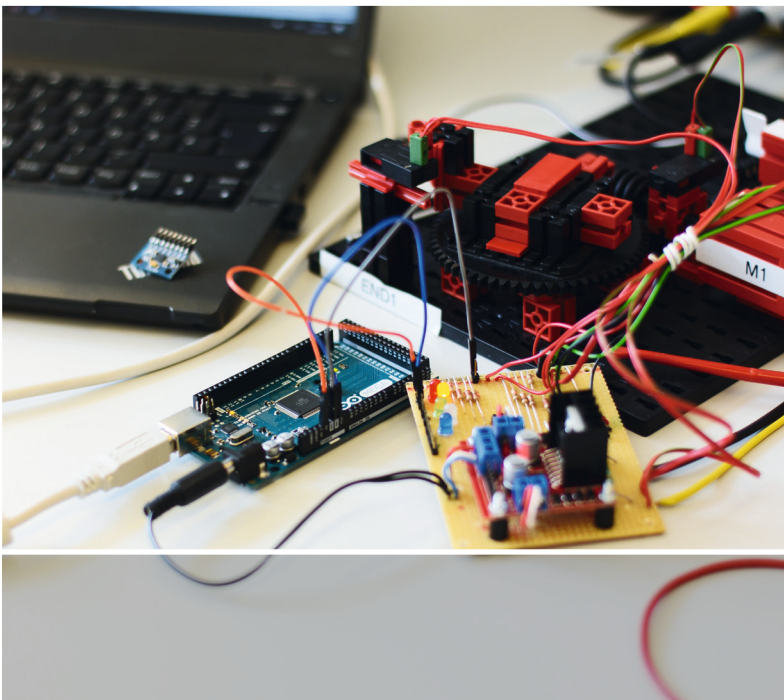


Heinz Mann
Horst Schiffelgen
Rainer Froriep
Klaus Webers

Einführung in die Regelungstechnik

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



12., neu bearbeitete Auflage

HANSER

Mann/Schiffelgen/Froriep/Webers
Einführung in die Regelungstechnik



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Heinz Mann † • Horst Schiffelgen † • Rainer Froriep • Klaus Webers

Einführung in die Regelungstechnik

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

12., neu bearbeitete Auflage

Mit 270 Bildern

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dipl.-Ing. Heinz Mann †

Prof. Dr.-Ing. Horst Schiffelgen †

Prof. Dr.-Ing. Rainer Froriep, Hochschule München

Prof. Dr.-Ing. Klaus Webers, Hochschule München



Alle in diesem Buch enthaltenen Programme, Verfahren und elektronischen Schaltungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

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 dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN: 978-3-446-45002-8

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Manuel Leppert, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Covergestaltung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

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

Vorwort	5
1 Einleitung	15
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
2 Analoge Übertragungsglieder	43
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 ₁ -Glied	113
2.8.3	P-T ₂ -Glied	116
2.8.4	T ₁ -Glied	122
2.8.5	I- und I-T ₁ -Glied	123
2.8.6	D- und D-T ₁ -Glied	126
2.8.7	Übersicht	129
3	Regelstrecken	130
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
4	Analoge Regler	155
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
5	Analoger Regelkreis	186
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
6	Digitale Reglerrealisierung (DDC)	247
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

7	Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke	269
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
8	Digitale Übertragungsglieder	288
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
9	Digitaler Regelkreis	309
9.1	Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern	310
9.2	Einstellverfahren, Einstellregeln	312
10	Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller)	315
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
11	Rapid Control Prototyping	340
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
Anhang	350
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
Ergänzende und weiterführende Literatur	388
Literatur zu Matlab/Simulink	391
Normen und Richtlinien	392
Formelzeichen	394
Glossar	399
Index	407

1

Einleitung

■ 1.1 Erste Orientierung

Fast jedes innovative technische Gerät enthält automatische Steuerungen und Regelungen: von der Unterhaltungselektronik bis zur Klimatechnik, von medizintechnischen Apparaten bis zu Fahrzeugen zu Lande, zu Wasser und in der Luft, von Mikrosystemen bis zur Raumstation. Der Einsatz von Mikrorechnern zur Steuerung und Regelung eröffnet immer neue technische Fortschritte, zur Zeit vor allem in der Mechatronik und in der internetbasierten Vernetzung von Maschinen und Prozessen. Entwicklungen wie „Internet of Things“ oder „Cyber-Physical-Systems“ sind ohne Regelungstechnik als zugrundeliegender Technologie nicht denkbar. In Geräte, Fahrzeuge oder Anlagen „eingebettete“ Mikrorechner (sog. **embedded control**) können Schnelligkeit und Genauigkeit, Sicherheit und Effizienz erhöhen. Erreicht wird dies durch gezielte Beeinflussung von physikalischen Größen wie z. B. Drehzahl, elektrische Spannung, Druck oder Temperatur.

Zum Beispiel muss die Zielführung eines Roboterarms zum Setzen eines Schweißpunkts in der automatischen Serienfertigung exakt erfolgen. In der Klimatechnik sollen Innenräume möglichst energieschonend auf gewünschten Temperaturen gehalten werden, z. B. durch automatische Anpassung an die Außentemperatur. Beatmungsmaschinen greifen automatisch bei aussetzender Atmung ein. Flugzeuge werden mit Autopiloten automatisch auf Geschwindigkeit, Höhe und Kurs gehalten. Die Sicherheit von Kraftfahrzeugen kann z. B. durch automatisches Bremsen bei Hindernissen oder automatisches Gegenlenken bei Seitenböen erhöht werden. Aktuelle Weiterentwicklungen in Richtung automatisiertem Fahren erfordern darüber hinaus sogar die exakte Einhaltung vollständiger Bewegungsstrajektorien und Geschwindigkeitsprofile. In allen Fällen ist ein bestimmtes zeitliches Verhalten gefordert, das mittels automatischer Steuerungen und Regelungen zu gewährleisten ist.

Wie funktioniert eine automatische Steuerung oder Regelung? Das ist nicht so offensichtlich. Denn wenn man Bauteile mit Beschriftungen wie Steuergerät, Regler, Controller oder ihre Einzelteile anschaut, wird man kaum schlauer. Auf einer internationalen Tagung wurde von der Regelungstechnik als „hidden technology“ (versteckte Technologie) gesprochen.

Interessanterweise kann man aber selbst ausprobieren, was ein Regler macht, da auch jeder Mensch als Regler tätig ist. Bevor man z. B. unter die Dusche geht, dreht man so lange am Warm- bzw. Kaltwasserhahn, bis das Wasser die gewünschte Temperatur aufweist. Beim Radio dreht man so lange am Lautstärkeknopf, bis die Lautstärke den gewünschten Wert

hat. Beim Fahrradfahren lenkt man immer so, dass man parallel zum Straßenrand fährt. In allen Fällen ist ein gewünschter Wert zu erreichen (Wassertemperatur, Lautstärke, Fahrweg). Als *Regeln* oder **Regelung** bezeichnet man den Vorgang, einen tatsächlichen Wert (sog. Istwert) mit einem gewünschten Wert (sog. Sollwert) fortlaufend zu vergleichen und den tatsächlichen Wert entsprechend zu korrigieren (mittels Kalt-/Warmwasserhahn, Lautstärkeknopf bzw. Fahrradlenker). **Automatisch** ist eine Regelung, wenn das Messen der tatsächlichen Werte, das Vergleichen mit gewünschten Werten und der korrigierende Eingriff ohne bewusstes menschliches Zutun *selbsttätig* ausgeführt werden.

