

Jürgen
Bechtloff

Vogel Studienmodule

Regelungstechn



Der **Onlineservice InfoClick** bietet unter www.vogel-buchverlag.de nach Codeeingabe zusätzliche Informationen und Aktualisierungen zu diesem Buch.

InfoClick

In 3 Schritten zum Onlineservice

1. Einfach www.vogel-buchverlag.de aufrufen.
2. Auf das Logo **InfoClick** klicken.
3. Den unten stehenden Zugangscode und eine E-Mail-Adresse eingeben.

Ihr persönlicher Zugang
zum Onlineservice

A black outline of a downward-pointing arrow is positioned above a rectangular box with a black border, which serves as an input field for a code or email address.

Professor Dr.-Ing. Jürgen Bechtloff

Regelungstechnik

Vogel Buchverlag

Professor Dr.-Ing. **JÜRGEN BECHTLOFF**

studierte an der Technischen Universität Braunschweig Maschinenbau und promovierte dort 1992 auf dem Gebiet der Robotik. Er war anschließend in der Entwicklung der Firma Moeller in Bonn tätig, einem Hersteller von Komponenten und Systemen für die Energieverteilung und Automatisierung (Automatisierungstechnik).

Seit 1998 verantwortet Professor JÜRGEN BECHTLOFF an der Fachhochschule Südwestfalen am Standort Meschede die Lehrgebiete Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die Module Mechatronik, Robotik und Getriebetechnik.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3202-8

1. Auflage. 2012

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2012 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Regelungstechnische Lösungen sind in der Technik überall dort gegenwärtig, wo entweder instabile Systeme zu beherrschen sind oder technische Vorgänge automatisch und kontrolliert ablaufen sollen. Deshalb spielt die Regelungstechnik bei intelligenten Lösungen eine entscheidende Rolle.

Diese Technik beschränkt sich nicht auf ein bestimmtes physikalisches System, sondern bietet Methoden an, alle physikalischen Systeme mit einer **einheitlichen Systematik** auf einer besonderen, abstrakten Ebene zu betrachten. Die Regelungstechnik ist deshalb eher ein theoretisches Lehrgebiet, das dieses Studienmodul zum besseren Verständnis mit einer Vielzahl von Lehrbeispielen begleitet. **Grundlagen** sind dafür alle an den Ingenieurwissenschaften beteiligten Disziplinen: Mathematik, Physik, Informatik, Messtechnik usw.

Ziel

Eine Lehrveranstaltung – sowie auch dieses Studienmodul – können das breit gefächerte Lehrgebiet der Regelungstechnik (die sich auch aufgrund der Innovationszyklen sehr dynamisch entwickelt) nur begrenzt darstellen. Beschrieben werden Grundlagen und die in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Lösungsprinzipien für lineare **1-Größen-Regelkreise**. Darstellungen im Zustandsraum, Synthese von Zustandsregelungen, diskrete Systeme und Fuzzy-Systeme bleiben somit unberücksichtigt.

Aufbau

Exemplarisch wird der Unterschied zwischen **Steuerung** und **Regelung** praxisbezogen erklärt. Dabei werden die Grundbegriffe erläutert und verschiedene **Signaltypen** klassifiziert. Die **Analyse von dynamischen** Systemen steht immer am Anfang einer regelungstechnischen Aufgabenstellung, darum werden deren Eigenschaften untersucht. Eine vollständige Analyse, einschließlich der Lösungen mit Differentialgleichungen, rundet den Abschnitt ab.

Eine Grundlage zur Analyse von physikalischen Systemen bilden die **PAYNTERschen Vierecke**, die die Analogie untereinander anschaulich beschreiben. Daraus entsteht ein Verständnis, das den prinzipiellen Zugang zu den Analyseprinzipien erst ermöglicht. Die beispielhafte Analyse unterschiedlicher Systeme ergänzt die Grundlagen, deren Ergebnis Differentialgleichungen sind.

