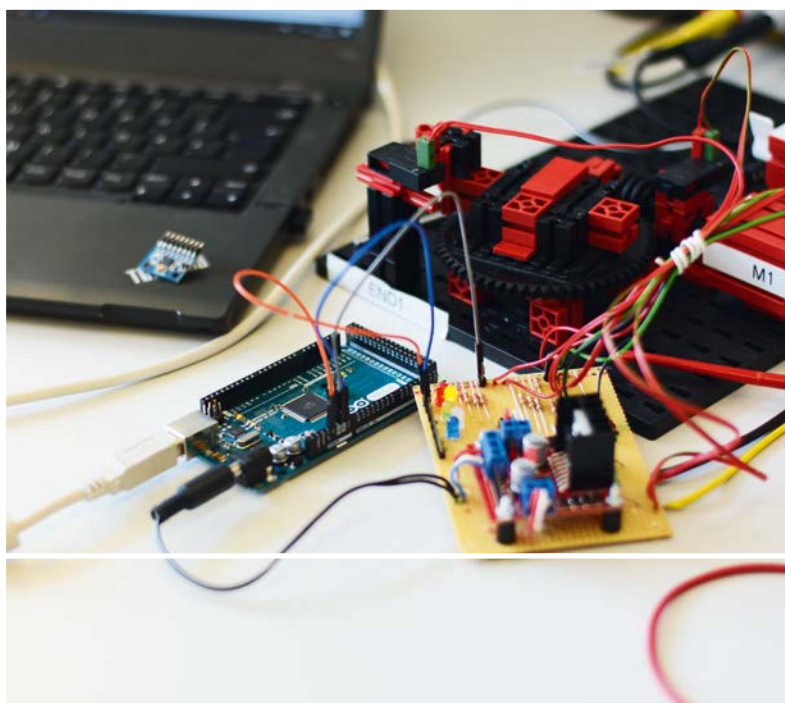


Heinz Mann
Horst Schiffelgen
Rainer Froriep
Klaus Webers



Einführung in die Regelungstechnik

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



13., aktualisierte Auflage

HANSER

Disclaimer zur Barrierefreiheit

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Mann / Schiffelgen / Froriep / Webers
Einführung in die Regelungstechnik



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf *plus.hanser-fachbuch.de* gibt es kostenloses Zusatzmaterial zu diesem Buch. Den Zugangscode finden Sie am Ende des Werkes.



Bleiben 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,
Regel-Realisierung, Software

13., aktualisierte Auflage

HANSER

Über die Autoren:

Prof. Dipl.-Ing. Heinz Mann (†)

Prof. Dr. Horst Schiffelgen (†)

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

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



Print-ISBN: 978-3-446-48490-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-48509-9

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also 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.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2026 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

Vilshofener Straße 10 | 81679 München | info@hanser.de

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Der Buchmacher - Arthur Lenner, Windach

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

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © Klaus Webers

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Inhalt

Vorwort	XI
1 Einleitung	1
1.1 Erste Orientierung	1
1.2 Steuerung	3
1.3 Regelung	10
1.4 Internationale Bezeichnungen	18
1.5 Weitere Beispiele für Steuerungen und Regelungen	20
1.6 Zur Lösung regelungstechnischer Aufgabenstellungen	25
1.6.1 1. Aufgabenstellung (Spezifikationen) für Regelung bzw. Regler formulieren	26
1.6.2 2. Varianten für geeignetes Reglerverfahren ausarbeiten	28
1.6.3 3. Bestes Reglerverhalten technisch realisieren	29
2 Analoge Übertragungsglieder	33
2.1 Lineare zeitinvariante Übertragungsglieder (LZI-Glieder)	34
2.2 Wirkungsplan und grafische Simulationsprogramme	40
2.3 Mathematische Modellbildung	44
2.3.1 Theoretische Modellbildung (mit Linearisierung)	45
2.3.2 Experimentelle Modellbildung (Identifikation)	56
2.3.3 Normierung von mathematischen Modellen	62
2.4 Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	65
2.4.1 Sprungantwort und Einheitssprungantwort	66
2.4.2 Impulsantwort und Einheitsimpulsantwort	68
2.4.3 Anstiegsantwort und Einheitsanstiegsantwort	70

