

# Einführung in die Regelungstechnik

Analoge und digitale Regelung, Fuzzy-Regler, Regel-Realisierung, Software

Bearbeitet von  
Von Heinz Mann, Horst Schiffelgen, Rainer Froriep, und Klaus Webers

12., neu bearbeitete Auflage 2018. Buch. 416 S. Softcover  
ISBN 978 3 446 45002 8  
Format (B x L): 16,4 x 24,1 cm  
Gewicht: 753 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Nachrichten- und Kommunikationstechnik > Regelungstechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beek-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Einführung in die Regelungstechnik“

von Heinz Mann, Horst Schiffelgen, Rainer Froriep,  
Klaus Webers

ISBN (Buch): 978-3-446-45002-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-45694-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43465-3>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

## Vorwort zur zwölften Auflage

Die Regelungstechnik ist im Grundsatz eine Ingenieurwissenschaft, die nicht an spezielle technische Ausführungsformen der zu regelnden Prozesse gebunden ist. Die hier behandelte Methodik ist anwendbar auf so unterschiedliche technische Teilgebiete wie Robotik, Kraftfahrzeugtechnik, Medizintechnik oder chemische Verfahrenstechnik, um nur einige typische Vertreter zu nennen. Diese herausragende Eigenschaft der Regelungstechnik gründet letztlich darauf, dass stets in einem ersten methodischen Schritt von den konkret zu behandelnden Gegebenheiten abstrahiert wird. Technisch-Konkretes wie z. B. Motoren, Reaktoren, Sensoren werden übersetzt in allgemeingültige Begriffe wie „System“ und „Übertragungsverhalten“. Auch das eigentlich zu bestimmende Ergebnis des Reglerentwurfs – der Regler – ist zunächst nicht an eine konkrete Realisierungsform gebunden. Erst in einem nachgelagerten Schritt muss entschieden werden, ob das entwickelte mathematische Reglergesetz analog, z. B. mit elektrischen oder pneumatischen Elementen, oder aber digital, z. B. auf Basis eines entsprechend zu programmierenden Prozessrechners, realisiert wird.

Neben dem Vorteil der breiten Anwendbarkeit ist die Regelungstechnik durch dieses generische Vorgehen auch in gewissem Sinn eine „zeitlose“ Wissenschaft. Konkrete technische Ausführungsformen ändern sich in schnelllebigem Zyklus. Demgegenüber bleiben die grundlegenden Methoden der Regelungstechnik weitgehend unverändert anwendbar. Beschreibung und Analyse technischer Systeme anhand von Übertragungsfunktionen haben auch nach mehreren Jahrzehnten erfolgreichen Einsatzes noch immer eine zentrale Bedeutung. Nach wie vor werden industriell eingesetzte Regelungen meistens zunächst vom Standpunkt einer zeitkontinuierlichen Dynamik entwickelt und dann erst in einem zweiten Schritt digital umgesetzt und auf entsprechenden Prozessrechnern implementiert.

Obwohl sich die grundsätzlichen Methoden also einiger Stabilität erfreuen, so ist doch die konkrete Anwendung dieser Methoden in stetigem Fortschritt. Wesentlich dafür ist die immer stärkere Unterstützung und Durchdringung der Regelungstechnik durch rechnergestützte Entwurfswerkzeuge – sogenannte Computer-Aided-Engineering – oder CAE-Werkzeuge. Inzwischen stehen für jeden einzelnen Schritt der Systemanalyse und Reglersynthese geeignete Rechnerwerkzeuge zur Verfügung; zudem sind diese auch so aufeinander abgestimmt, dass der gesamte Entwurfsprozess in einer gesamten Prozesskette abgebildet wird.

Auch an der Schnittstelle zum konkret zu regelnden Prozess verändern und unterstützen die Fortschritte der Entwurfswerkzeuge inzwischen die Methoden der Regelungstechnik.

Bisher war für die Implementierung des Reglers der Aufbau einer eigenen analogen Elektronik oder der Einsatz von teuren und spezifischen Prozessrechnern, z. B. in Form von Speicherprogrammierbaren Steuerungen SPS/PLC, notwendig. An dieser Stelle verändert das Aufkommen immer kostengünstigerer, sogenannter RCP (Rapid-Control-Prototyping)-Plattformen die Entwicklung. Besonders interessant für das Erlernen und die praktische Anwendung der Regelungstechnik ist hierbei die Möglichkeit, Regler mittlerweile auch automatisiert auf kostengünstigen geeigneten Hardwareplattformen direkt implementieren zu können. Als aktuelle Beispiele seien Kleinstrechnersysteme wie Arduino oder Raspberry-Pi genannt, die im Preisbereich weniger Euro neben dem Mikrocontroller geeignete I/O-Schnittstellen, ein Kommunikationsinterface und Echtzeit-Betriebssystem umfassen – und die zudem direkt aus Entwurfswerkzeugen wie z. B. Matlab/Simulink programmiert werden können. Aufgrund dieser Möglichkeiten der einfachen, flexiblen und kostengünstigen digitalen Reglerimplementierung verliert die analoge Umsetzung mittels rückgekoppelter Operationsverstärker immer mehr an Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund sind in der nun vorliegenden zwölften Auflage durch den neu hinzugekommenen vierten Autor die Inhalte fortgeführt und an aktuelle Entwicklungen angepasst. Die Behandlung der Grundlagen zeitkontinuierlicher und digitaler Regler ist im Grunde beibehalten, jedoch an die oben dargestellten Veränderungen angepasst. Eine Einführung zum Rapid Control Prototyping mittels kostengünstiger Kleinstrechner ersetzt die bisherige Übersicht zu regelungstechnischen Baueinheiten.

Bedanken möchten wir uns für Anregungen, Hinweise und Verbesserungsvorschläge aus dem Leserkreis und von Fachkolleginnen und -kollegen, die an mehreren Stellen Eingang gefunden haben. Bitte helfen Sie uns auch weiterhin dabei, das Buch bestmöglich an seinem Bedarf zu orientieren. Frau Franziska Jacob und Herrn Manuel Leppert vom Carl Hanser Verlag danken wir für die angenehme Zusammenarbeit.

Planegg und München, im August 2018

Rainer Frieriep, Klaus Webers

### **Aus dem Vorwort zur ersten Auflage**

Die stürmisch fortschreitende Technisierung und Automatisierung nahezu aller Lebensbereiche verlangt heute in gleichem Maße die Bereitstellung geeigneter Informationsquellen, sei es, um aktiv planend und ausführend an dieser Entwicklung teilnehmen zu können, sei es, um sich auch als Nichtfachmann einen Einblick in benachbarte Grenzgebiete zu verschaffen.

Technische Lehrbücher im Sinne derartiger moderner Informationsquellen müssen auf wissenschaftlich exakte Weise die unerläßlichen theoretischen Grundlagen in möglichst enger Verbindung mit der technischen Praxis vermitteln. Dabei sind, was den Umfang und die Auswahl des Stoffes anbelangt, manche Kompromisse zu schließen. Berücksichtigt man, daß viele Fachgebiete in dauernder Expansion begriffen sind und laufend neue, sich selbständig entwickelnde Disziplinen hervorbringen, so wird die hieraus entstehende Problematik besonders deutlich. Ihr kann praktisch nur durch die folgenden Alternativen begegnet werden: Weitere Spezialisierung in noch enger aufzugliedernde Fachbereiche oder Intensivierung der Grundlagen auf genügend breiter Basis, so daß die Voraussetzungen für selbständiges, ingenieurmäßiges Arbeiten geschaffen werden. Wir haben aus gutem Grund die letztere Zielsetzung der Konzeption dieses Buches zugrunde gelegt, dessen

Hauptaufgabe es sein soll, mit begrenztem Aufwand an mathematischen Mitteln und klar definierten Begriffen einen übersichtlich gestalteten und gut einprägsamen Wissensstoff zu vermitteln.