In der Regelungstechnik hat sich die Betrachtung der dynamischen Systeme im **Frequenz-** und im **LAPLACE-Bildbereich** bewährt. Aus diesen mittels Transformation bzw. Variablensubstitution entwickelten Darstellungen lassen sich die Systemeigenschaften sehr effizient ablesen. Aber auch die weitere mathematische Berechnung mit dem Ziel des sicheren Entwurfs von Regelkreisen profitiert von dieser Darstellungsweise. Bei der Handhabung wird auf eine praxisnahe Darstellung besonderer Wert gelegt.

Mit diesen mathematischen Grundlagen werden im nächsten Schritt die wichtigsten linearen Systeme analysiert und einer **systematischen Klassifikation** zugeführt. Es entsteht ein **Systembaukasten** der linearen Regelungstechnik, mit dem die in der Praxis am häufigsten vorkommenden technischen Systeme modellhaft beschrieben werden können.

In den nächsten Abschnitten werden zwei wichtige grafische Beschreibungsmittel behandelt. So stellt das **BODE-Diagramm** mit der Möglichkeit, über Asympto-

tenverläufe sehr einfach auf Gesamtverläufe ohne explizite numerische Berechnung schließen zu können, ein wichtiges Hilfsmittel für den Frequenzbereich dar. Diese Verläufe werden bei der Stabilitätsbetrachtung noch einmal intensiv eingesetzt. Die Struktur von Regelkreisen wird in der Praxis immer grafisch mit Hilfe des zweiten Beschreibungsmittels, dem **Signalflussplan**, wiedergegeben. Vereinfachung und Analyse werden anhand von Beispielen demonstriert.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wird dann der **geschlossene Regelkreis** intensiv untersucht. Auch diese Aufgabe wird systematisiert und die Frage beantwortet, welche Voraussetzungen ein Regler aufweisen muss, um eine gegebene Strecke zufriedenstellend zu regeln.

Die eigentlichen **Regler** behandelt der nächste Abschnitt, und neben dem Standard-Industrieregler werden weitere Verfahren besprochen.

Bei allen Betrachtungen zur Regelkreissynthese wurde von der Kenntnis der Regelstrecke und ihren konkreten Parameterwerten ausgegangen. In der Praxis gelingt nicht immer die vollständige theoretische Modellbildung. Hier haben sich ganz praktische Verfahren der Streckenbeobachtung etabliert. Aus den Antwortverläufen lassen sich die Streckenparameter bestimmen. Die wichtigsten **Identifikationsverfahren** werden beschrieben und mit Beispielen erläutert.

Die Frage nach der **Stabilität** von Regelkreisen für deren sicheren Betrieb ist bereits beim Entwurf zu beantworten. Hieraus lassen sich ebenfalls Parametereinstellbedingungen ableiten. Wie gut eine Reglereinstellung dann tatsächlich in einer Regelkreisumsetzung funktioniert, lässt sich mit Hilfe der Kriterien der **Regelkreisoptimierung** beantworten.

Zum Abschluss werden einige wenige typische **Realisierungen der Regelungstechnik** vorgestellt. Dort wo es sinnvoll ist, schließen Kapitel mit **Übungsaufgaben** ab, die das Verständnis vertiefen. Kapitel 15 bringt dann die Lösungen zusammen mit den Aufgabestellungen.

Voraussetzungen

Das Studienmodul setzt solide Kenntnisse in den Grundlagenfächern Ingenieurmathematik und allgemeine Physik (inkl. Elektrotechnik) voraus. Alle anderen für das Verständnis der einzelnen regelungstechnischen Themen erforderlichen Grundlagen werden in den einzelnen Abschnitten vermittelt.

