regler* R , ausgeführt. Der Regler bildet die *Regelabweichung* $e(t) = w(t) - y(t)$, also die Differenz zwischen Sollwert $w(t)$ und Istwert $y(t)$ der Regelgröße, verarbeitet diese entsprechend seiner Funktionsweise (z. B. proportional, integral oder differenzial) und erzeugt ein Signal $u_R(t)$, das über

das *Stellglied* als *Stellgröße* $u(t)$ auf die Regelstrecke einwirkt und z. B. im Falle der Störgrößenregelung dem Störsignal $z(t)$ entgegenwirkt. Durch diesen geschlossenen Signalverlauf ist der Regelkreis gekennzeichnet, wobei die Reglerfunktion darin besteht, eine eingetretene Regelabweichung $e(t)$ möglichst schnell zu beseitigen oder zumindest klein zu halten. Die hier benutzten Symbole werden in Anlehnung an die international üblichen Bezeichnungen im Folgenden verwendet.

1.4 Beispiele von Regel- und Steuerungssystemen

Anhand einiger typischer Anwendungsfälle wird im Folgenden die Wirkungsweise einer Regelung und einer Steuerung gezeigt, ohne dass dabei bereits die interne Funktionsweise der Geräte erläutert wird. Bild 1-3 zeigt die schematische Gegenüberstellung einer Regelung und einer Steuerung für eine Raumheizungsanlage. Bei der Steuerung, Bild 1-3a, wird die Außentemperatur ϑ_A über einen Temperaturfühler gemessen und dem Steuergerät zugeführt. Das Steuergerät verstellt in Abhängigkeit von ϑ_A über den Motor M und das Ventil V den Heizwärmestrom \dot{Q} . Am Steuergerät kann die Steigung der Kennlinie $\dot{Q} = f(\vartheta_A)$ voreingestellt werden. Wie aus dem Blockschaltbild hervorgeht, kompensiert eine gut eingestellte Steuerung nur die Auswirkungen einer Änderung der Außentemperatur $z_2 \hat{=} \vartheta_A$, jedoch nicht Störungen der Raumtemperatur, z. B. durch Öffnen eines Fensters oder durch starke Sonneneinstrahlung. Im Falle einer Regelung der Raumtemperatur ϑ_R , Bild 1-3b, wird diese gemessen und mit dem eingestellten Sollwert w (z. B. $w = 20^\circ\text{C}$) verglichen. Weicht die Raumtemperatur vom Sollwert ab, so wird über einen Regler (R), der die Abweichung verarbeitet, der Heizwärmestrom \dot{Q} verändert. Sämtliche Änderungen der Raumtemperatur ϑ_R werden vom Regler verarbeitet und möglichst beseitigt. Anhand der Blockschaltbilder erkennt man wiederum den geschlossenen Wirkungsablauf der Regelung (Regelkreis) und den offenen der Steuerung (Steuerkette).

Bild 1-4 zeigt einige weitere Anwendungsbeispiele für Regelungen. Daraus erkennt man anschaulich den Unterschied zwischen Festwertregelungen und Fol-

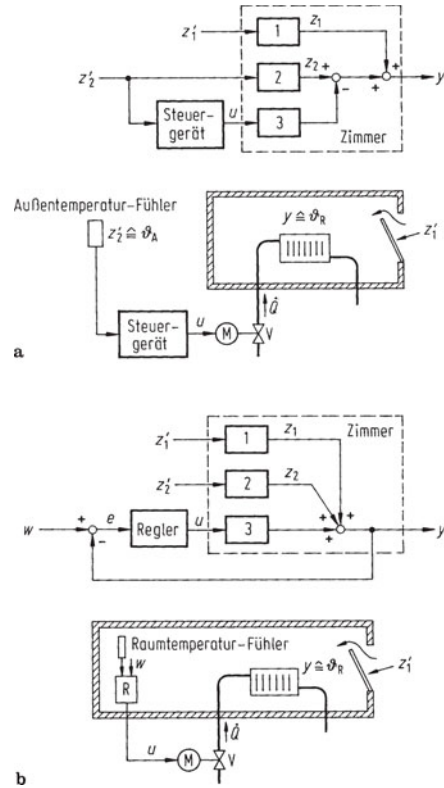


Bild 1-3. Gegenüberstellung a einer Steuerung und b einer Regelung für eine Raumheizung: Schemaskizzen und zugehörige Blockschaltbilder

geregelungen. So muss z. B. bei einer Dampfturbine die Drehzahl entsprechend dem fest eingestellten Sollwert eingehalten werden (Festwertregelung), während bei der Kursregelung der Sollwert bei der Umfahrung eines Hindernisses u. U. verändert wird und die Kursregelung dann die Aufgabe hat, das Schiff diesem Sollkurs nachzuführen (Folgeregelung).