Duisburg, München, im September 1968

Die Verfasser

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>15</b>
1.1 Erste Orientierung .....	15
1.2 Steuerung .....	17
1.3 Regelung .....	24
1.4 Weitere Beispiele für Steuerungen und Regelungen .....	32
1.5 Zur Lösung regelungstechnischer Aufgabenstellungen .....	37
1. Aufgabenstellung (Spezifikationen) für Regelung bzw. Regler formulieren .....	37
2. Varianten für geeignetes Reglerverfahren ausarbeiten .....	39
3. Bestes Reglerverhalten technisch realisieren .....	40
<b>2 Analoge Übertragungsglieder</b> .....	<b>43</b>
2.1 Lineare zeitinvariante Übertragungsglieder (LZI-Glieder) .....	44
2.2 Wirkungsplan und grafische Simulationsprogramme .....	50
2.3 Mathematische Modellbildung .....	54
2.3.1 Theoretische Modellbildung (mit Linearisierung) .....	55
2.3.2 Experimentelle Modellbildung (Identifikation) .....	66
2.3.3 Normierung von mathematischen Modellen .....	72
2.4 Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen .....	74
2.4.1 Sprungantwort und Einheitsprungantwort .....	75
2.4.2 Impulsantwort und Einheitsimpulsantwort .....	78
2.4.3 Anstiegsantwort und Einheitsanstiegsantwort .....	80
2.5 Frequenzgang .....	82
2.5.1 Berechnung des Frequenzganges .....	82
2.5.2 Bode-Diagramm (Frequenzkennlinien) und Ortskurve .....	85

---

2.6	Übertragungsfunktion .....	88
2.6.1	Übertragungsfunktion und Differenzialgleichung .....	88
2.6.2	Verknüpfung von LZI-Gliedern .....	90
2.6.3	Übertragungsfunktion und andere Kennfunktionen .....	97
2.6.4	Pole und Nullstellen ( <i>P-N</i> -Plan) .....	99
2.7	Stabilität .....	102
2.7.1	Zum Begriff der Stabilität .....	102
2.7.2	Grundlegendes Stabilitätskriterium für LZI-Glieder .....	104
2.7.3	Hurwitz-Kriterium .....	109
2.8	Einfache LZI-Glieder .....	111
2.8.1	P-Glied .....	111
2.8.2	P-T <sub>1</sub> -Glied .....	113
2.8.3	P-T <sub>2</sub> -Glied .....	116
2.8.4	T <sub>1</sub> -Glied .....	122
2.8.5	I- und I-T <sub>1</sub> -Glied .....	123
2.8.6	D- und D-T <sub>1</sub> -Glied .....	126
2.8.7	Übersicht .....	129
<b>3</b>	<b>Regelstrecken .....</b>	<b>130</b>
3.1	Einteilung der Regelstrecken .....	132
3.2	Regelstrecken mit Ausgleich .....	134
3.2.1	Regelstrecken mit Ausgleich und ohne Verzögerung .....	135
3.2.2	Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung erster Ordnung ....	135
3.2.3	Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung höherer Ordnung ..	140
3.3	Regelstrecken ohne Ausgleich .....	146
3.3.1	Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung .....	146
3.3.2	Regelstrecken ohne Ausgleich und mit Verzögerung .....	148
3.4	Regelstrecken mit Totzeit .....	150
3.5	Regelbarkeit von Strecken .....	153
<b>4</b>	<b>Analoge Regler .....</b>	<b>155</b>
4.1	Einteilung der Regler .....	155
4.2	Stetige Regler .....	157
4.2.1	P-Regler .....	159
4.2.2	I-Regler .....	164
4.2.3	PI-Regler .....	168
4.2.4	PD-Regler .....	170
4.2.5	PID-Regler .....	173
4.2.6	Bleibende Regeldifferenzen, Genauigkeit .....	175

---

4.3	Unstetige Regler .....	176
4.3.1	Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich .....	178
4.3.2	Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich .....	184
<b>5</b>	<b>Analoger Regelkreis .....</b>	<b>186</b>
5.1	Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten .....	187
5.2	Standard-Konfigurationen von Strecke und Regler .....	191
5.3	Frequenzgang des offenen Regelkreises .....	191
5.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve .....	192
5.3.2	Stabilitätsanalyse anhand der Frequenzkennlinien .....	200
5.3.3	Frequenzkennlinien als Entwurfswerkzeug (FKL-Verfahren) .....	204
5.4	Wurzelortskurven (WOK-Verfahren) .....	215
5.5	Einstellverfahren .....	225
5.5.1	Optimierung der Reglerparameter .....	225
5.5.2	Einstellregeln .....	229
5.6	Vermaschte Regelkreise .....	233
5.6.1	Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung .....	233
5.6.2	Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung) .....	237
5.6.3	Regelkreis mit Störgrößenregelung .....	239
5.6.4	Mehrgrößenregelungen .....	239
5.7	Regeleinrichtung mit Strukturumschaltung („Anfahren“ von Regelkreisen) .....	240
5.8	Selbsteinstellende (adaptive) Regelkreise .....	241
5.9	Nichtlineare Regelkreise .....	242
<b>6</b>	<b>Digitale Reglerrealisierung (DDC) .....</b>	<b>247</b>
6.1	Überblick .....	247
6.2	Funktionseinheiten einer digitalen Regeleinrichtung .....	249
6.2.1	Analog-Digital-Umsetzung .....	250
6.2.2	Digitaler Regler .....	253
6.2.3	Digital-Analog-Umsetzung .....	254
6.2.4	Annahmen beim Berechnungsmodell des digitalen Reglers .....	255
6.3	Digitaler PID-Regler .....	255
6.3.1	P-Anteil .....	256
6.3.2	I-Anteil .....	256
6.3.3	D-Anteil .....	259
6.3.4	Stellungs- und Geschwindigkeitsalgorithmus .....	259
6.4	Berechnung weiterer Regelalgorithmen .....	264

---

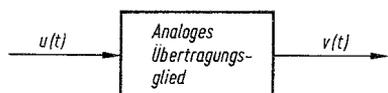
<b>7</b>	<b>Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke</b> .....	<b>269</b>
7.1	Einführung .....	269
7.2	Digital-Analog-Umsetzung und $z$ -Transformation .....	271
7.3	Diskretisierungsverfahren .....	276
7.4	Diskretisierungsbeispiele .....	279
7.4.1	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung .....	279
7.4.2	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 2. Ordnung .....	281
7.4.3	Strecke ohne Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung .....	286
<b>8</b>	<b>Digitale Übertragungsglieder</b> .....	<b>288</b>
8.1	Digitale LZI-Glieder .....	288
8.2	Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen .....	290
8.3	$z$ -Übertragungsfunktion .....	295
8.4	Wirkungsplan und grafische Programmierung .....	302
8.5	Stabilität .....	304
<b>9</b>	<b>Digitaler Regelkreis</b> .....	<b>309</b>
9.1	Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern .....	310
9.2	Einstellverfahren, Einstellregeln .....	312
<b>10</b>	<b>Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller)</b> .....	<b>315</b>
10.1	Einordnung .....	315
10.2	Regelbasis, linguistische Größe und Fuzzy-Menge .....	317
10.3	Fuzzy-logische Operationen .....	323
10.4	Informationsverarbeitung im Fuzzy-Regler .....	324
10.4.1	Fuzzifizierung der Regeldifferenz .....	326
10.4.2	Bestimmung des Erfüllungsgrades jeder Regel .....	327
10.4.3	Ermittlung der Stellgrößen-Fuzzy-Menge jeder Regel .....	328
10.4.4	Bestimmung der resultierenden Stellgrößen-Fuzzy-Menge .....	329
10.4.5	Defuzzifizierung der Stellgröße .....	330
10.5	Kennlinien von Fuzzy-Reglern .....	332
10.6	Fuzzy-PID-Regler .....	336
<b>11</b>	<b>Rapid Control Prototyping</b> .....	<b>340</b>
11.1	Einordnung .....	340
11.2	Low-Cost-RCP-System .....	342
11.2.1	Echtzeitbetrieb und Abtastzeit .....	344