Software-Tools

Zur Vereinfachung von Berechnungen in der Regelungstechnik und natürlich für alle anderen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen haben sich eine Vielzahl von unterstützenden Software-Tools etabliert. Neben der direkten Programmierung in einer Hochsprache wie C, C++, C#, Pascal, Java usw. eignen sich oftmals auch mathematische Anwendungen wie Maple, Mathlab, Freemath, Scilab, Octave oder MathCad. Bei der Bearbeitung der praktischen Laboraufgaben sollte unbedingt eines dieser Programme eingesetzt werden, um praktische Erfahrungen bei der Anwendung zu sammeln. Eine Liste mit Anbietern und Quellen steht im Literaturverzeichnis.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung in die Regelungstechnik	13
1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik	13
1.2 Definition von Steuerung und Regelung	14
1.2.1 Steuerung	14
1.2.2 Regelung	16
1.2.3 Merkmale von Regelungen und Steuerungen	19
2 Signale	21
3 Systemeigenschaften	25
3.1 Dynamisches und statisches Verhalten von Systemen	25
3.2 Lineare und nichtlineare Systeme	26
3.3 Linearisierung nichtlinearer Systeme	28
3.3.1 Linearisieren des statischen Verhaltens	28
3.3.1.1 Grafische Linearisierung	28
3.3.1.2 Analytisches Linearisieren	29
3.4 Zeitvariante und zeitinvariante Systeme	30
3.5 Beschreibung von Regelkreisgliedern durch Differentialgleichungen	31
3.5.1 Aufstellen von Differentialgleichungen	31
3.5.2 Lösung der Differentialgleichungen durch einen geeigneten Ansatz	34
3.5.3 Spezielle Eingangssignale in der Regelungstechnik	37
3.5.4 Übergangsfunktion (Sprungantwort)	38
4 Modellbildung	41
4.1 Allgemeines System	43
4.2 Mechanisch-translatorisches System	44
4.3 Mechanisch-rotatorisches System	45
4.4 Elektrisches System	46
4.5 Fluidisches System	47
4.6 Thermodynamisches System	47
4.7 Systemanalogien	48

5	Darstellung von Regelkreisgliedern durch Übertragungsfunktion und Frequenzgang	51
5.1	LAPLACE-Transformation	51
5.1.1	Haupteigenschaften der LAPLACE-Transformation	53
5.1.2	Grenzwertsätze	54
5.1.3	Übertragungsfunktion	55
5.1.4	Frequenzgang	56
5.1.5	Grafische Darstellung des Frequenzgangs	58
5.1.6	Ortskurve	60
5.1.7	BODE-Diagramm	61
6	Regelstrecken	65
6.1	Proportionale Regelstrecken	67
6.1.1	Proportionale Strecken ohne Verzögerung (P-Glied)	67
6.1.2	Proportionale Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung (PT_1 -Glied)	68
6.1.3	Schwingungsfähige Proportionalstrecken (PT_2 -Glied)	71
6.2	Integrierende Regelstrecken	79
6.2.1	Integrierende Strecken ohne Verzögerung (I-Glied)	79
6.2.2	Integrierende Strecken mit Verzögerungen (IT_n -Glied)	82
6.2.3	Differenzierende Regelstrecken	86
6.2.3.1	Idealer Differenzierer	86
6.2.3.2	Strecken mit differenzierendem und verzögerndem Verhalten (DT_n -Element)	89
6.2.3.3	Proportionale Strecken mit differenzierendem und verzögerndem Verhalten (PDT_n -Element)	93
6.2.4	Strecken mit Totzeit (T_t -Element)	96
7	Darstellung des Frequenzganges im BODE-Diagramm	101
7.1	Konstruktion eines BODE-Diagramms	103
8	Signalflusspläne	107
8.1	Übertragungsblöcke	107
8.2	Verknüpfungselemente	108
8.3	Verknüpfungs- und Vereinfachungsregeln	109
8.3.1	Kettenstruktur	110
8.3.2	Parallelstruktur	110
8.4	Umformung von Signalflussplänen	110
8.5	Anwendungen	113