Als *Steuern* oder **Steuerung** bezeichnet man einen Vorgang, bei dem eine Größe beeinflusst wird ohne sie dabei zu beobachten bzw. zu messen. Zum Beispiel wird die Duschwassertemperatur *gesteuert*, wenn Kalt- bzw. Warmwasserhahn aufgedreht werden, ohne zu prüfen, ob das Wasser tatsächlich die gewünschte Temperatur hat.

Das Steuern und das Regeln sind Vorgänge. Ihre Funktion kann man somit nicht am bloßen Aussehen von Steuergeräten oder ihrer elektronischen, mechanischen oder optischen Komponenten, sondern nur am **zeitlichen Verhalten** des gesteuerten oder geregelten technischen Systems erkennen.

Software ist auch in der Regelungstechnik ein wichtiges Arbeitsmittel. Sie erleichtert Berechnungen bei der Entwicklung von Steuerungen und Regelungen. Dabei ist vor allem auch die **Simulation** von großer Bedeutung, da mit ihr das zeitliche Verhalten von Geräten, Anlagen oder Fahrzeugen vor der Inbetriebnahme sehr genau vorausbestimmt werden kann (Beispiel: Flugsimulator). Zudem wird Software in digitalen Steuergeräten oder Microcontrollern auch direkt zum Bestandteil technischer Produkte (Beispiel: Bordcomputer als Autopilot).

Eine Software, die weltweit in der regelungstechnischen Ausbildung und Berufspraxis eingesetzt wird und als Standardsoftware gilt, ist **Matlab/Simulink**. Auf der Website zum Buch www.hm.edu/fb06/MSFRegelungstechnik/ werden zahlreiche Matlab/Simulink-Programme angeboten, die das Verständnis des Stoffes fördern und zugleich einen Einstieg in den Umgang mit professioneller regelungstechnischer Software bieten sollen. Das WWW-Symbol am Seitenrand weist im Buch auf diese und andere Inhalte der Website hin.



Die Begriffe der Regelungstechnik werden übrigens auch in den verschiedensten nicht-technischen Fachgebieten angewendet wie z. B. in der Biologie, Medizin, Psychologie und Volkswirtschaft, wenn es um Untersuchung oder Gestaltung von Vorgängen geht. Als Regelungen lassen sich z. B. erklären: die Konstanthaltung der menschlichen Körpertemperatur, die Erhaltung des Körpergleichgewichts, die Anpassung der Muskeltätigkeit an unterschiedliche Belastungsgrade, die Veränderung der Augenpupille bei wechselnder Lichtstärke, die Anpassung der Herzfrequenz an die jeweilige körperliche Belastung. Im wirtschaftlichen Bereich kann z. B. die Konstanthaltung des Gleichgewichtes zwischen Angebot und Nachfrage als Regelung dargestellt werden.

Die Regelungstechnik stellt Methoden und Hilfsmittel bereit für eine systematische Entwicklung von Regelungen nach vorgegebenen Anforderungen (Spezifikationen, Abschn. 1.5). Das Verhalten von Regelungen ist auf Grund der für sie typischen **Rückkopplungen** häufig nicht ganz einfach zu beherrschen und kann bei einer Produktentwicklung zu hohen Kosten oder unbefriedigenden Lösungen führen. Um das Verhalten von Regelungen zu verstehen, ist es sinnvoll, mit dem Steuern zu beginnen, da das Steuern zu den elementaren Bestandteilen jeder Regelung gehört.

■ 1.2 Steuerung

Eine Größe $u(t)$ steuert eine Größe $v(t)$, wenn sie sie beeinflusst, ohne selbst von ihr beeinflusst zu werden, d.h. **ohne Rückwirkung** oder **rückwirkungsfrei**. Es folgen verschiedene physikalische Beispiele für die Größen u und v (Bild 1.1).

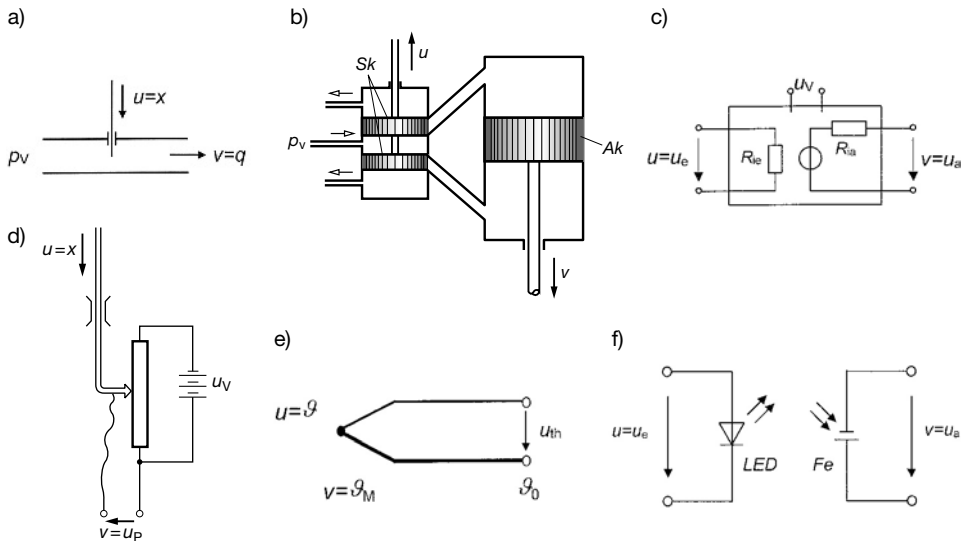


Bild 1.1 Steuerung von Größen, u steuernde und v gesteuerte Größe
a) Schieber b) Hydraulischer Antrieb c) Spannungsverstärker
d) Potentiometer e) Thermoelement f) Optokopplerprinzip

Beispiel 1.1: Rückwirkungsfreie Beeinflussung von Größen

Bild 1.1a zeigt eine Rohrleitung mit **Schieber**. Mit der Schieberstellung x (in m) lässt sich der Durchfluss q (in kg/s) einer Flüssigkeit verändern, die vor dem Schieber mit einem Versorgungsdruck p_v ansteht. Eine Rückwirkung auf die Schieberstellung x ist meistens vernachlässigbar, da die Kraftwirkung der Strömung senkrecht zur Bewegungsrichtung des Schiebers angreift.

Bei dem **hydraulischen Antrieb** in Bildteil b beeinflusst die Stellung u (in m) der beiden Steuerkolben Sk die Geschwindigkeit v (in m/s) des Arbeitskolbens Ak mittels einer Flüssigkeit, die mit dem Versorgungsdruck p_v ansteht. Stehen die Sk z.B. etwas oberhalb der gezeigten Mittelstellung, dann bewegt sich Ak mit konstanter Geschwindigkeit nach unten. Eine Rückwirkung auf die Steuerkolbenstellung u ist meist vernachlässigbar, weil sich die Kräfte auf die beiden Steuerkolben nahezu aufheben.

Bildteil c zeigt ein Ersatzschaltbild eines **Spannungsverstärkers**, dessen Eingangsspannung u_e (in V) die Ausgangsspannung u_a (in V) rückwirkungsfrei beeinflusst. Die Eingangsspannung u_e steuert eine Spannungsquelle mit der Versorgungsspannung u_v . Durch einen sehr großen Eingangswiderstand R_{ie} (Stromaufnahme nahezu null) wird eine

Rückwirkung des Verstärkers auf u_e vernachlässigbar. Einen Spannungsverstärker mit $u_a = u_e$ nennt man **Trennverstärker**.