11.2.2 Reglermodell und Diskretisierung .....	345
11.2.3 Datenaustausch Zielrechner/Entwicklungsrechner .....	348
<b>Anhang .....</b>	<b>350</b>
A.1 Einstieg in Matlab/Simulink .....	350
A.2 Anwendungen der komplexen Rechnung .....	357
A.3 Anwendungen der Laplace-Transformation .....	362
A.4 Anwendungen der $z$ -Transformation .....	371
A.5 Skizzieren von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm) .....	380
<b>Ergänzende und weiterführende Literatur .....</b>	<b>388</b>
<b>Literatur zu Matlab/Simulink .....</b>	<b>391</b>
<b>Normen und Richtlinien .....</b>	<b>392</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>394</b>
<b>Glossar .....</b>	<b>399</b>
<b>Index .....</b>	<b>407</b>

# 2

## Analoge Übertragungsglieder<sup>1</sup>

Das Blockschema von Bild 2.1 wird als Übertragungsglied bezeichnet, wenn zusätzlich eine Berechnungsvorschrift vorhanden ist, nach der aus gegebenem Eingangsgrößenverlauf  $u(t)$  eindeutig ein Ausgangsgrößenverlauf  $v(t)$  berechnet werden kann, z. B. mittels **Simulation** auf einem Digitalrechner. Die Berechnungsvorschrift ergibt sich aus der physikalischen Gesetzmäßigkeit, nach der eine Größe  $u$  eine andere Größe  $v$  in einem Gerät, einer Anlage, einem Fahrzeug usw. rückwirkungsfrei beeinflusst (vgl. Abschn. 1.2). Die Berechnungsvorschrift, die das **Übertragungsverhalten** zwischen  $u$  und  $v$  darstellt, wird als **mathematisches Modell** bezeichnet. Sind  $u$  und  $v$  analog (d. h. zeit- und wertkontinuierlich, vgl. Bild 6.6), dann spricht man von einem analogen Übertragungsglied. Ein Übertragungsglied kann auch mehrere Ein- und Ausgangsgrößen haben wie z. B. Stell- und Störgrößen bei einer Strecke (z. B. Bilder 1.4 oder 1.8). Der zeitliche Verlauf einer Größe wird auch als **Signal** bezeichnet.



**Bild 2.1**  
Analoges Übertragungsglied mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße

In Projektphase 2 (Abschn. 1.5) wird häufig ein mathematisches Modell der Strecke verwendet. Die dazu erforderliche **mathematische Modellbildung** wird in Abschn. 2.3 behandelt. Zuvor werden zwei Aspekte im Hinblick auf die Modellbildung besprochen: in Abschn. 2.1 eine sehr nützliche spezielle Art von mathematischen Modellen, die linearen, zeitinvarianten Übertragungsglieder oder kurz **LZI-Glieder**, und in Abschn. 2.2 eine einfache Methode, ohne spezielle Programmiersprachenkenntnisse mathematische Modelle zu simulieren.

Die Abschn. 2.4 bis 2.6 erläutern die wichtigsten **Kennfunktionen** von LZI-Gliedern, die aus Testsignalantworten berechnet werden, wie z. B. die Übergangsfunktion (Abschn. 2.4.1), den Frequenzgang (Abschn. 2.5) und die Übertragungsfunktion (Abschn. 2.6). Abschn. 2.7 behandelt die **Stabilität** von LZI-Gliedern, eine für jede Regelung grundlegende Eigenschaft. Abschnitt 2.8 stellt die Eigenschaften der am häufigsten verwendeten **einfachen Übertragungsglieder** zusammen.

<sup>1)</sup> Digitale Übertragungsglieder werden in Kap. 8 behandelt.

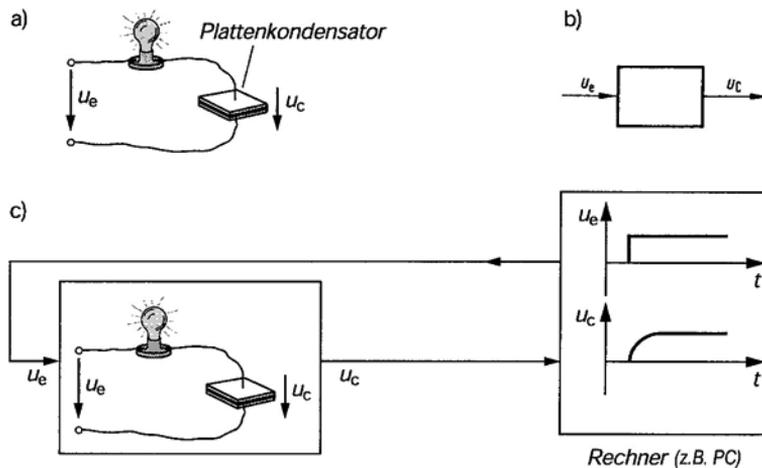
## ■ 2.1 Lineare zeitinvariante Übertragungsglieder (LZI-Glieder)<sup>2</sup>

Mit LZI-Gliedern arbeiten zu können, hat große Vorteile. Zum Beispiel ist ein Frequenzgang (Abschn. 2.5) oder eine Übertragungsfunktion (Abschn. 2.6) nur für LZI-Glieder anwendbar. In einem konkreten Anwendungsfall ist zunächst zu klären, ob und in welchen physikalischen Grenzen ein LZI-Glied als mathematisches Modell in Frage kommt (s. u. Gl. 2.1), inwieweit also Linearität und Zeitinvarianz vorliegen.

Ein Übertragungsglied ist **linear**, wenn es das Verstärkungs- und das Überlagerungsprinzip erfüllt, und **zeitinvariant**, wenn es das Verschiebungsprinzip erfüllt. Die folgenden Beispiele erläutern diese grundlegenden Begriffe.

### Beispiel 2.1: Elektrische Schaltung und Zeitvarianz bzw. Verschiebungsprinzip

Bild 2.2a zeigt eine reale elektrische Schaltung und b definiert Ein- und Ausgangsgröße des gesuchten Übertragungsgliedes. Untersucht wird die Schaltung gemäß Bildteil c mit einem PC mit Prozessankopplung, der als Signalgenerator ein Eingangssignal  $u_e$  auf die Schaltung geben und den resultierenden Verlauf der Ausgangsgröße  $u_c$  erfassen kann. Zu Beginn des Experiments seien  $u_e = 0$  und  $u_c = 0$ . (Das ist ein **Gleichgewichtszustand**, d. h. ein Zustand, bei dem alle betrachteten Größen konstant sind).



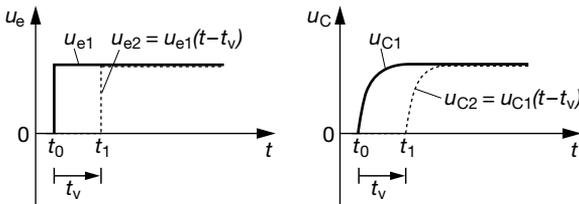
**Bild 2.2** Elektrische Schaltung

a) Realer Aufbau b) Übertragungsglied c) Rechner mit Prozessankopplung

<sup>2)</sup> Für Übertragungsglieder in Regelkreisen wird gelegentlich auch die Bezeichnung **Regelkreisglieder** verwendet.

Da viele Eigenschaften z. B. auch bei Steuerungen oder Signalfiltern Bedeutung haben, wird hier gemäß DIN 19226 T2 der allgemeinere Begriff des Übertragungsgliedes verwendet.