Wie diese Beispiele bereits zeigen, kann die Signalübertragung in Regel- und Steuerungssystemen in verschiedenen Formen, d. h. durch mechanische, hydraulische, pneumatische oder elektrische Hilfsenergie erfolgen. Unabhängig von der technischen Realisierung werden die Signale im Weiteren aber

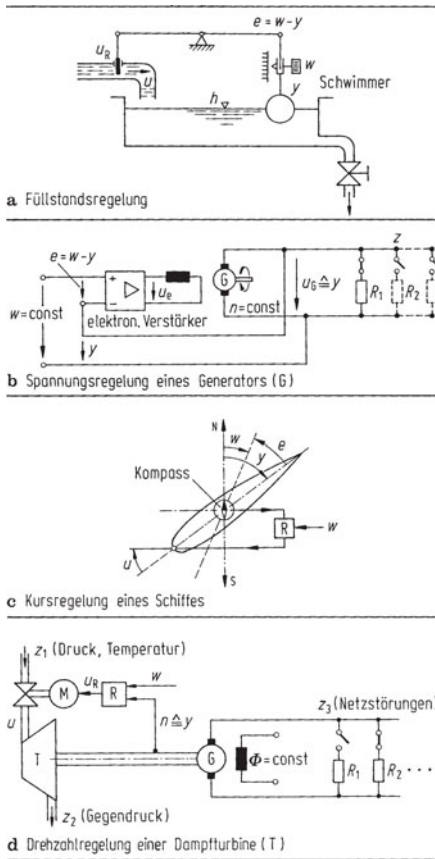


Bild 1–4a–d. Anwendungsbeispiele für Regelungen

nur hinsichtlich ihrer Information betrachtet und i. Allg. als reine (einheitenlose) mathematische Funktionen aufgefasst.

Das eingangs gezeigte Beispiel der Raumheizungssteuerung stellt einen bestimmten Typ einer Steuerung dar, der in die Gruppe der *Führungssteuerungen* fällt, die im Beharrungszustand durch einen festen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen, z. B. durch die Heizkurve, charakterisiert sind. Daneben gibt es noch die so genannten *Programmsteuerungen*, zu denen die Zeitplansteuerungen, Wegplansteuerungen und Ablaufsteuerungen sowie deren Kombinationen zählen. Zeitplansteuerungen laufen nach einem festen Zeitplan ohne Rückmeldungen ab. Wegplansteuerungen schalten in

einzelnen Schritten erst dann weiter, wenn bestimmte Bedingungen erreicht sind, die durch Rückmeldesignale (nicht zu verwechseln mit der Rückkopplung in Regelkreisen), z. B. durch Endschalter, realisiert werden können. Ablaufsteuerungen sind durch ein bestimmtes festes oder variables Programm gekennzeichnet, das schrittweise abläuft, wobei die Einzelschritte durch Rückmeldesignale ausgelöst werden. Ein typisches Beispiel für eine kombinierte Zeitplan- und Ablaufsteuerung ist der Waschautomat. Da Programmsteuerungen heute weitgehend in digitaler Technik ausgeführt werden, bezeichnet man sie häufig auch als binäre Steuerungen. In diesen binären Steuerungen werden Signale verwendet, die nur zwei Werte annehmen können. Auf diesem Prinzip beruhen die modernen speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), auf die ausführlich im Kapitel 14 eingegangen wird. Die Kapitel 2 bis 13 befassen sich mit der Behandlung regelungstechnischer Gesichtspunkte.

2 Modelle und Systemeigenschaften

2.1 Mathematische Modelle

Das statische und dynamische Verhalten eines Regel- oder Steuerungssystems kann entweder durch physikalische oder andere Gesetzmäßigkeiten analytisch beschrieben oder anhand von Messungen ermittelt und in einem *mathematischen Modell*, z. B. durch Differenzialgleichungen, algebraische oder logische Gleichungen usw. dargestellt werden. Die spezielle Form hängt hinsichtlich ihrer Struktur und ihrer Parameter dabei im Wesentlichen von den Systemeigenschaften ab. Die wichtigsten Eigenschaften von Regelsystemen sind im Bild 2–1 dargestellt. Mathematische Systemmodelle, die das Verhalten eines realen Systems in abstrahierender Form – eventuell vereinfacht, aber doch genügend genau – beschreiben, bilden gewöhnlich die Grundlage für die Analyse oder Synthese des realen technischen Systems sowie häufig auch für dessen rechen-technische Simulation [1]. So lassen sich bereits im Entwurfsstadium verschiedenartige Betriebsfälle anhand einer Simulation des Systems leicht überprüfen.