Bildteil d zeigt ein **Potentiometer**, bei dem die Schleiferstellung x (in m) eine Spannung u_p (in V) steuert, die von einer Versorgungsspannung u_v abgegriffen wird. Eine Änderung der beeinflussten Größe u_p z.B. durch Veränderung von u_v oder einen angeschlossenen Lastwiderstand hat keine Rückwirkung auf die Schleiferstellung x . Eine rückwirkungsfreie Weiterverarbeitung der Spannung u_p kann z.B. mit einem Trennverstärker erfolgen. Auch ohne Versorgungsenergie ist rückwirkungsfreie Beeinflussung möglich:

Das **Thermoelement** in Bildteil e erzeugt eine Thermospannung u_{th} zwischen zwei Leitern aus verschiedenem Material (sog. *Seebeck-Effekt*), wobei u_{th} zur Differenz $\vartheta_M - \vartheta_0$ proportional ist (ϑ_M : Temperatur der Messspitze, ϑ_0 : bekannte Temperatur). Mit einem Thermoelement kann die Temperatur ϑ eines Mediums gemessen werden, wenn die Messgröße ϑ die Temperatur ϑ_M der Messspitze und damit die Thermospannung u_{th} rückwirkungsfrei beeinflusst. Das ist nur näherungsweise möglich, nämlich dann, wenn die Wärmefähigkeit der Messspitze sehr klein ist im Verhältnis zur Wärmemenge des Mediums. Eine Versorgungsenergie ist dazu nicht erforderlich.

Bildteil f zeigt eine rückwirkungs- und versorgungsenergiefreie Spannungs-Spannungs-Beeinflussung mittels optischer Übertragung (Prinzip eines sog. **Optokopplers**). Als Lichtsender dient eine Lumineszenzdiode (LED), als Lichtempfänger ein Fotoelement Fe. Aus der Eingangsspannung u_e entsteht in der LED eine Lichtstärke. Das Fotoelement wird durch Lichteinwirkung zu einer Spannungsquelle für u_a . Ausgangsseitige Schwankungen von u_a haben keine Rückwirkung auf die Lichtstärke der LED bzw. u_e .¹ ■

Der Zusammenhang zwischen steuernder und gesteuerter Größe $u(t)$ bzw. $v(t)$ kann anschaulich mit Rechteck (sog. Block) und Pfeilen als Blockschema² dargestellt werden (Bild 1.2a). Ein Pfeil (sog. **Wirkungslinie**) gibt die **Wirkungsrichtung** einer Größe an. Ein **Block** steht für die Gesetzmäßigkeit, nach der eine Größe $u(t)$ auf eine Größe $v(t)$ einwirkt. Die Gesetzmäßigkeit ergibt sich aus der Art des realen Systems, in dem sich der Vorgang der Beeinflussung abspielt. Die Gesetzmäßigkeit ist z. B. im Falle der Durchflusssteuerung von Bild 1.1a (Blockschema Bild 1.2b) u. a. durch den Rohrquerschnitt und den Versorgungsdruck p_v bestimmt.

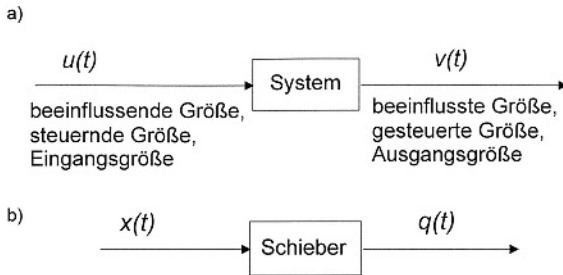
Nach DIN 19226 Teil 1 gilt: Das **Steuern**, die **Steuerung**, ist ein Vorgang³ in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der **offene Wirkungsweg**.⁴

¹ Nicht nur Lichtstrahlung (z. B. auch Infrarot), sondern auch akustische (Ultraschall), elektromagnetische (z. B. Funk, Fernsteuerungen), Flüssigkeits- (z. B. hydraulisches Strahlrohr, Abschn. 11.2.3.1) und Gasstrahlung lassen sich zur rückwirkungsfreien Beeinflussung nutzen.

² Ein Blockschema ist eine gerätetechnisch orientierte Vorstufe zum (mathematisch orientierten) Wirkungsplan in Abschn. 2.2.

³ Ein Vorgang wird allgemein auch als **Prozess** bezeichnet.

⁴ Die Benennung Steuerung wird (missverständlicherweise) vielfach auch für ein Gerät oder eine Anlage verwendet, in der die Steuerung stattfindet.

**Bild 1.2**

Blockschema einer Steuerung
a) allgemein b) Beispiel Bild 1.1a

Die beiden Wirkungslinien in Bild 1.2a stellen einen offenen Wirkungsweg dar. Ein geschlossener Wirkungsweg würde eine Rückwirkung bedeuten, wie z. B. bei der im nächsten Abschnitt behandelten Regelung (vgl. Bild 1.12).

Eine Steuerung wird oft **aktiv**, d. h. unter Zuhilfenahme von Energiequellen (sog. Versorgungs- oder **Hilfsenergien**), realisiert (vgl. Bild 1.1a bis d), ist aber auch **passiv**, d. h. ohne Energiequellen, möglich, wie die Bilder 1.1e und f zeigen. Im aktiven Fall steuert oder „stellt“ die Eingangsgröße einen Hilfsenergiestrom (z. B. Versorgungsdruck, -spannung etc.). Man spricht daher auch von einem Energiesteller oder kurz **Steller**. Dessen Ausgangsleistung ist durch die maximale Leistung der Hilfsenergiequelle begrenzt.

Gezielte Beeinflussung mittels Steuerung

Im folgenden Beispiel wird die Aufgabe behandelt, einen Füllstand h gezielt zu beeinflussen, nämlich ihn auf eine bestimmte Höhe zu bringen. Der Füllstand wird als **Aufgabengröße** (Formelzeichen x_A) bezeichnet, da er aufgabengemäß zu beeinflussen ist. Der momentane Wert der Aufgabengröße, der sog. **Istwert**, ist einem gewünschten Wert, dem sog. **Sollwert**, anzugleichen. Ist der Sollwert veränderlich, spricht man auch von der **Führungsgröße** w , der die Aufgabengröße x_A folgen soll. Die erforderliche steuernde Größe wird als **Stellgröße** y bezeichnet.

Beispiel 1.2: Steuerung eines Füllstandes

Der Füllstand h in Bild 1.3a soll so gesteuert werden, dass $h = h_S$. Der Abflussschieber (A_S) sei nicht verschlossen. Somit muss ständig Flüssigkeit zufließen, um den Füllstand h im Tank auf einen Sollwert h_S zu bringen. Stellgröße sei die Stellung s_Z des Zuflussschiebers (Z_S). Mit ihr kann der Füllstand rückwirkungsfrei beeinflusst werden (rechter Block in Bild 1.3b).

Die Steuerung wird von einer Person bewerkstelligt, die sich in einer fensterlosen Steuerwarte (Sw) befindet. Sie erhält die Information über den Sollwert h_S mit Hilfe eines Sollwertestellers (Se), einer verschiebbaren Markierung an einer Skale (Sk), die von außerhalb der Steuerwarte eingestellt wird. Die Person in der Steuerwarte hat die Aufgabe, den Zuflussschieber in der Längsführung Lf so zu bewegen, dass dessen Positionszeiger Sp mit der vorgegebenen Se -Position übereinstimmt (linker Block in Bild 1.3b). Die Verstellenergie wird durch Muskelkraft erbracht. Eine Hilfsenergie ist nicht erforderlich.