Zu einem Zeitpunkt  $t_0$  wird ein beliebiger Eingangsspannungsverlauf z. B.  $u_{e1}$ , in Bild 2.3, auf die Schaltung gegeben. Als Ausgangsgröße wird  $u_{C1}$  gemessen. Dann wird die Messung mit demselben Eingangsspannungsverlauf zu einem späteren Zeitpunkt  $t_1$  wiederholt, wobei nun  $u_{C2}$  als Ausgangsgröße gemessen wird. Da der Verlauf von  $u_{C2}$  demjenigen von  $u_{C1}$  gleicht – abgesehen von der zeitlichen Verschiebung –, sagt man, dass die Schaltung ihr Übertragungsverhalten zwischen den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$  nicht verändert hat. Es kann somit für diesen Zeitabschnitt als **zeitinvariant** angenommen werden. Hätte die Schaltung z. B. aufgrund von Alterungen oder Beschädigungen ihr Verhalten geändert, so würde bei einer späteren Messung ein anderes Ausgangssignal resultieren – das Verhalten wäre dann zeitvariant.

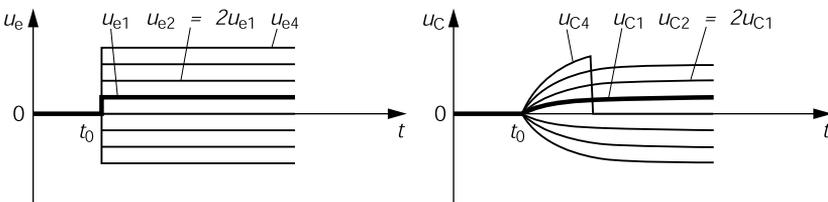


**Bild 2.3** Zur Zeitinvarianz bzw. zum Verschiebungsprinzip (Beispiel elektrische Schaltung Bild 2.2a) ■ m0203

**Verschiebungsprinzip:** Ein Übertragungsglied (Bild 2.1) mit dem beliebigen Eingangsverlauf  $u(t)$  und dem zugehörigen Ausgangsverlauf  $v(t)$  genügt dem Verschiebungsprinzip, soweit ein auf einen beliebigen späteren Zeitpunkt verschobener Eingangsverlauf  $u(t - t_v)$  einen genauso verschobenen Ausgangsverlauf  $v(t - t_v)$  auslöst.

**Beispiel 2.2: Elektrische Schaltung und Verstärkungsprinzip**

Zu einem Zeitpunkt  $t_0$  (Bild 2.4) wird ein beliebiger Eingangsspannungsverlauf  $u_e$ , z. B.  $u_{e1}$ , auf die Schaltung gegeben. Als Ausgangsgröße wird der Verlauf der Kondensatorspannung  $u_{C1}$  gemessen (fette Linien), bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Verändert („verstärkt“) man nun bei weiteren Messungen (und gültigem Verschiebungsprinzip) das Eingangssignal um einen beliebigen positiven oder negativen konstanten Faktor  $c$ , z. B.  $u_{e2} = 2 \cdot u_{e1}$ , dann erhält man bei der Schaltung einen mit dem gleichen Faktor  $c$  „verstärkten“ Ausgangsspannungsverlauf. Es ergibt sich also z. B.  $u_{C2} = 2 \cdot u_{C1}$ , wenn  $u_{e2} = 2 \cdot u_{e1}$ , bis z. B. der Kondensator durchschlägt ( $u_{C4}$ ). Bis zu dieser physikalischen Grenze kann man hier annehmen, dass das Verstärkungsprinzip erfüllt ist.

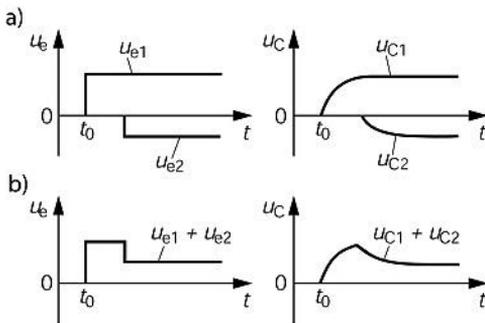


**Bild 2.4** Zum Verstärkungsprinzip (Beispiel elektrische Schaltung Bild 2.2a) ■ m0204

**Verstärkungsprinzip:** Ein Übertragungsglied (Bild 2.1) mit dem beliebigen Eingangsverlauf  $u(t)$  und dem zugehörigen Ausgangsverlauf  $v(t)$  genügt dem Verstärkungsprinzip, soweit ein mit einem beliebigen (positiven oder negativen) Faktor  $c$  „verstärkter“ Eingangsverlauf  $cu(t)$  einen genauso „verstärkten“ Ausgangsverlauf  $cv(t)$  auslöst (Bild 2.4).

**Beispiel 2.3: Elektrische Schaltung und Überlagerungsprinzip**

Wieder wird zu einem Zeitpunkt  $t_0$  ein beliebiger Eingangsspannungsvverlauf, z.B.  $u_{e1}$  in Bild 2.5a, auf die Schaltung gegeben. Als Ausgangsgröße wird  $u_{C1}$  gemessen. Dann wird die Messung wiederholt mit einem anderen beliebigen Eingangsspannungsvverlauf, z.B.  $u_{e2}$  in Bildteil a, und man erhält  $u_{C2}$ . Eine weitere Messung erfolgt mit der „Überlagerung“ von  $u_{e1}$  und  $u_{e2}$  ( $u_{e1} + u_{e2}$  in Bildteil b) und man erhält bei nicht zu großen Spannungen (maximale Spannung vgl. vorheriges Beispiel)  $u_{C1} + u_{C2}$ , also auch die Überlagerung der beiden Kondensatorspannungsvverläufe aus Bildteil a.



**Bild 2.5**  
 Zum Überlagerungsprinzip  
 (Beispiel elektrische Schaltung Bild 2.2a)  
 a) Einzelne und  
 b) überlagerte Spannungsvverläufe



**Überlagerungsprinzip:** Ein Übertragungsglied (Bild 2.1) mit zwei beliebigen, auch unterschiedlichen Eingangsvverläufen  $u_1(t)$  und  $u_2(t)$  und den zugehörigen Ausgangsvverläufen  $v_1(t)$  und  $v_2(t)$  genügt dem Überlagerungsprinzip, soweit die Überlagerung  $u_1(t) + u_2(t)$  der Eingangsvverläufe einen entsprechend überlagerten Ausgangsvverlauf  $v_1(t) + v_2(t)$  auslöst (Bild 2.5).

Ein mathematisches Modell für das lineare, zeitinvariante Übertragungsverhalten eines LZI-Gliedes (**LZI-Modell**) mit der Eingangsgröße  $u(t)$  und der Ausgangsgröße  $v(t)$  ist die *lineare Differenzialgleichung mit konstanten Koeffizienten*

$$a_n v^{(n)} + a_{n-1} v^{(n-1)} + \dots + a_1 \dot{v} + a_0 v = b_0 u + \dots + b_m u^{(m)}. \tag{2.1}$$

$v^{(n)}$  bedeutet die  $n$ -te Ableitung von  $v(t)$  nach der Zeit. Mit  $n$  bezeichnet man die Ordnung des LZI-Gliedes. Mit diesem mathematischen Modell kann man für gegebene Anfangsbedingungen  $v(t_0), \dot{v}(t_0), \dots, v^{(n-1)}(t_0)$  und gegebenen Eingangsvverlauf  $u(t)$  für  $t > t_0$  den Ausgangsvverlauf  $v(t)$  für  $t > t_0$  berechnen, z. B. mittels Simulationssoftware (Abschn. 2.2).<sup>3</sup> Verstärkungs- und Überlagerungsprinzip werden erfüllt (vgl. Beispiel 2.4). Die Zeitinvari-

<sup>3</sup> In einfachen Fällen kann auch eine Berechnung von Hand z. B. mittels Laplace-Transformation sinnvoll sein (Anhang A.3).