2.5	Frequenzgang	72
2.5.1	Berechnung des Frequenzganges	72
2.5.2	Bode-Diagramm (Frequenzkennlinien) und Ortskurve	75
2.6	Übertragungsfunktion	77
2.6.1	Übertragungsfunktion und Differenzialgleichung	78
2.6.2	Verknüpfung von LZI-Gliedern	79
2.6.3	Übertragungsfunktion und andere Kennfunktionen	86
2.6.4	Pole und Nullstellen (<i>P-N</i> -Plan)	88
2.7	Stabilität	91
2.7.1	Zum Begriff der Stabilität	91
2.7.2	Grundlegendes Stabilitätskriterium für LZI-Glieder	93
2.7.3	Hurwitz-Kriterium	98
2.8	Einfache LZI-Glieder	100
2.8.1	P-Glied	100
2.8.2	P-T ₁ -Glied	101
2.8.3	P-T ₂ -Glied	105
2.8.4	T _f -Glied	110
2.8.5	I- und I-T ₁ -Glied	112
2.8.6	D- und D-T ₁ -Glied	114
2.8.7	Übersicht	117
3	Regelstrecken	119
3.1	Einteilung der Regelstrecken	121
3.2	Regelstrecken mit Ausgleich	123
3.2.1	Regelstrecken mit Ausgleich und ohne Verzögerung	124
3.2.2	Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung erster Ordnung ...	124
3.2.3	Regelstrecken mit Ausgleich und Verzögerung höherer Ordnung	128
3.3	Regelstrecken ohne Ausgleich	134
3.3.1	Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung	135
3.3.2	Regelstrecken ohne Ausgleich und mit Verzögerung	137
3.4	Regelstrecken mit Totzeit	139
3.5	Regelbarkeit von Strecken	142

4	Analoge Regler	145
4.1	Einteilung der Regler	146
4.2	Stetige Regler	147
4.2.1	P-Regler	149
4.2.2	I-Regler	154
4.2.3	PI-Regler	158
4.2.4	PD-Regler	160
4.2.5	PID-Regler	163
4.2.6	Bleibende Regeldifferenzen, Genauigkeit	166
4.3	Unstetige Regler	166
4.3.1	Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich	168
4.3.2	Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich	174
5	Analoger Regelkreis	177
5.1	Anforderungen an das Führungs- und Störverhalten	178
5.2	Standardkonfigurationen von Strecke und Regler	182
5.3	Frequenzgang des offenen Regelkreises	183
5.3.1	Stabilitätsanalyse anhand der Ortskurve	183
5.3.2	Stabilitätsanalyse anhand der Frequenzkennlinien	191
5.3.3	Frequenzkennlinien als Entwurfswerkzeug (FKL-Verfahren)	195
5.4	Wurzelortskurven (WOK-Verfahren)	206
5.5	Einstellverfahren	216
5.5.1	Optimierung der Reglerparameter	216
5.5.2	Einstellregeln	221
5.6	Vermaschte Regelkreise	224
5.6.1	Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung	224
5.6.2	Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung)	228
5.6.3	Regelkreis mit Störgrößenregelung	230
5.6.4	Mehrgrößenregelungen	231
5.7	Regeleinrichtung mit Strukturumschaltung („Anfahren“ von Regelkreisen)	231
5.8	Selbsteinstellende (adaptive) Regelkreise	233
5.9	Nichtlineare Regelkreise	234

6	Digitale Reglerrealisierung (DDC)	239
6.1	Überblick	239
6.2	Funktionseinheiten einer digitalen Regeleinrichtung	242
6.2.1	Analog-Digital-Umsetzung	242
6.2.2	Digitaler Regler	245
6.2.3	Digital-Analog-Umsetzung	246
6.2.4	Annahmen beim Berechnungsmodell des digitalen Reglers	247
6.3	Digitaler PID-Regler	247
6.3.1	P-Anteil	248
6.3.2	I-Anteil	249
6.3.3	D-Anteil	251
6.3.4	Stellungs- und Geschwindigkeitsalgorithmus	251
6.4	Berechnung weiterer Regelalgorithmen	256
7	Digitales Berechnungsmodell der Regelstrecke	261
7.1	Einführung	262
7.2	Digital-Analog-Umsetzung und z-Transformation	264
7.3	Diskretisierungsverfahren	268
7.4	Diskretisierungsbeispiele	271
7.4.1	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	271
7.4.2	Strecke mit Ausgleich und Verzögerung 2. Ordnung	273
7.4.3	Strecke ohne Ausgleich und Verzögerung 1. Ordnung	278
8	Digitale Übertragungsglieder	281
8.1	Digitale LZI-Glieder	281
8.2	Testsignalantworten und zugehörige Kennfunktionen	283
8.3	z-Übertragungsfunktion	288
8.4	Wirkungsplan und grafische Programmierung	294
8.5	Stabilität	296
9	Digitaler Regelkreis	301
9.1	Zur Wahl der Abtastperiode bei digital realisierten Reglern	302
9.2	Einstellverfahren, Einstellregeln	304