Die Diagramme in Bildteil b verdeutlichen den zeitlichen Ablauf: Vor dem Zeitpunkt t_0 sei der Füllstandssollwert $h_S = 0$ m, der Zuflussschieber geschlossen ($s_Z = 0$ m) und der Behäl-

ter leer ($h = 0$ m). Zum Zeitpunkt t_0 wird eine bestimmte Behälterfüllung als Sollwert h_s vorgegeben (linkes Diagramm, schnelle Verstellung von S_e). Nach einer kurzen Reaktionszeit stellt die Person den Zuflussschieber auf die markierte Position ein (mittleres Diagramm). Daraufhin steigt der Füllstand h im Tank an (rechtes Diagramm), was je nach Versorgungsdruck p_v und Tankvolumen mehr oder weniger langsam erfolgt. Der gepunktet eingezeichnete Sollwertverlauf h_s (Übertrag vom linken Diagramm) wird erst nach einer **Verzögerung** erreicht (phys. Erläuterung in Beispiel 2.13). ■

Der Block zwischen Stellgröße y und Aufgabengröße x_A wird allgemein als **Strecke**, im Zusammenhang mit einer Steuerung auch **Steuerstrecke** genannt (Bild 1.3b). Dazu gehören im vorhergehenden Beispiel der Schieber, die Zuleitung und der Tank. Der Schieber hat die Funktion eines Stellglieds. Mit einem **Stellglied** wird ein Massen- oder Energiestrom in der Strecke so dosiert, dass die Aufgabengröße aufgabengemäß beeinflusst wird. Im Beispiel greift der Zuflussschieber in einen Massenstrom ein. Das Stellglied wird von der Stellgröße y angesteuert.

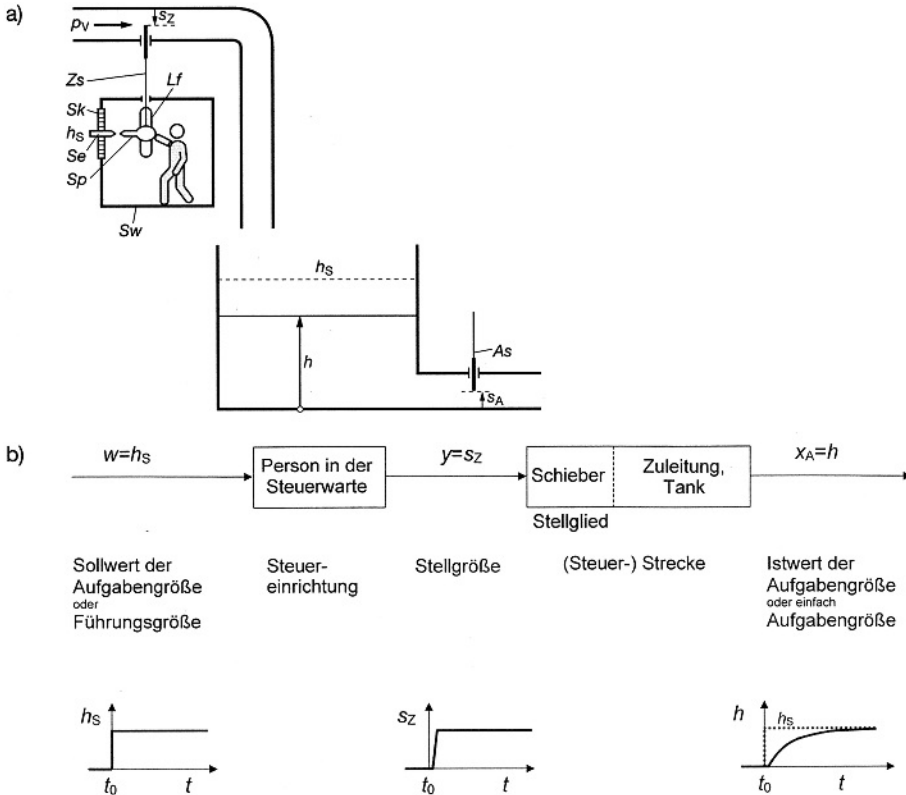


Bild 1.3 Steuerung eines Füllstandes
 a) Geräteschema b) Blockschema, Begriffe, Zeitdiagramme

Der Block zwischen Führungsgröße w und Stellgröße y wird als **Steuereinrichtung** bezeichnet. Dazu gehört im vorhergehenden Beispiel die Steuerwarte mit der Person. Da die Betätigung des Schiebers mit der Muskelkraft des Menschen erfolgt, handelt es sich um eine **Handsteuerung**. Eine selbsttätige oder **automatische Steuerung** ließe sich im obigen Beispiel z.B. so realisieren, dass der Sollwert h_s an einem Potentiometer (Bild 1.1d) eingestellt wird und die Potentiometerspannung über einen Spannungsverstärker (Bild 1.1c) einen elektrischen Schieberantrieb ansteuert.

Falls neben einer Stellgröße y weitere Größen eine Aufgabengröße x_A beeinflussen können, kann es zu Abweichungen des Istwertes vom Sollwert kommen. Eine Größe, die störend auf die Aufgabengröße einwirken kann, heißt **Störgröße** z . Gelegentlich wird aufgeteilt in Last- und Versorgungsstörgrößen z_L bzw. z_V . Bei der Füllstandssteuerung von Bild 1.3a ist die Abflussschieberstellung s_A eine **Laststörgröße** z_L und der Versorgungsdruck p_V eine **Versorgungsstörgröße** z_V . Laststörgrößen sind aus betrieblichen Gründen nicht zu vermeiden, während Versorgungsstörgrößen auf unerwünschte Schwankungen von Versorgungs- oder Hilfsenergien zurückzuführen sind. In Bild 1.4 sind diese Größen als zusätzliche Eingangsgrößen in den Block „Strecke“ eingetragen.

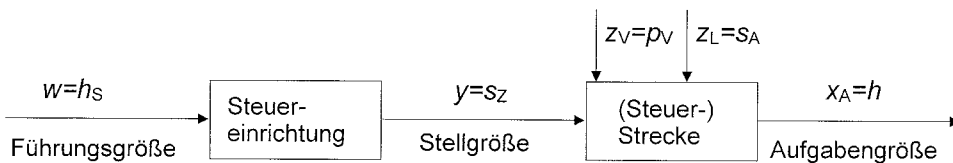


Bild 1.4 Füllstandssteuerung von Bild 1.3 mit Störgrößen
 z_L Laststörgröße, z_V Versorgungsstörgröße

Die Steuereinrichtung von Bild 1.4 kann der Störung der Aufgabengröße durch z_L oder z_V nicht entgegenwirken: Da die Person in Bild 1.3a nicht aus der Steuerwarte hinausschauen kann, hat sie keine aktuelle Information über die Auswirkung von Störungen auf den Füllstand und kann somit auch nicht reagieren. Daher ist die Stellgröße $y = s_z$ in Bild 1.4 nur von der Führungsgröße $w = h_s$ abhängig, jedoch nicht von den Störgrößen z_L oder z_V . Abhilfe kann oftmals eine Erweiterung der Steuereinrichtung bringen, eine sog.