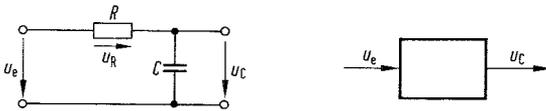
anz ist wegen der konstanten Koeffizienten gegeben. Daher kann der Anfangszeitpunkt  $t_0$  immer in den Nullpunkt der Zeitachse verschoben, also  $t_0 = 0$  gesetzt werden. Für alle Modelle physikalischer Prozesse gilt stets  $m \leq n$  aufgrund der Einschränkung zur Differenzierung von Signalen (Abschn. 2.2).

**Beispiel 2.4:** Mathematisches Modell der elektrischen Schaltung von Bild 2.2a

Bild 2.6a zeigt ein Ersatzschaltbild, wobei die Glühbirne als idealer ohmscher Widerstand  $R$  angenommen wird. Es stellt ein RC-Netzwerk dar mit dem mathematischen Modell (Herleitung in Beispiel 2.9)

$$RC\dot{u}_C + u_C = u_e.$$

Das Modell ist vom Typ der Gl. (2.1) mit  $u = u_e$ ,  $v = u_C$ ,  $a_1 = RC$ ,  $a_0 = 1$  und  $b_0 = 1$ . Es erfüllt das Verstärkungsprinzip: Die Multiplikation mit  $c$  ergibt  $a_1(c\dot{v}) + (cv) = cu$ , d.h. mit  $cu$  ist die Ausgangsgröße  $cv$ . Es erfüllt auch das Überlagerungsprinzip: Die Addition der beiden Gleichungen



a)

b)

**Bild 2.6** Modell für die elektrische Schaltung von Bild 2.2a  
 a) Ersatzschaltbild: RC-Netzwerk b) Übertragungsglied

$a_1\dot{v}_1 + v_1 = u_1$  und  $a_1\dot{v}_2 + v_2 = u_2$  ergibt  $a_1(\dot{v}_1 + \dot{v}_2) + (v_1 + v_2) = u_1 + u_2$ , d.h. mit der Überlagerung von  $u_1$  und  $u_2$  ist die Ausgangsgröße die Überlagerung von  $v_1$  und  $v_2$ . Es erfüllt das Verschiebungsprinzip (ist also zeitinvariant), wenn  $R$  und  $C$  konstant sind. Man nennt diesen häufig zur Anwendung kommenden LZI-Gliedtyp P-T<sub>1</sub>-Glied (Abschn. 2.8.2). ■

**Kennlinie eines LZI-Glieds**

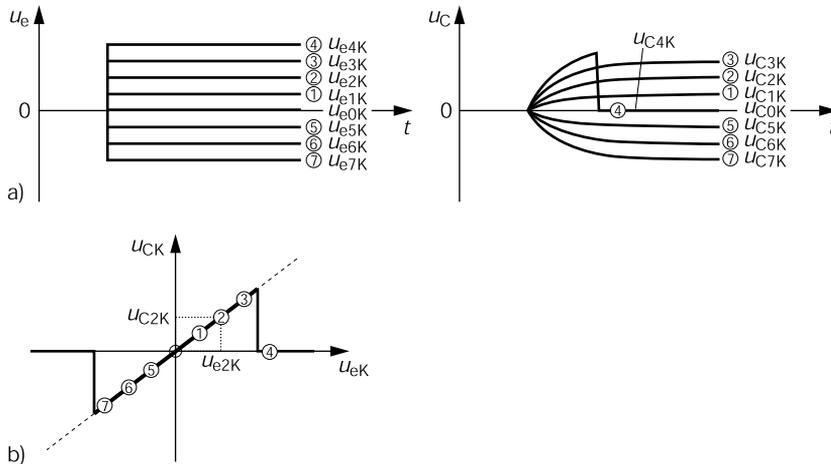
Die Signalverläufe in Bild 2.3 beginnen alle in einem **Gleichgewichtszustand** ( $u_e = 0$ ,  $u_C = 0$ ) und gehen nach dem Zeitpunkt  $t_0$  in verschiedene andere Gleichgewichtszustände über. Die Menge aller Gleichgewichtszustände lässt sich grafisch als sog. **statische Kennlinie**<sup>4</sup> eines Übertragungsglieds darstellen. Für ein LZI-Glied ergibt sich eine Gerade durch den Ursprung (Nullpunkt), wie das folgende Beispiel zeigt.

**Beispiel 2.5:** Elektrische Schaltung von Bild 2.2a und statische Kennlinie

In den Messkurven von Bild 2.7a sind die konstanten Werte mit dem zusätzlichen Index K bezeichnet. So ergibt sich z.B. für  $u_{e2K}$  die an der Stelle ② konstante Kondensatorspannung  $u_{C2K}$ . Genügend viele gemessene Wertepaare ergeben in einem  $u_{eK}$ - $u_{CK}$ -Diagramm

<sup>4)</sup> Der Zusatz „statisch“ wird üblicherweise weggelassen.

(Bild 2.7b) die statische Kennlinie (fett durchgezogen). Bis zu einer (positiven und negativen) Höchstspannung ist die Kennlinie eine Gerade durch den Ursprung. Darüber kann z. B. der Kondensator durchschlagen, woraufhin die Kondensatorspannung null wird (z. B.  $u_{C4K}$ ).



**Bild 2.7** Ermittlung einer statischen Kennlinie  
 a) Messungen an der Schaltung b) Ermittelte statische Kennlinie



Ist ein mathematisches Modell der elektrischen Schaltung gegeben, wie z. B. das LZI-Glied  $RC\dot{u}_C + u_C = u_e$  aus Beispiel 2.4, dann lässt sich die statische Kennlinie wie folgt berechnen: Wenn bei beliebigem konstanten  $u_e = u_{eK}$  auch  $u_C$  konstant geworden ist ( $u_C = u_{CK}$ ), dann wird das mathematische Modell zu  $RC\dot{u}_{CK} + u_{CK} = u_{eK}$  mit  $\dot{u}_{CK} = 0$  (die Ableitung einer Konstanten ist null). Somit folgt  $u_{CK} = u_{eK}$  als Gleichung der statischen Kennlinie. Das ist eine Gerade durch den Ursprung des  $u_{eK}$ - $u_{CK}$ -Koordinatensystems (Bild 2.7b), die nur im fett durchgezogenen Bereich mit den Messwerten übereinstimmt, d. h. das mathematische Modell (hier das LZI-Glied) ist nur für  $u_e$ -Werte zwischen etwa  $u_{e7K}$  und  $u_{e3K}$  gültig. ■

Aus dem mathematischen Modell Gl. (2.1) eines LZI-Glieds ergibt sich bei  $a_0 \neq 0$  die Gleichung einer **linearen Kennlinie**