10	Fuzzy-Regler (Fuzzy-Controller)	307
10.1	Einordnung	308
10.2	Regelbasis, linguistische Größe und Fuzzy-Menge	309
10.3	Fuzzy-logische Operationen	315
10.4	Informationsverarbeitung im Fuzzy-Regler	317
10.4.1	Fuzzifizierung der Regeldifferenz	318
10.4.2	Bestimmung des Erfüllungsgrades jeder Regel	319
10.4.3	Ermittlung der Stellgrößen-Fuzzy-Menge jeder Regel	321
10.4.4	Bestimmung der resultierenden Stellgrößen-Fuzzy-Menge	322
10.4.5	Defuzzifizierung der Stellgröße	323
10.5	Kennlinien von Fuzzy-Reglern	324
10.6	Fuzzy-PID-Regler	328
11	Rapid Control Prototyping	333
11.1	Einordnung	333
11.2	Low-Cost-RCP-System	335
11.2.1	Echtzeitbetrieb und Abtastzeit	337
11.2.2	Reglermodell und Diskretisierung	338
11.2.3	Datenaustausch Zielrechner/Entwicklungsrechner	341
12	Anhang	343
12.1	Einstieg in Matlab/Simulink	343
12.2	Anwendungen der komplexen Rechnung	351
12.3	Anwendungen der Laplace-Transformation	356
12.4	Anwendungen der z -Transformation	364
12.5	Skizzieren von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm)	373
Literatur		381
Formelzeichen		385
Glossar		391
Index		399

Vorwort

Vorwort zur dreizehnten Auflage

Die Regelungstechnik hat sich seit dem Erscheinen der ersten Auflagen dieses Buches in ihren grundlegenden Methoden weiterhin als bemerkenswert stabil erwiesen. Beschreibung, Analyse und Entwurf dynamischer Systeme auf der Basis abstrakter Modelle bilden nach wie vor das Fundament einer Ingenieurdisziplin, die in unterschiedlichsten Anwendungsfeldern – von der klassischen Antriebstechnik über die Robotik bis hin zur Medizintechnik und zu cyber-physischen Systemen – erfolgreich eingesetzt wird. Gleichzeitig schreitet die praktische Umsetzung dieser Methoden, insbesondere durch leistungsfähige rechnergestützte Werkzeuge und Softwareumgebungen, kontinuierlich voran.

Vor diesem Hintergrund verfolgt auch die nun vorliegende dreizehnte Auflage das Ziel, die bewährte didaktische Struktur des Buches beizubehalten und zugleich den aktuellen fachlichen, technischen und formalen Anforderungen Rechnung zu tragen. Inhaltlich handelt es sich im Wesentlichen um eine umfassend überarbeitete und aktualisierte Fassung der vorhergehenden Auflage. Zahlreiche redaktionelle Anpassungen dienen der Präzisierung der Darstellung sowie der besseren Nachvollziehbarkeit einzelner Herleitungen. Insbesondere wurden mathematische Formeln überprüft, teilweise korrigiert und an mehreren Stellen vereinheitlicht.

Ein weiterer Schwerpunkt der Überarbeitung liegt in der Aktualisierung der Literaturverweise. Diese wurden an den heutigen Stand von Forschung, Lehre und industrieller Praxis angepasst, um den Leserinnen und Lesern einen zeitgemäßen Zugang zu weiterführenden Quellen zu ermöglichen. Ergänzend dazu wurde die digitale Fassung des Buches im Hinblick auf Barrierefreiheit grundlegend überarbeitet und an die aktuellen EU-Vorgaben angepasst, um eine möglichst breite und gleichberechtigte Nutzung zu gewährleisten.

Neu hinzugekommen ist ein Abschnitt, in dem die in diesem Buch verwendete regelungstechnische Nomenklatur gemäß den einschlägigen DIN-Normen systematisch den inter-

national gebräuchlichen Bezeichnungen gegenübergestellt wird. Ziel dieser Ergänzung ist es, insbesondere den Übergang zur Anwendung regelungstechnischer Softwarewerkzeuge und internationaler Fachliteratur zu erleichtern und mögliche Missverständnisse bei der Symbol- und Begriffswahl zu vermeiden.

Darüber hinaus wird für zahlreiche Beispiele im Buch begleitender Matlab-Code auf einer neu eingerichteten Internetseite zum Buch bereitgestellt. Den Zugangscode finden Sie auf der letzten Buchseite. Die dort verfügbaren Programme wurden überarbeitet, vereinheitlicht und an aktuelle Matlab-Versionen angepasst. Sie sollen das Verständnis der theoretischen Inhalte vertiefen und die eigenständige experimentelle Auseinandersetzung mit den behandelten Methoden unterstützen.