9	Regelkreis	119
9.1	Verhalten des Regelkreises bei einer Eingangsgröße	121
9.1.1	Führungsverhalten	121
9.1.2	Störungsübertragungsverhalten von Versorgungsstörgrößen	122
9.1.3	Störungsübertragungsverhalten von Laststörgrößen	122
9.2	Untersuchung von Regelkreisstrukturen	123
9.2.1	Regler für proportionale Strecken	123
9.2.1.1	Verzögerungsstrecke 1. Ordnung (PT_1 -Strecke)	123
9.2.1.1.1	P-Regler	124
9.2.1.1.2	PI-Regler	127
9.2.1.1.3	Verzögerungsstrecke 2. Ordnung (PT_2 -Strecke)	131
9.2.2	Integrierende Strecke mit einer Verzögerung 1. Ordnung (PIT ₁ -Strecke)	134
10	Regler	139
10.1	PID-Regler	139
10.1.1	Analytische Parameterermittlung	141
10.1.1.1	PT_3 -Strecke	141
10.1.1.2	PT_{2s} -Strecke	143
10.1.2	Empirische Einstellregeln für PID-Regler	143
10.1.2.1	Einstellregeln nach ZIEGLER-NICHOLS	144
10.1.2.2	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK	145
10.1.3	Vergleich der unterschiedlichen Auslegungen	146
10.1.4	T-Summen-Regel	146
10.1.5	Begrenzung der Stellgröße	147
10.2	Analytische Regler	148
10.2.1	Vorgabe des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises	149
10.2.2	Verfahren nach TRUXAL-GUILLEMIN	152
10.3	Kaskadenregelung	157
10.4	Schaltende Regler	162
10.4.1	2-Punkt-Regler	162
11	Identifikation von Strecken	167
11.1	Experimentelle Analyse mit sprungförmiger Anregung	167
11.1.1	PT_1 -Element	168
11.1.2	Schwingungsfähiges PT_2 -Element	169
11.1.3	Nicht-schwingungsfähige PT_n -Elemente	170
11.1.3.1	Prinzip des Wendepunktverfahrens für PT_2 -Elemente	171

11.1.3.2	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit 2 unterschiedlichen Zeitkonstanten	171
11.1.3.3	Wendetangentenverfahren für n Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten	173
11.1.3.4	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren unterschiedlichen Zeitkonstanten	175
11.2	Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerungen (PIT_n)	178
11.3	Identifikation von Proportional-Differential-Elementen mit Verzögerung 1. Ordnung (PDT_1)	180
12	Stabilität von Regelkreisen	183
12.1	Definition der Stabilität	183
12.2	Stabilitätskriterium nach HURWITZ	186
12.2.1	Beispiele zur Regler-Auslegung nach dem HURWITZ-Kriterium	187
12.3	NYQUIST-Kriterium	190
13	Optimierung von Regelkreisen	197
13.1	Begriff der Regelfläche	197
13.1.1	Integralkriterium der linearen Regelfläche	197
13.1.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche	200
13.1.3	Integralkriterium der Quadratischen Regelfläche	201
14	Regelungstechnische Lösungen	205
14.1	Kontinuierlicher Proportional-Regler	205
14.2	Kontinuierlicher Integralregler	205
14.3	2-Punkt-Regler (mechanisch)	206
14.4	Prozessregler	207
14.5	Spezialregler	209
14.6	Mechatronische Systeme	211
14.7	Automatisierungssysteme	213
15	Lösungen zu den Aufgaben	215
15.1	Aufgaben zu Kapitel 3	215
15.2	Aufgaben zu Kapitel 4	217
15.3	Aufgaben zu Kapitel 5	218
15.4	Aufgabe zu Kapitel 6	224
15.5	Aufgaben zu Kapitel 7	226

15.6	Aufgaben zu Kapitel 8	230
15.7	Aufgaben zu Kapitel 9	235
15.8	Aufgaben zu Kapitel 10	238
15.9	Aufgaben zu Kapitel 11	241
15.10	Aufgabe zu Kapitel 12	245
Literaturverzeichnis		249
Stichwortverzeichnis		251

1 Einführung in die Regelungstechnik

Die Regelungstechnik ist ein fester Bestandteil auch in unserem alltäglichen Leben. So funktioniert, beispielsweise, aufrechter Gang nur durch Regelung: Die Sinne wirken als Sensoren und die Muskeln als Aktoren. Weitere diesbezügliche **Regelungsaufgaben** sind das Konstanthalten der Körpertemperatur, des Blutdruckes und vieles mehr.