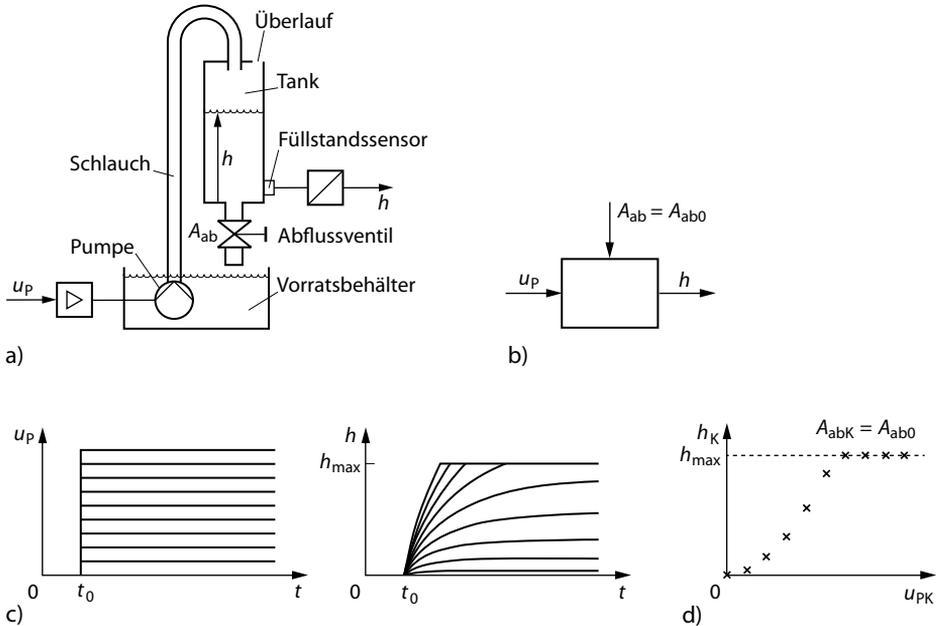
$$v_K = (b_0 / a_0) u_K \tag{2.2}$$

d. h. einer Geraden mit der Steigung  $b_0 / a_0$  durch den Nullpunkt eines  $u_K$ - $v_K$ -Koordinatensystems (Herleitung vgl. Beispiel 2.5). Es folgt ein weiteres Beispiel dafür, dass das Übertragungsverhalten zwischen Größen in Geräten, Anlagen, Fahrzeugen usw. meistens in bestimmten Wertebereichen näherungsweise als linear angenommen werden kann.<sup>5</sup>

<sup>5)</sup> Die in der regelungstechnischen Praxis am häufigsten verwendeten LZI-Glieder behandelt Abschn. 2.8.

**Beispiel 2.6:** Füllstandsstrecke

Der Füllstand  $h$  in Bild 2.8a kann mit der Pumpenspannung  $u_p$  beeinflusst werden, wobei das Abflussventil auf eine mittlere Öffnung  $A_{ab} = A_{ab0}$  fest eingestellt sei ( $A_{ab}$  freie Durchflussquerschnittsfläche). Bild 2.8b zeigt die Größen im Blockschema. Die Bildteile c und d seien an einem Laboraufbau gemessene Kurven: Bis zu einem Zeitpunkt  $t_0$  sei der Tank leer ( $h = 0$ ) und die Pumpe abgeschaltet ( $u_p = 0$ ). Ausgehend von diesem Gleichgewichtszustand wird die Pumpenspannung  $u_p$  auf verschiedene konstante Werte geschaltet, woraufhin jeweils einige Zeit vergeht, bis der Füllstand  $h$  angestiegen und konstant geworden ist.  $h_{max}$  ist der wegen Überlauf größtmögliche Füllstand. Die Kurven zeigen, dass das Verstärkungsprinzip nicht erfüllt ist, weil die statische Kennlinie keine Gerade ist. Das Übertragungsglied von Bildteil b ist also nichtlinear. Kann man sich jedoch bei Berechnungen auf kleine Wertebereiche beschränken, wie z. B. bei einer Regelung des Füllstandes auf einen kleinen Bereich um einen Sollwert  $h_s$ , dann kann die Krümmung der Kennlinie in diesem Bereich meist vernachlässigt und ein einfaches LZI-Glied verwendet werden (Herleitung in Beispiel 2.13).



**Bild 2.8** Füllstandsstrecke, Ermittlung einer statischen Kennlinie  
 a) Geräteschema b) Übertragungsglied  
 c) Zeitverläufe d) Werte der statischen Kennlinie



# Index

## A

Abtastfrequenz 399  
Abtasthalteglied 250, 399  
Abtastperiode 344, 399  
Abtastperiode, Wahl 310  
Abtasttheorem, Shannon 252  
Abtastzeit 342  
adaptive Regelung 241  
Additionsstelle 25  
aktive Regeln 327  
Amplituden(frequenz)gang 83  
Amplitudenreserve 195  
Analog-Digital-Umsetzung 250  
analogelektronischer Regler 41  
analoge Regler 155  
Analysemodell 54  
„Anfahren“ von Regelkreisen 240  
Anlaufwert 138, 144, 146  
Anregelzeit 190  
Anschwingzeit 77  
Anstiegsantwort 80  
– digital 294  
Anstiegsfunktion 75  
Anti-Alias-Filter 252, 399  
Anti-Windup 166  
aperiodischer Grenzfall 120  
Arbeitsbereich 399  
– linearer 67  
Arbeitspunkt 60, 64, 242, 280, 285, 290,  
302, 304, 335, 399  
Arduino 342  
Aufgabenbereich 399  
Aufgabengröße 19, 399

Ausgleichswert 133  
Ausgleichszeit 77, 141  
Ausregelzeit 38, 190  
Autocode-Generatoren 341

## B

Balance, harmonische 245  
Baueinheit 41  
Beharrungszustand 399  
Beschleunigungsfehler 175  
Beschreibungsfunktion 245  
Betragskennlinie 86, 399  
Betragsoptimum 229  
Bilanzgleichung 63  
Bildbereich 362, 372  
bleibende Regeldifferenz 38, 175, 190  
Block 18, 399  
Blockset 343  
Bode-Diagramm 85 f., 129, 380, 400

## C

CAE-Software 37, 40, 342  
CAE-System 340  
CAN 340  
C/C++ 341  
C-Code-Generator 357  
C-Compiler 357  
charakteristische Gleichung 104, 245,  
304  
Control System Toolbox 352

**D**

Dämpfung 189  
Dämpfungsgrad 116, 400  
Dauerschwingung 244  
D-Beiwert 126  
DDC 247  
Defuzzifizierung 324, 330  
Dekade 383  
Dekrement, logarithmisches 145  
Deltafunktion, Dirac'sche 78  
deploy to hardware 344  
Dezibel 85  
D-Glied 51, 126  
Differenzgleichung 257, 288  
Differenzialgleichung 88  
Differenzierbeiwert 126  
Differenzierglied 51, 126  
Digital-Analog-Umsetzung 254, 271  
digitale Größe 253  
digitalelektronischer Regler 41  
digitaler PID-Regler 255  
digitaler Regler 156, 253, 400  
Dirac'sche Deltafunktion 78  
direkte digitale Regelung 247  
direkter digitaler Reglerentwurf 249  
Diskretisierung 255, 276, 278, 345  
Diskretisierungsbeispiele 279 f., 282, 285 f.  
Dividierglied 51  
dominierendes Polpaar 223  
Dreipunktkennlinie 334  
Dreipunktregler 400  
D-T1-Glied 128  
Durchtrittskreisfrequenz 196, 400  
dynamisches Verhalten 132

**E**

Echtzeit-Betriebssystem 341, 344, 357  
Echtzeitfähigkeit 248  
Eckfrequenz 383  
Eigenkreisfrequenz 120, 400  
Ein-/Ausschaltverhältnis 178  
eingeschwungener Zustand 400

Einheitsanstiegsantwort 82  
Einheitsimpulsantwort 79, 98 f.  
– digitale 293, 300  
Einheitssprungantwort 76, 97  
– digitale 290, 300  
Einschaltvorgang 362, 372  
Einschwingtoleranz 77  
Einschwingzeit 77  
Einspeichersystem 137  
Einstellregeln 229, 312  
Einzugsbereich 102  
Electronic Control Unit (ECU) 341  
embedded control 15  
Endwertsatz der Laplace-Transformation 370  
Endwertsatz der z-Transformation 379  
Entnormierung 73  
Entwurfsmodell 54, 57  
Erfüllungsgrad 327  
erlaubtes, Polgebiet 215  
Euler'sche Formel 359  
Euler-Verfahren (ode1) 345  
experimentelle Modellbildung 54, 66, 137  
Expertenwissen 324  
External-Mode 348