Störgrößenaufschaltung

Wenn eine Störgröße gemessen werden kann, dann kann man den Messwert der Steuereinrichtung zuführen, und zwar so, dass die Stellgröße y die störende Wirkung dieser Störgröße auf die Aufgabengröße x_A teilweise oder ganz aufhebt. z.B. kann mit dem (gegenüber Bild 1.3a zusätzlichen) Hebelgestänge in Bild 1.5a der störende Einfluss von Änderungen der Abflussschieberstellung $z_L = s_A$ auf den Füllstand verringert werden: Eine Vergrößerung von s_A hat automatisch eine Vergrößerung der Zuflussschieberstellung $y = s_z$ zur Folge (die Steuerwarte bewegt sich zusammen mit dem linken Hebelarm). Der Sollwert h_s kann nach wie vor von außen vorgegeben und von der Person in der Steuerwarte eingestellt werden (vgl. Beispiel 1.2). Das Hebelgestänge realisiert einen zweiten Wirkungsweg von der Störgröße $z_L = s_A$ zur Aufgabengröße $x_A = h$, wie aus dem Blockschema Bild 1.5b hervorgeht, wobei sich die beiden Wirkungen auf den Füllstand $x_A = h$

gegenseitig aufheben, wenn sie gleichzeitig eintreffen und in gleicher Stärke gegensinnig einwirken. Die Aufspaltung des Wirkungsweges der Störgröße z_L wird mit einem dicken Punkt dargestellt (sog. **Verzweigungsstelle**). Man beachte, dass das Blockschema keinen Wirkungskreis darstellt, sondern zwei Wirkungswege von $z_L = s_A$ auf die Aufgabengröße $x_A = h$. Man nennt dieses Verfahren, bei dem eine Störgröße gemessen und der Steuereinrichtung zugeführt („aufgeschaltet“) wird, **Störgrößenaufschaltung**.

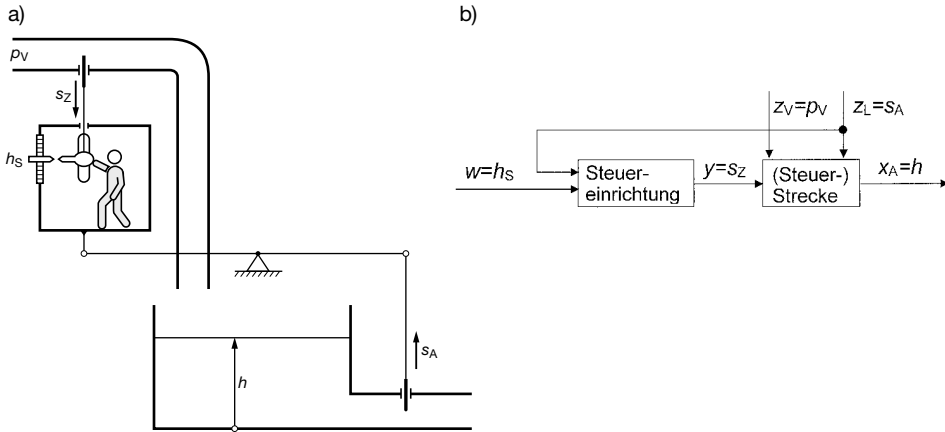


Bild 1.5 Füllstandssteuerung mit Aufschaltung der Störgröße s_A
 a) Geräteschema b) Blockschema einer Störgrößenaufschaltung

Beispiel 1.3: Raumtemperatursteuerung mit Störgrößenaufschaltung

In Bild 1.6 soll die Temperatur ϑ in einem Raum R mit dem Heizkörper Hk auf einem konstanten Wert ϑ_S gehalten werden. Dominierende Laststörgröße ist eine niedrigere Außentemperatur ϑ_a , die zu einem Wärmeabstrom W_s , z.B. am Fenster führt. Der Sollwert ϑ_S wird eingestellt, indem die Zuflussschieberstange ZSt in der Längsführung Lf auf den gewünschten Wert auf der ϑ_S -Skale geschoben und befestigt wird. Vor dem Zuflussschieber Z_s steht Heizwasser mit der Temperatur ϑ_V und dem Versorgungsdruck p_V an. ϑ_V und p_V sind Versorgungsstörgrößen. ϑ_a wird gemessen und aufgeschaltet, indem sich z.B. bei steigendem ϑ_a die Flüssigkeit Fl ausdehnt, den Faltenbalg Ba verlängert und damit die Zuflussschieberöffnung s_Z verkleinert. Es ergibt sich das gleiche Blockschema einer Störgrößenaufschaltung wie in Bild 1.5b, hier mit den Größen $x_A = \vartheta$, $w = \vartheta_S$, $y = s_Z$, $z_L = \vartheta_a$, $z_{V1} = \vartheta_V$ und $z_{V2} = p_V$.

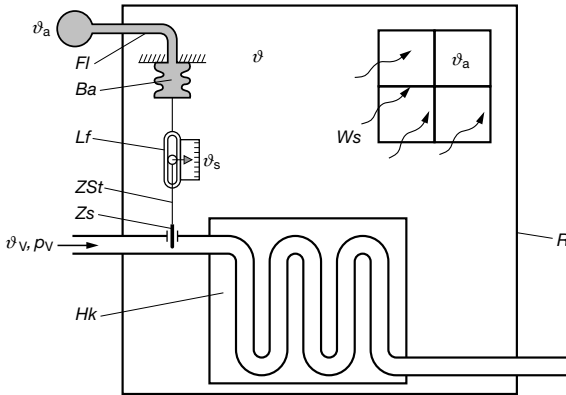


Bild 1.6 Raumtemperatursteuerung mit Aufschaltung der Störgröße ϑ_a ■

Man kann prinzipiell auch mehrere Störgrößen messen und aufschalten. Jedoch ist dann häufig eine Regelung die bessere Lösung (vgl. Abschn. 1.3).

Mit der Führungsgröße w wird das geforderte zeitliche Verhalten der Aufgabengröße x_A vorgegeben (Bild 1.3b). Will man z.B. eine Raumtemperatur nachts absenken, dann wird mit der Führungsgröße w der gewünschte Tag- und Nachtverlauf der Raumtemperatur zeitabhängig vorgegeben (**zeitgeführte Steuerung, Zeitplansteuerung**).

Steuerungstechnik

Die **Steuerungstechnik** befasst sich vor allem mit Steuereinrichtungen, deren Eingangs- und Ausgangsgrößen jeweils nur zwei Werte annehmen können, z.B. 0 V und 24 V oder 0 und 1.⁵ Häufig werden diese Steuereinrichtungen mittels **SPS** (Speicherprogrammierbare Steuerungen) realisiert. Dabei handelt es sich um auf die Belange der Steuerungstechnik zugeschnittene, modular zusammenstellbare Mikrorechnersysteme mit Baugruppen wie z.B. Zentraleinheit, Eingabe, Ausgabe, Zeitglieder, Zähler etc. und zugehöriger Software für Realzeitbetrieb. Zur SPS-Technik gibt es umfangreiche Spezialliteratur. Für eine Übersicht zu diesem Thema sei z.B. auf das Werk von Seitz verwiesen. Es folgt ein kleines Beispiel zur Steuerungstechnik.

Beispiel 1.4: Steuerung eines Türschlosses

Bild 1.7 zeigt ein zweigeschossiges Haus mit einer Tür im Erdgeschoss. Die Tür soll von jedem Geschoss aus entriegelt werden können. Dazu befindet sich in jeder Wohnung ein Taster T1 bzw. T2, der nur zwei Zustände annehmen kann: betätigt oder nicht betätigt. Das Schloss S der Haustür kann ebenfalls nur zwei Zustände annehmen: entriegelt bzw. nicht entriegelt. Die Steuereinrichtung, z.B. eine SPS, verknüpft die zweiwertigen Größen gemäß den Regeln der booleschen Algebra z.B. so, dass ein Relais das Türschloss entriegelt, wenn T1 ODER T2 betätigt ist. Die SPS kann auch ein Zeitglied enthalten, das das Türschloss nach Betätigung eines Tasters automatisch eine bestimmte Zeit lang entriegelt hält. Die Türschlosssteuerung erfordert elektrische Hilfsenergie.

⁵⁾ Vgl. DIN 19226-3: Begriffe zum Verhalten von Schaltsystemen.