Die erste, technisch bedeutsame regelungstechnische Lösung war der **Fliehkraftregler** von JAMES WATT, der die Drehzahl an Dampfmaschinen regeln sollte. Heute findet man die technische Regelungstechnik in fast allen Anwendungen: Der Temperaturregler des Kühlschranks, der Temperaturregler der Gebäudeheizungsanlage, das Antiblockiersystem im Pkw sind nur einige Beispiele.

Allen regelungstechnischen Lösungen liegt das Prinzip der **Rückkopplung** zu Grunde. Sie beruht auf dem fortlaufenden Vergleich der Regelgröße, z.B. der gemessenen Drehzahl (Istwert) mit der Führungsgröße oder einem vorgegebenen Wert für die Drehzahl (Sollwert). Eine Abweichung des Istwertes vom Sollwert bewirkt einen Einfluss auf das System (Stellgröße).

In der industriellen Produktion stehen die 3 Komponenten Materie, Energie und Information im Mittelpunkt. Während das Interesse bei Produktionsprozessen früher vorrangig ihrer energetischen und stofflichen Seite galt, gewinnen bei ihrer Automatisierung die sie begleitenden/überlagernden Informationen zunehmend dominierenden Einfluss.

1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik

Nach DIN 66 201 (bzw. DIN V 19 233) gilt:

„Ein Prozess ist eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird. Ein technischer Prozess ist ein Prozess, dessen Zustandsgrößen mit technischen Mitteln erfasst und beeinflusst (gemessen, gesteuert und geregelt) werden können.“



Hierdurch läuft in einer technischen Anlage ein technischer Prozess ab (Bild 1.1), der durch das Automatisierungsgerät gesteuert oder geregelt wird (Bild 1.2).

Der Material-, Energie- und/oder Informationsfluss wird durch die technische Anlage verändert. Vertikal verläuft immer ein **Informationsfluss** zur Steuerung. Hier werden Prozesszustände mit Sensoren erfasst, in der Steuerung verarbeitet und an Aktoren weitergegeben, die den technischen Prozess beeinflussen. Technische Anlagen wirken in ihrer **Verarbeitungsart** auf den Material-, Energie- oder Informationsfluss ein. Dabei unterscheidet man zwischen **kontinuierlichen und diskreten Prozessen**.

Kontinuierliche Prozesse:

- energetische Prozesse (Kraftwerke),
- chemische Prozesse (Chemieanlagen),
- thermische Prozesse (Heizungen).

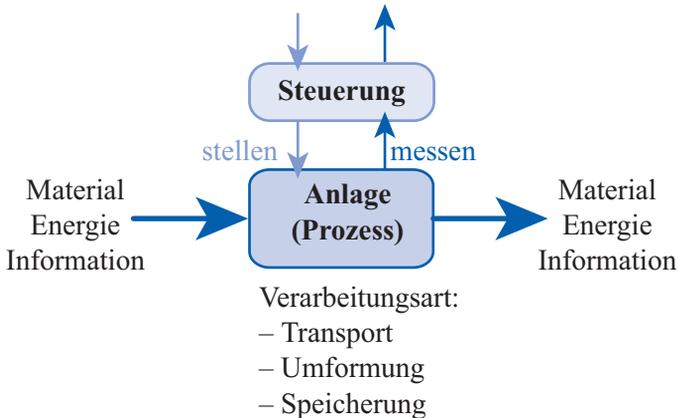


Bild 1.1 Der industrielle Prozess

Diskrete Prozesse

- Fertigungsprozesse (Maschinensysteme),
- Lagerprozesse (Hochregallager),
- Transportprozesse (Verkehrssysteme).

In der Praxis sind oft beide Prozesstypen parallel anzutreffen.

1.2 Definition von Steuerung und Regelung

1.2.1 Steuerung

Steuern bedeutet nach DIN 19 226:



„Steuern ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.“

Kennzeichen für das Steuern ist der **offene Wirkungsweg**, bei dem die durch die Eingangsgröße beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.

Die Erfassung der Eingangsgrößen erfolgt über Sensoren, die überwiegend binär arbeiten (Ein/Aus, Sollwert über-/unterschritten usw.).