**F**

Faktor  
– linearer 380  
– quadratischer 380  
Faktorisierung 100  
Fall, periodischer 119  
Festwertregelung 30, 400  
FKL-Verfahren 204  
Folgeregelung 30, 400  
Folgeregler 237  
Fourier-Reihen 244  
Frequenzgang 70, 82, 84, 87, 99, 400  
Frequenzgang des offenen Regelkreises 191  
Frequenzgangmessung 72  
Frequenzkennlinie 85, 200, 204, 380, 382, 384

Frequenzkennlinienverfahren 207, 212, 400  
 Führungsbereich 39, 401  
 Führungseinheitssprungantwort 189  
 Führungsgröße 19, 401  
 Führungsregler 237  
 Führungsübertragungsfunktion 310  
 Führungsverhalten 37, 187, 401  
 function-file 352, 357  
 Funktionstabelle 362, 371 f.  
 – der Laplace-Transformation 363  
 – der z-Transformation 371  
 Fuzzifizierung 324, 326  
 Fuzzy-Controller 315  
 Fuzzy-Inferenz 325  
 Fuzzy-Menge 319, 401  
 Fuzzy-PID-Regler 336  
 Fuzzy-Regler 315, 332, 401

## G

Gegenkopplung 92  
 Genauigkeit 37, 189, 215  
 geschlossener Wirkungsablauf 25, 29  
 geschlossener Wirkungsweg 25  
 Geschwindigkeitsalgorithmus 259 f.  
 Geschwindigkeitsfehler 175  
 Gewichtsfunktion 79, 98 f., 401  
 – digitale 293, 300  
 Gleichgewichtszustand 24, 44, 47, 102, 304, 401  
 Gleichstrommotor 138  
 – fremderregter 138  
 Gleichung, charakteristische 104, 245, 304  
 grafische Programmierung 302  
 Grenzfall, aperiodischer 120  
 Größe, digitale 253  
 Grundlast 176, 184  
 grundlegendes Stabilitätskriterium 104, 304  
 GUI 357  
 Gütekriterium 225, 312

## H

Halbwertzeit 77  
 Halteglied 275  
 Hardwareabstraktionsschicht (Hardware-Abstraction-Layer, HAL) 345  
 Hardware Support Packages 342  
 harmonische Balance 244  
 Hilfsenergie 19, 156, 401  
 HiL-Simulation 41  
 Hurwitz-Kriterium 109  
 Hurwitz-Stabilitätskriterium 224  
 hydraulischer Regler 41  
 Hysterese 176

## I

I-Beiwert 124  
 Identifikation 66, 241  
 I-Glied 51, 123, 146, 157  
 Impulsantwort 78, 401  
 – digitale 293  
 Impulsintensität 78, 293  
 indirekter digitaler Reglerentwurf 248  
 Inferenzschema 325  
 instabiles Verhalten 26  
 Integrated Development Environment (IDE) 342  
 Integrierbeiwert 124, 134  
 Integrierglied 51, 123  
 I-Regler mit Anti-Windup 166  
 Istwert 19, 401  
 I-T<sub>r</sub>-Glied 123, 149  
 I-T<sub>r</sub>-T<sub>t</sub>-Glied 150  
 ITAE-Kriterium 227  
 I-T<sub>n</sub>-Glied 149

## K

Kaskadenregelung 237  
 Kennfeldregler 317  
 Kennfläche 338  
 Kennfunktion 43, 75, 97, 290  
 Kenngröße 38, 77  
 Kenngrößen der Regelgüte 190

Kennkreisfrequenz 116, 401  
Kennlinie 47, 401  
– erster Ordnung 134  
– lineare 48  
– Linearisierung der 58  
– statische 47  
Kennlinienfeld 64  
Kennlinienglied 51, 316  
Kennlinienregler 317  
KL-Glied 51  
komplexe Zahl 358  
Korrekturglieder 207, 223  
Kreisschaltung 91  
kritischer Punkt 194

## L

Lagefehler 175  
Lag-Glied 209  
Laplace-Rücktransformation mittels  
  Partialbruchzerlegung 369  
Laplace-Transformation 362  
Laplace-Transformierte 362  
Laststörgröße 21, 132  
Lead-Glied 207f.  
Lead-Lag-Glied 210  
Lead-Regelalgorithmus 268  
lineare Kennlinie 48  
linearer Arbeitsbereich 67  
linearer Faktor 380  
lineares Übertragungsglied 43f.  
Linearisierung 57, 59, 65, 401  
Linearität 44  
linguistische Größen 320  
linguistische Terme 320  
Linke-Hand-Regel 194  
logarithmisches Dekrement 145  
Low-Cost-RCP-Systeme 342  
LTI-Viewer 354  
LZI-Glied 43, 288, 304, 401  
– digitales 288  
LZI-Modell 46, 130

## M

mathematische Modellbildung 39, 43, 54,  
  402  
– experimentelle 54, 66, 137  
– theoretische 54  
mathematisches Modell 39, 43, 402  
Matlab/Simulink 16, 40, 351  
MAX-MIN-Inferenz 325  
mechanischer Regler 41  
Mehrgrößenregelung 239  
Messort 130, 402  
Messstörungen 186, 207  
m-file 352  
M-Glied 51  
Mitkopplung 92  
Modalwert 321  
Modellbildung 54, 66, 137  
– experimentelle 54, 66, 137  
– theoretische 54  
Modell, mathematisches 39, 43, 402  
Modellparameter 68  
Modellstruktur 67  
Multiplizierglied 51

## N

Nachstellen 162  
Nachstellzeit 402  
nichtlinearer Regelkreis 242, 245f.  
Normierung 72  
Nyquist-Kriterium, vereinfachtes 194

## O

offener Wirkungsweg 18  
Operationstabelle 362, 365, 372f.  
– der Laplace-Transformation 365  
– der z-Transformation 373  
Optimierung 225  
Optokoppler 18  
Ordnung des LZI-Gliedes 289  
Ortskurve 87, 129, 402

**P**

Padé-Approximation 152  
 Parallelschaltung 91  
 P-Beiwert 111  
 PD-Glied 207  
 PD-Regler 170, 190  
 periodischer Fall 119  
 P-Glied 51, 111, 135  
 Phasen(frequenz)gang 83 f., 86  
 Phasenkennlinie 86, 402  
 Phasenreserve 195, 311  
 Phasenschnittkreisfrequenz 195, 402  
 Phasenverschiebung 71, 361  
 Phasenwinkel 358  
 PID-Regelalgorithmen 262, 267  
 PID-Regler 173, 190, 402  
 – digitaler 255  
 PI-Regler 168, 190  
 pneumatischer Regler 41  
 P-N-Plan 99 f.  
 Pol 99, 402  
 Polgebiet  
 – erlaubtes 215  
 Pol-Nullstellen-Form 100  
 Pol-Nullstellen-Plan 99 f., 402  
 Polpaar, dominierendes 223  
 Polynomdivision 379  
 P-Regler 159, 190  
 Programmierung, grafisch 302  
 Proportionalbeiwert 111, 133  
 Proportionalbereich 159  
 Proportionalglied 51, 111  
 Prozess 18, 248  
 Prozessrechner 40, 248, 402  
 P-T1-Glied 113, 136  
 P-T1-Tt-Glied 143  
 P-T2-Glied 116, 140  
 P-Tn-Glied 140  
 P-Tn-Strecke 151  
 Punkt, kritischer 194  
 PWM (pulsweitenmoduliert) 345

**Q**

quadratischer Faktor 380  
 Quantisierung 250  
 Quantisierungsfehler 251  
 Quantisierungsrauschen 259, 265