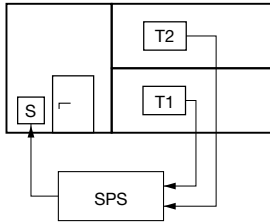


Bild 1.7
Steuerung eines Türschlosses

■ 1.3 Regelung

Eine Regelung unterstützt die gezielte Beeinflussung einer Größe, indem eine Rückwirkung eingesetzt wird, um Abweichungen von einem gewünschten Wert (Sollwert, Führungsgröße) entgegenzuwirken, und zwar unabhängig von deren Ursache (z. B. Änderungen von Störgrößen). Zum Vergleich mit der Steuerung (Beispiel 1.2) soll die gezielte Beeinflussung eines Füllstandes nun mittels Regelung behandelt werden.

Beispiel 1.5: Regelung eines Füllstandes

Die Strecke ist die gleiche wie bei der Steuerung in Bild 1.3b bzw. 1.4. Sie ist hier als Regelstrecke im Blockschema von Bild 1.8c enthalten. Neu ist das Hebelgestänge in Bildteil a, das den Schwimmer S mit dem Zuflussschieber Zs verbindet.

Um die Funktion dieses Systems zu verstehen, wird von einem **Gleichgewichtszustand** ausgegangen. Das ist ein Zustand, bei dem alle betrachteten Größen konstant sind. Zum Beispiel kann man unter Laborbedingungen den in Bild 1.8a gezeigten Zustand erreichen, wobei die beiden Störgrößen p_V und s_A konstant sind und s_Z gerade so eingestellt ist, dass Zustrom gleich Abstrom gilt und der Füllstand h genau auf seinem Sollwert h_S steht. Die Schwimmerstange St sei in der Längsführung Lf an der gezeigten Stelle befestigt.

Nun wird ein Regelvorgang ausgelöst, indem die Abflussschieberstellung s_A zu einem Zeitpunkt t_0 weiter geöffnet wird (in Bild 1.8d näherungsweise stufenförmig dargestellt). Daraufhin sinkt der Füllstand $x_A = h$ unter seinen Sollwert h_S ab (Bild 1.8d). Der Schwimmer zieht den rechten Hebelarm nach unten (Bild 1.8b), wodurch der andere Hebelarm den Zuflussschieber automatisch weiter öffnet. Dadurch steigt der Füllstand h wieder an, erreicht jedoch seinen Sollwert h_S nicht mehr, wenn die Störung s_A (d. h. eine vom Gleichgewichtszustand abweichende Abflussschieberstellung) bestehen bleibt (Bild 1.8d). Es bleibt nach dem Regelvorgang eine Abweichung $h_S - h$ zwischen Soll- und Istwert des Füllstandes bestehen. Es ist nicht schwer, sich diese Tatsache physikalisch zu erklären. Für den Betrieb der Regelung ist keine Hilfsenergie erforderlich, wenn Auftrieb bzw. Gewicht des Schwimmers zum Verstellen des Zuflussschiebers ausreichen.

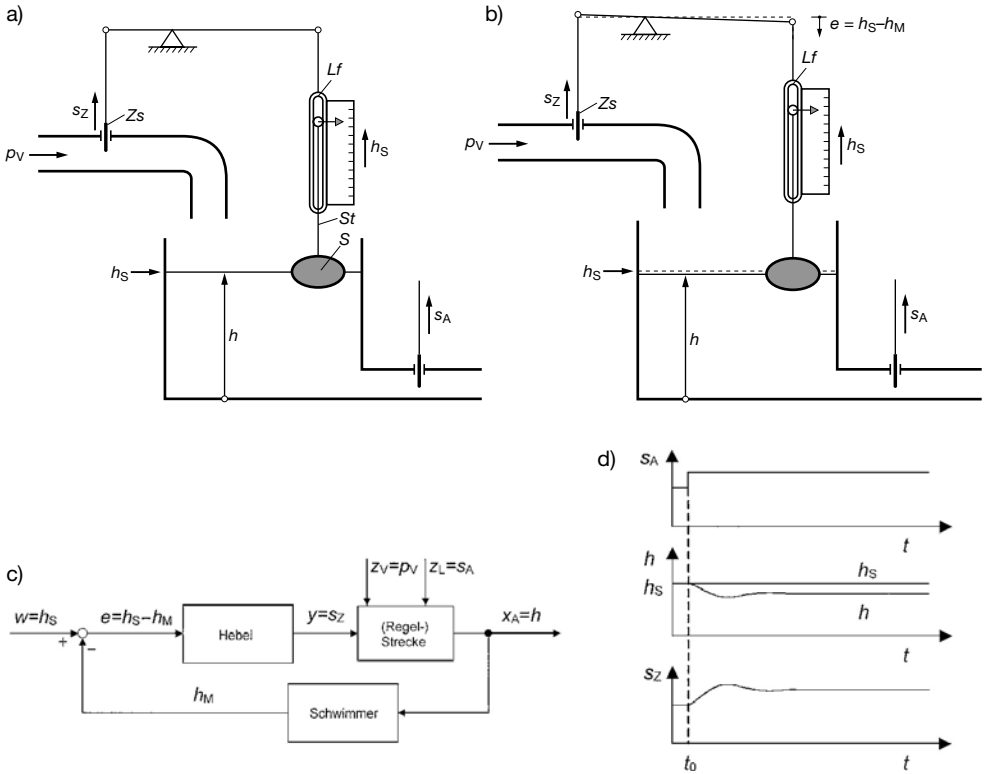


Bild 1.8 Regelung eines Füllstandes
 a) Füllstand auf Sollhöhe h_s b) Füllstand weicht vom Sollwert ab
 c) Blockschema einer Regelung d) Ein Regelvorgang

Das Blockschema in Bild 1.8c zeigt einen Wirkungsweg, der vom Füllstand h über Schwimmer, Hebel und Zuflussschieberstellung s_z wieder zum Füllstand h führt. Das ist ein **geschlossener Wirkungsweg**, über den der Füllstand h auf sich selbst zurückwirkt. Betrachtet man die einzelnen Blöcke auf dem Wirkungsweg, so wird die Wirkung vom jeweiligen Eingang zum Ausgang rückwirkungsfrei weitergereicht. Der Block „Schwimmer“ steht für eine rückwirkungsfreie Beeinflussung der Position h_M des rechten Hebelarmes durch den Füllstand (trifft zu, wenn Änderungen der Eintauchtiefe des Schwimmers - z.B. durch Rückwirkung eines schwergängigen Zuflussschiebers - vernachlässigt werden können). Die Differenz $e = h_s - h_M$ (sog. **Regeldifferenz**) wird im Blockschema mit einem kleinen Kreis, einer sog. **Additionsstelle**, dargestellt. Der Block „Hebel“ steht für die Gesetzmäßigkeit, nach der die Füllstandsabweichung e die Zuflussschieberstellung s_z steuert.

Da die Wirkungen auf dem geschlossenen Wirkungsweg ohne zeitliche Unterbrechung erfolgen, liegt ein fortlaufender **geschlossener Wirkungsablauf** vor, der als **Regelkreis** bezeichnet wird. ■

Bei einer Regelung wird der Istwert (im Beispiel der Füllstand h) fortlaufend so beeinflusst, dass seine Abweichung von einem Sollwert verringert oder beseitigt wird, wobei die physikalische Ursache dieser Abweichung keine Rolle spielt. Eine Regelung unterstützt die gezielte Beeinflussung einer Größe, indem sie *jeder* Abweichung von einem Sollwert entgegenwirkt, ob sie nun durch Änderungen von Störgrößen oder auch der Führungsgröße verursacht wird. Im obigen Beispiel wird die Zuflussschieberstellung s_z in Abhängigkeit von den Füllstandsabweichungen $e = h_s - h$ verstellt, unabhängig davon, ob die Führungsgröße h_s oder Störgrößen sie verursacht haben, wobei auch weitere Störgrößen einwirken können (z. B. Verdunstung, zusätzliche Flüssigkeitszufuhr etc.).