Exemplarisch: Heizungssteuerung (Warmwasserheizung)

Ziel der als Beispiel in Bild 1.2 gezeigten Heizungssteuerung ist es, die Raumtemperatur x_a auf einem konstanten Wert zu halten. Dies geschieht mit Hilfe eines Heizkörpers mittels Verstellen des Heizungsventils.

Die Raumtemperatur wird sich ändern, wenn sich die Außentemperatur ändert. Die Außentemperatur wirkt also als sog. **Störgröße** z_1 . Die Raumtemperatur kann

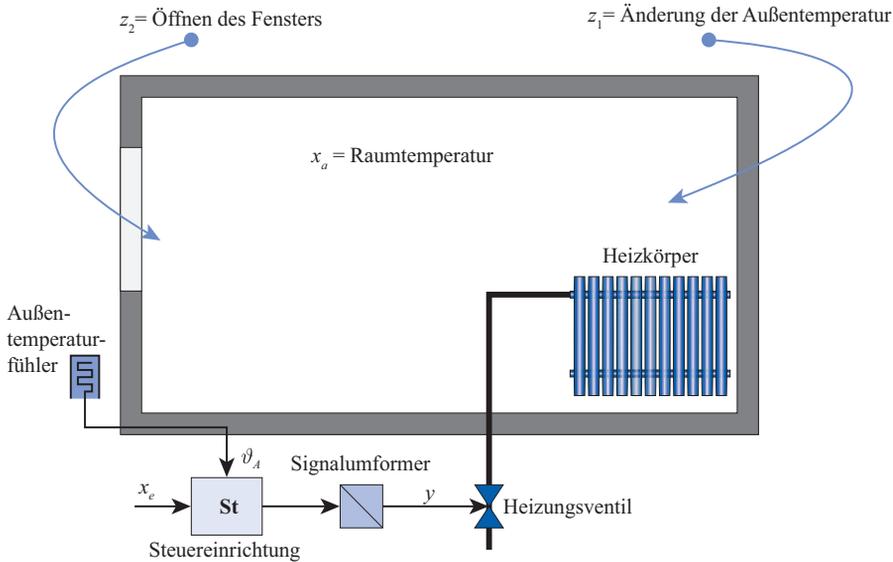


Bild 1.2 Raumtemperatursteuerung

konstant gehalten werden, indem ein geeignetes Steuergerät den Heizwasserdurchfluss verstellt, wenn die Außentemperatur z_1 sich ändert.

Kennt man nun den Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der für das Konstanthalten der Raumtemperatur notwendigen Heizleistung x_e , so kann durch eine entsprechende Steuerung diese Störgröße in ihrer Wirkung kompensiert werden.

Es können jedoch noch weitere Störgrößen (z_2) auftreten, z.B. das Öffnen eines Fensters oder einer Tür usw. Die Wirkung dieser Störgrößen auf die Raumtemperatur wird durch das Steuerungssystem nicht aufgehoben.

Der Wirkungsablauf der Heizungssteuerung zeigt, dass zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße ein bestimmtes Verhalten vorhanden ist.

Das Kennzeichen der Steuerung ist der offene Wirkungskreislauf über die **Steu-erkette**, wie sie in Bild 1.3 dargestellt ist.

Man erkennt hierbei deutlich die offene, rückwirkungsfrei angenommene Steu-erkette. Dabei bedeutet rückwirkungsfrei, dass die Eingangssignale x_e die Stellgröße y , diese aber nicht x_e beeinflusst. Sind keine Störungen vorhanden, so ist x_a eindeutig nur von x_e abhängig.

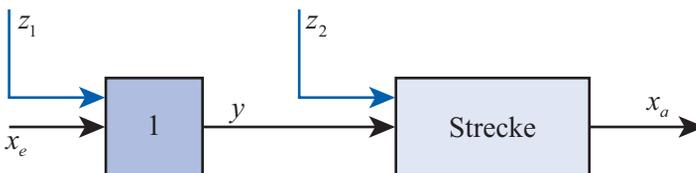


Bild 1.3 Signalflussplan der offenen Steu-erkette