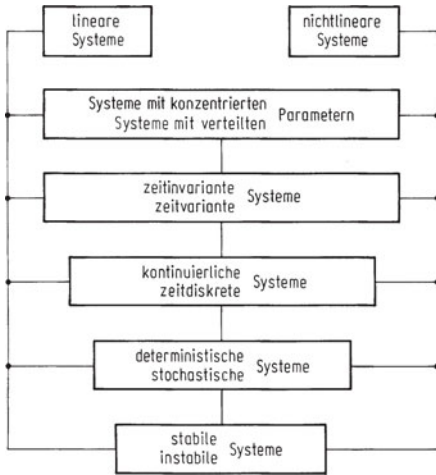


Bild 2-1. Gesichtspunkte zur Beschreibung der Eigenschaften von Regelungssystemen

2.2 Systemeigenschaften

2.2.1 Lineare und nichtlineare Systeme

Man unterscheidet bei Systemen gewöhnlich zwischen dem dynamischen und dem statischen Verhalten. Das *dynamische Verhalten* oder Zeitverhalten beschreibt den zeitlichen Verlauf der Systemausgangsgröße $x_a(t)$ bei vorgegebener Systemeingangsgröße $x_e(t)$. Somit stellen $x_e(t)$ und $x_a(t)$ zwei einander zugeordnete Größen dar. Als Beispiel dafür sei im Bild 2-2 die Antwort $x_a(t)$ eines Systems auf eine sprungförmige Veränderung der Eingangsgröße $x_e(t)$ betrachtet. In diesem Beispiel beschreibt $x_a(t)$ den zeitlichen Übergang von einem stationären Anfangszustand zur Zeit $t \leq 0$ in einen stationären Endzustand (theoretisch für $t \rightarrow \infty$) $x_a(\infty)$.

Variert man nun – wie im Bild 2-3 dargestellt – die Sprunghöhe $x_{e,s} = \text{const}$ und trägt die sich einstellenden stationären Werte der Ausgangsgröße $x_{a,s} = x_a(\infty)$ über $x_{e,s}$ auf, so erhält man die statische Kennlinie

$$x_{a,s} = f(x_{e,s}), \tag{2-1}$$

die das *statische Verhalten* oder Beharrungsverhalten des Systems in einem gewissen Arbeitsbereich beschreibt. Gleichung (2-1) gibt also den Zusammenhang der Signalwerte im Ruhezustand an. Bei der

weiteren Verwendung von (2-1) soll allerdings der einfacheren Darstellung wegen auf die Schreibweise $x_{a,s} = x_a$ und $x_{e,s} = x_e$ übergangen werden, wobei x_a und x_e jeweils stationäre Werte von $x_a(t)$ und $x_e(t)$ darstellen. Beschreibt (2-1) eine Geradengleichung, so bezeichnet man das System als linear. Für ein lineares System gilt das Superpositionsprinzip, das folgenden Sachverhalt beschreibt: Lässt man nacheinander auf den Eingang eines Systems n beliebige Eingangsgrößen $x_{ei}(t)$ einwirken und bestimmt man die Systemantworten $x_{ai}(t)$, so ergibt sich die Systemantwort auf die Summe der n Eingangsgrößen als Summe der n Antworten $x_{ai}(t)$. Ist das Superpositionsprinzip nicht erfüllt, so ist das System nichtlinear.

Lineare kontinuierliche Systeme können gewöhnlich durch lineare Differentialgleichungen beschrieben werden. Als Beispiel sei eine gewöhnliche lineare Differentialgleichung betrachtet:

$$\sum_{i=0}^n a_i(t) \frac{d^i x_a(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^n b_j(t) \frac{d^j x_e(t)}{dt^j}. \tag{2-2}$$

Wie man leicht sieht, gilt auch hier das Superpositionsprinzip. Da heute für die Behandlung linearer Systeme eine weitgehend abgeschlossene Theorie zur Verfügung steht, ist man beim Auftreten von Nichtlinearitäten i. Allg. bemüht, eine Linearisierung durchzuführen. In vielen Fällen ist es möglich, durch einen linearisierten Ansatz das Systemverhalten hinreichend genau zu beschreiben. Die Durchführung der *Linearisierung* hängt vom jeweiligen nichtlinearen Charakter des Systems ab. Daher wird im Weiteren zwischen der Linearisierung einer statischen Kennlinie und der Linearisierung einer nichtlinearen Differentialgleichung unterschieden.

(a) Linearisierung einer statischen Kennlinie

Wird die nichtlineare Kennlinie für das statische Verhalten eines Systems durch $x_a = f(x_e)$, also durch

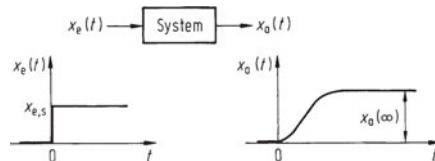


Bild 2-2. Beispiel für das dynamische Verhalten eines Systems