Für die Funktionsfähigkeit einer Regelung ist der korrekte **Wirkungssinn** im geschlossenen Wirkungsablauf wesentlich. Im obigen Beispiel muss bei unter den Sollwert sinkendem Füllstand die Zuflussschieberstellung s_z so verändert werden, dass der Füllstand wieder ansteigt. D. h., der Füllstand soll mit *umgekehrtem* Wirkungssinn auf sich selbst zurückwirken (h fallend muss h steigend zur Folge haben und umgekehrt). Ungeeignet wäre ein Hebelgestänge, das bei unter den Sollwert fallendem Füllstand den Zuflussschieber weiter schließt: Der Füllstand würde sich noch weiter vom Sollwert entfernen, man spricht von **instabilem Verhalten**. Eine solche Regelung wäre unbrauchbar.

Beispiel 1.6: Regelung einer Raumtemperatur

Wie bei der Steuerung von Beispiel 1.3 soll eine Raumtemperatur ϑ gezielt beeinflusst werden: Sie soll mit dem Heizkörper Hk auf einem konstanten Wert ϑ_s gehalten werden. Im Gegensatz zur Steuerung in Bild 1.6 wird nun die Raumtemperatur ϑ gemessen. Die Zeitdiagramme von Bild 1.9b zeigen bis zu einem Zeitpunkt t_0 einen Gleichgewichtszustand, wobei $\vartheta = \vartheta_s$. Zum Zeitpunkt t_0 ist dem oberen Diagramm ein plötzlicher Abfall der Außentemperatur ϑ_a zu entnehmen (näherungsweise stufenförmig dargestellt). Die Diagramme darunter zeigen die Auswirkung auf Raumtemperatur ϑ und Zuflussschieberstellung s_z mit und ohne Regelung.

Im Fall der in Bildteil a gezeigten Regelung lässt eine unter den Sollwert ϑ_s fallende Raumtemperatur ϑ (mittleres Diagramm) das Volumen einer Dehnungsflüssigkeit Fl sinken. Der Faltenbalg Ba zieht sich zusammen und vergrößert die Zuflussschieberstellung s_z (Bild 1.9b unten) und damit den Zustrom von Heizwasser, das mit der Temperatur ϑ_v und dem Druck p_v ansteht, in den Heizkörper Hk. Dieser lässt die Raumtemperatur ϑ wieder ansteigen, kann jedoch den Sollwert ϑ_s - bei weiterhin unter dem Gleichgewichtszustand liegender Außentemperatur ϑ_a - nicht erreichen. (Warum?) Es liegt ein Regelkreis entsprechend Bild 1.8c vor, wobei hier $x_A = \vartheta$, $e = \vartheta_s - \vartheta$, $y = s_z$, $z_L = \vartheta_a$, $z_{V1} = \vartheta_v$ und $z_{V2} = p_v$. Hilfsenergie ist für die Verstellung des Zuflussschiebers nicht erforderlich. Der Sollwert ϑ_s wird verändert, indem die Zuflussschieberstange ZSt in der Längsführung Lf auf den gewünschten Skalenwert geschoben und befestigt wird. Die Regelung wirkt *allen* Störeinflüssen auf die Raumtemperatur ϑ entgegen (z. B. Fenster öffnen, Versorgungsstörungen etc.), während die Störgrößenaufschaltung in Bild 1.6 nur dem störenden Einfluss der aufgeschalteten Außentemperatur ϑ_a entgegenwirkt.

Den Fall ohne Regelung (gestrichelt) kann man sich so vorstellen, dass alle an der Zuflussschieberstange ZSt hängenden Geräte entfernt worden sind. Dann hat die Außentemperatur ϑ_a keinen Einfluss auf die Zuflussschieberstellung s_z . Somit wird einem Abfall der Raumtemperatur ϑ nicht entgegengewirkt.

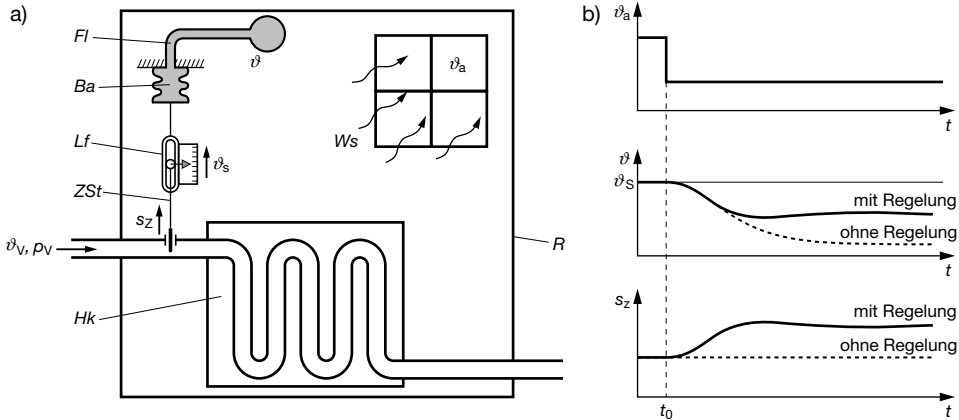


Bild 1.9 Regelung einer Raumtemperatur
a) Anlagenschema b) Vorgang mit und ohne Regelung



■ m0109b

Eine Regelung kann bei einer Stör- oder Führungsgrößenänderung eine Soll-/Istwert-Abweichung e nicht völlig vermeiden. Eine anfängliche Abweichung e ist vielmehr erforderlich, um die Stellgröße (z. B. Zuflussschieberstellung s_z) so zu verändern, dass der Istwert (z. B. Raumtemperatur ϑ) dem Sollwert wieder angeglichen wird. Kann man dagegen eine Störgröße (z. B. die Außentemperatur ϑ_a) messen, *bevor* sie sich auf den Istwert auswirkt, dann kann rechtzeitig gegengesteuert und eine Soll-/Istwert-Abweichung *vollständig* vermieden werden. Dies lässt sich mittels **Störgrößenaufschaltung** erreichen, die in Abschn. 1.2 in Verbindung mit einer Steuerung behandelt wurde (Bild 1.5, Beispiel 1.3).⁶

Realisierungsvarianten

Für die Funktionsfähigkeit einer Regelung (wie auch einer Steuerung) ist ein bestimmter Wirkungsablauf maßgebend. Um einen solchen technisch zu realisieren, hat ein Geräteentwickler oder Anlagenplaner prinzipiell freie Hand bei der Auswahl geeigneter physikalischer Medien. Er kann z. B. elektrische, pneumatische, hydraulische, thermische, optische oder kombinierte Baueinheiten einsetzen. Auch der Mensch kann ein Teil eines Wirkungsablaufs sein, wie das folgende Beispiel zeigt.⁷

⁶) Abschn. 5.6.1 behandelt die Störgrößenaufschaltung in Verbindung mit der Regelung.

⁷) Abschn. 1.5 (Projektphase 3) und 11 gehen ausführlicher auf Realisierungsvarianten ein.