**R**

Rapid Control Prototyping (RCP) 39, 341, 348  
 RaspberryPi 342  
 RCP 346  
 Realisierungsvarianten 27, 40  
 Realzeitfähigkeit 248  
 Rechenzeit 253  
 Rechteckregel  
 – rückwärts 256, 259  
 – vorwärts 257  
 Regel, aktive 327  
 Regelalgorithmus 253, 255, 264, 402  
 Regelbarkeit 153  
 Regelbasis 317  
 Regelbereich 39, 402  
 Regeldifferenz 25, 402  
 – bleibende 190  
 – vorübergehende 153  
 Regelfläche 312  
 – betragslineare 227, 312  
 – lineare 312  
 – quadratische 227, 312  
 – zeitbeswert betragslineare 227  
 Regelgröße 29, 402  
 Regelkreis 25, 309  
 – analoger 186  
 – digitaler 309  
 – mit Störgrößenaufschaltung 233  
 – mit Störgrößenregelung 239  
 – nichtlinearer 242, 245 f.  
 – selbsteinstellend (adaptiver) 241  
 – strukturinstabiler 167, 175, 197  
 – vermaschter 233  
 Regelstrecke 29, 130, 270, 403  
 – digitales Berechnungsmodell 269

- integrierende 134
- mit Ausgleich 132, 134
- mit Totzeit 150
- mit Verzögerung 135, 148
- ohne Ausgleich 132, 146
- ohne Verzögerung 135, 146
- proportionale 133
- schwingungsfähige 145

Regelung 16, 24, 26, 29, 32f., 35, 403

- adaptive 241
- automatische 16
- digitale 247
- direkte digitale 247
- Hand- 28
- zeitgeführte 30

Regler 41

- analogelektronischer 41
- analoger 155
- digitalelektronischer 41
- digitaler 253
- digitaler PID- 255
- Einteilung der 155
- Fuzzy- 315
- Fuzzy-PID- 336
- hydraulischer 41
- I- 164
- I- mit Anti-Windup 166
- mechanischer 41
- P- 159
- PD- 170
- PI- 168
- PID- 173
- schaltender 156
- stetiger 157
- unstetiger 176
- Zweipunkt- 178, 184

Reglerentwurf 191

- direkter digitaler 249
- indirekter digitaler 248

Regler-Prototyping

- schnelles 39

Reglerverstärkung 159

Reihenschaltung 90

Robustheit 403

Rückführgröße 29

Rückwärts-Rechteckregel 256, 259

Rückwirkung 17, 24, 57, 403

Ruhelagen 102

Rundungsfehler 253

## S

Sample-and-Hold-Glied 250

Schaltdifferenz 176

schaltende Verstärker 176

Schaltfrequenz 178

schnelles Regler-Prototyping 39

Schnelligkeit 37, 189, 215

Schwerpunktmethode 330

Schwingspanne 178

Schwingungsdauer 178

Schwingungsfähigkeit 121

Schwingungsglied 120

script-file 352, 355

Shannon'sches Abtasttheorem 252, 403

Signal 403

Simulation 16, 43, 311, 335, 403

Simulationsalgorithmus („Solver“) 345

Singleton 321

Sinusantwort 70, 82, 403

- digitale 294

SISO-Design-Tool 354

Software 16

Soll-/Istwert-Abweichung 27

Soll-/Istwert-Vergleich 30

Sollwert 19, 403

Spannungsverstärker 17

Spezifikation 190

Sprungantwort 68, 75f., 403

- digitale 290
- Messung 68

Sprunghöhe 75

SPS 23, 340

Stabilität 43, 102, 105, 108, 189, 192, 304, 403

Stabilitätskriterium, grundlegendes 104, 304

Stabilitätsreserve 195

Stand-alone-Mode 348

Standard-Regelkreis 30, 155  
 stationäres Verhalten 132  
 statische Kennlinie 47  
 Stellbereich 38, 404  
 Steller 19  
 Stellglied 20  
 Stellgröße 19, 404  
 Stellgrößenbeschränkung 39, 190  
 Stellort 130, 404  
 Stellübertragungsfunktion 131  
 Stellungsalgorithmus 259 f.  
 Stellverhalten 131  
 stetige Regler 157  
 Steuereinrichtung 21  
 Steuerstrecke 20  
 Steuerung 16 ff., 21, 23, 404  
 – automatische 21  
 – Hand- 21  
 – speicherprogrammierbare 23  
 – zeitgeführte 23  
 Steuerungstechnik 23  
 Störbereich 38, 404  
 Störeinheitssprungantwort 189  
 Störgröße 21, 271, 404  
 Störgrößenaufschaltung 21 f., 27, 233, 235  
 – nachgebende 235  
 – starre 233  
 Störgrößenkonstanthaltung 239  
 Störort 130, 404  
 Störtendenzaufschaltung 235  
 Störübertragungsfunktion 131, 187, 310  
 Störverhalten 37, 131, 187, 404  
 Strecke 20, 29, 130, 191, 404  
 Strukturumschaltung 240  
 Systemintegration 41

## T

Testsignal 37  
 Testsignalantwort 74 f., 77, 80, 290  
 theoretische Modellbildung 54  
 Tiefpassfilter 206  
 Toleranzbereich 38, 190  
 Totzeit 122, 132, 150, 404  
 Totzeitglied 51, 122

Totzeitreserve 196, 311  
 Totzonenglied 243  
 Trapezregel 258, 260  
 Trennverstärker 18  
 Tt-Glied 51, 122

## U

Übergangsfunktion 76, 99, 404  
 – digitale 290, 300  
 Überlagerungsprinzip 46  
 Überschwingweite 38, 77, 190, 311  
 Übertragungsfunktion 88, 97 ff., 129, 404  
 – Nullstelle einer 99  
 – Pol einer 99  
 Übertragungsfunktion des offenen Kreises  
 92, 186  
 Übertragungsglied 43, 50, 129, 405  
 – analoges 43  
 – digitales 288  
 – lineares 43 f.  
 – zeitinvariantes 43 f.  
 Übertragungsverhalten 43, 75, 405  
 Umsetzzeit 250  
 unstetige Regler 176

## V

vereinfachtes Nyquist-Kriterium  
 194  
 Vergleichsglied 29  
 Verhalten  
 – dynamisches 132  
 – instabiles 26  
 – stationäres 132  
 vermaschte Regelkreise 233  
 Verschiebeglied 302  
 Verschiebungsprinzip 45  
 Versorgungsstörgröße 21, 132  
 Verstärkungsprinzip 45 f.  
 Verzögerung 20, 250  
 Verzugszeit 77, 141  
 Verzweigungsstelle 22  
 Vier-Quadranten-Arctan 359  
 Vorfilter 162

Vorhaltzeit 405  
Vorwärts-Rechteckregel 257

## W

Wendetagentenverfahren 141  
Wendetangente 77  
wind-up 258  
Wirkungsablauf, geschlossener 25, 29  
Wirkungslinie 18, 405  
Wirkungsplan 50, 302, 405  
Wirkungsrichtung 18  
Wirkungssinn 26  
Wirkungsweg  
– geschlossener 25  
– offener 18  
Wurzelort 215  
Wurzelortskurve 218  
– einfacher Übertragungsfunktionen 220

Wurzelortskurvenverfahren (WOK-Verfahren) 215, 223, 405

## Z

Zeitbereich 362, 372  
zeitinvariantes Übertragungsglied 43f.  
Zeitkonstante 113, 124, 133, 136, 405  
Zeitnormierung 73  
z-Rücktransformation mittels Partialbruchzerlegung 377  
z-Transformation 271, 371  
z-Transformierte 275, 372  
z-Übertragungsfunktion 277, 295, 310  
Zugehörigkeitsfunktion 318, 405  
Zustand, eingeschwungener 400  
Zweiortskurvenverfahren 245  
Zweipunktregler 178, 184, 405