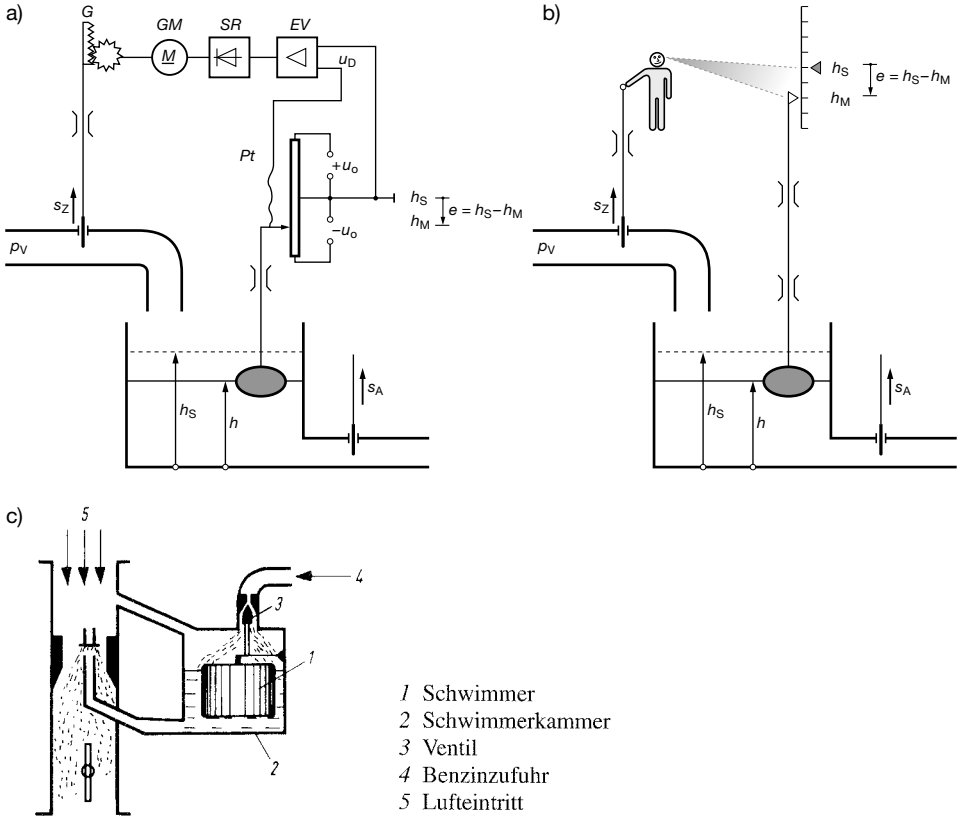


Bild 1.10 Realisierungsvarianten einer Füllstandsregelung (Erläuterung im Text)
 a) elektromechanisch b) Handregelung c) mechanisch (Kfz-Vergaser)

Beispiel 1.7: Realisierungsvarianten einer Füllstandsregelung

In Bild 1.10a wird die Wirkung vom Füllstand h auf die Zuflussschieberstellung s_Z mittels Schwimmer, Potentiometer Pt , elektronischem Verstärker EV (z. B. ein beschalteter Operationsverstärker), Stromrichter SR , Gleichstrommotor GM und Getriebe G erzeugt. Das Potentiometer ist so angebracht, dass der Schleifer bei $h = h_S$ (Sollwert) auf Masse steht. Da der Motor eine konstante Spannung u_D in eine konstante Drehzahl umformt, stellt die Regelung von Bild 1.10a bei jeder konstanten Abflussschieberstellung s_A nach einiger Zeit den Füllstand h automatisch sogar exakt wieder auf die Sollhöhe h_S ein. Der Leser kann sich das durch einfache physikalische Überlegungen klarmachen. Das Blockschema entspricht Bild 1.8c, wenn der Block „Hebel“ mit „Verstärker, Gleichstrommotor, Getriebe“ beschriftet wird. Für den Betrieb der Regelung ist elektrische Hilfsenergie für Potentiometer, Verstärker und Motor erforderlich. An Stelle des elektronischen Verstärkers kann z. B. auch ein geeignet programmierter Mikrorechner eingesetzt werden.

In Bild 1.10b erfolgt die Wirkung vom Füllstand auf die Zuflussschieberstellung durch eine Person. Man nennt dies **Handregelung**. Der Mensch beobachtet ständig die Füllstandsanzeige und betätigt den Zuflussschieber so, dass der angezeigte Wert h_M einem

markierten Sollwert h_s ständig angeglichen wird. Der Block „Hebel“ in Bild 1.8c kann hier mit „Person“ beschriftet werden.

In Kfz älterer Bauart übernimmt im Vergaser (Bild 1.10c) ein einziges, federnd aufgehängtes mechanisches Bauelement die Funktionen Messen (Schwimmer 1), Vergleichen (Soll- und Istwert) und Stellen (Zuflussventil 3). ■

Definitionen, Benennungen

Nach DIN 19226 Teil 1 gilt: Das **Regeln**, die **Regelung**, ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße), fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der **geschlossene Wirkungsablauf**, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.⁸

Bild 1.11 zeigt nach DIN 19226 Teil 4 festgelegte Benennungen im Regelkreis. Im Vergleich zum Blockschema der mechanischen Füllstandsregelung von Bild 1.8c ergibt sich Folgendes: Zur Strecke, die im Zusammenhang mit einer Regelung auch **Regelstrecke** genannt wird, gehören Behälter- und Leitungseigenschaften. Stellglied ist der Zuflussschieber, wobei die Stellgröße $y = s_z$ die Zuflussschieberstellung ist. Die Aufgabengröße x_A (der Füllstand) wird mit **Regelgröße** (Formelzeichen x) bezeichnet, wenn sie im Regelkreis fortlaufend gemessen wird.⁹ Der Block „Messeinrichtung“ entspricht dem Block „Schwimmer“, die Rückführgröße r ist der gemessene Füllstand h_M (Auslenkung rechter Hebelarm). Der Regler enthält das Vergleichsglied mit $e = w - r = h_s - h_M$ (Abweichung Hebelarm von der Stellung bei $h = h_s$) und das Regelglied (Block „Hebel“). Da keine Hilfsenergie für die Betätigung des Zuflussschiebers erforderlich ist, ist in diesem Fall ein Block „Steller, Stellantrieb“ nicht vorhanden. Zur Stelleinrichtung gehört hier nur der Zuflussschieber als Stellglied.

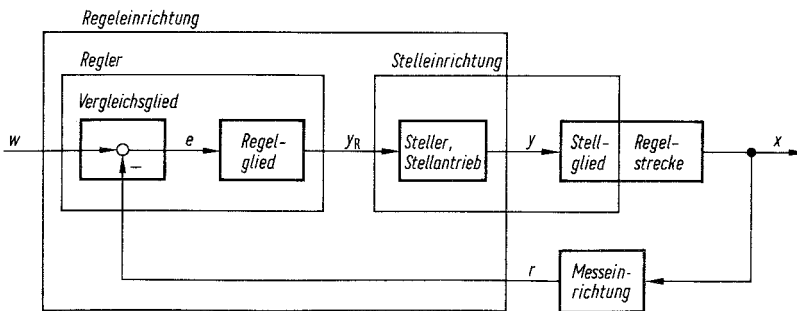


Bild 1.11 Blockschema einer Regelung nach DIN 19226, Teil 4

y_R Reglerausgangsgröße

r Rückführgröße

⁸⁾ Die Benennung Regelung wird vielfach (missverständlicherweise) auch für ein Gerät oder eine Anlage verwendet, in der die Regelung stattfindet.

⁹⁾ Im Folgenden soll der Einfachheit halber grundsätzlich von $x = x_A$ ausgegangen werden. Falls x_A nicht gemessen werden kann, kann als Regelgröße x eine messbare Hilfsgröße verwendet werden, die einen bekannten Zusammenhang mit der Aufgabengröße x_A haben muss.