Unser Dank gilt erneut den Leserinnen und Lesern sowie den Fachkolleginnen und -kollegen für ihre konstruktiven Hinweise und Anregungen, die auch in diese Auflage eingeflossen sind. Wir hoffen, dass die dreizehnte Auflage weiterhin eine zuverlässige und praxisnahe Einführung in die Regelungstechnik bietet und Studierende wie Praktikerrinnen und Praktiker gleichermaßen bei ihrer Arbeit unterstützt. Frau Christina Kubiak und Herrn Frank Katzenmayer vom Hanser Verlag danken wir für die angenehme Zusammenarbeit.

Klaus Webers, Rainer Froriep

München, im Juni 2026

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 selbstständig 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, sodass die Voraussetzungen für selbstständiges, 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.

Die Verfasser

Duisburg, München, im September 1968

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, zurzeit vor allem in der Mechatronik und in der internetbasierten Vernetzung von Maschinen und Prozessen. Entwicklungen wie „Internet of Things“ (Seitz, 2025), (Marwedel, 2021) oder „Cyber-Physical-Systems“ (Platzer, 2018), (Gausemeier, 2019) sind ohne Regelungstechnik als zugrunde liegender Technologie nicht denkbar. In Geräte, Fahrzeuge (Hegerhorst, 2025) oder Anlagen (Zastrow, 2017) „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 (Weber und Koch, 2022), (Corke, 2022). In der Klimatechnik sollen Innenräume möglichst energieschonend auf gewünschten Temperaturen gehalten werden, z. B. durch automatische Anpassung an die Außentemperatur (Seifert, 2023), (Vogt, 2023). Beatmungsmaschinen greifen automatisch bei aussetzender Atmung ein (Platen, 2024), (Netzel, 2003). Flugzeuge werden mit Autopiloten automatisch auf Geschwindigkeit, Höhe und Kurs gehalten (Fichter und Stephan, 2020). Die Sicherheit von Kraftfahrzeugen kann z. B. durch automatisches Bremsen bei Hindernissen oder automatisches Gegenlenken bei Seitenböen erhöht werden (Pischinger und Seiffert, 2021). Aktuelle Weiterentwicklungen in Richtung automatisierten Fahrens erfordern darüber hinaus sogar die exakte Einhaltung vollständiger Bewegungstrajektorien und Geschwindigkeitsprofile (Hegerhorst, 2025). 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 (Aström und Lunze, 2001). 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 Mikrocontrollern 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 *plus.hanser-fachbuch.de* 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. Am Seitenrand sind die dazugehörigen Benennungsnummern die jeweiligen Daten angegeben.

Den Zugangscode dafür finden Sie auf der letzten Seite des Buchs.

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 Konstanzhaltung 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 Konstanzhaltung 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, Abschnitt 1.6). Das Verhalten von Regelungen ist aufgrund 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).

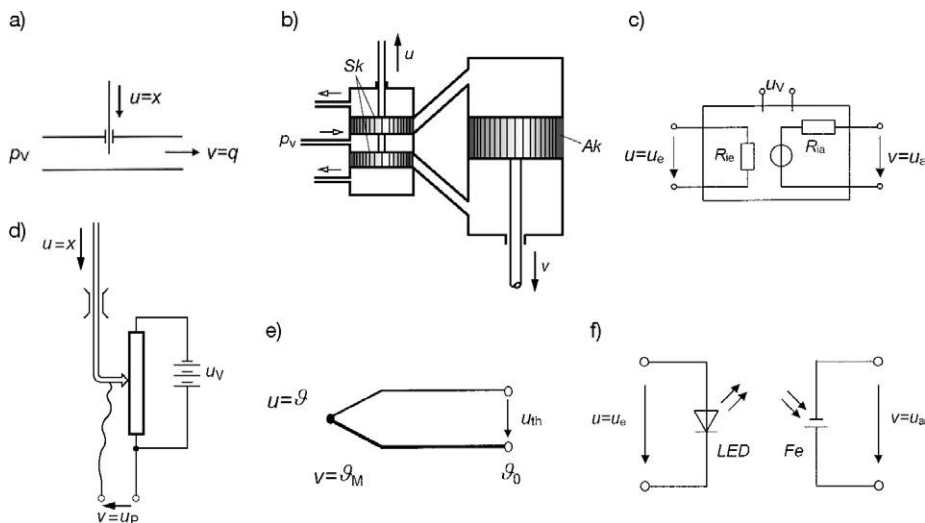


Bild 1.1 Steuerung von Größen, u steuernde und v gesteuerte Größe. a) Schieber, b) hydraulischer Antrieb, c) Spannungsverstärker, d) Potentiometer, e) Thermoelement, f) Optokopplerprinzip



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 Eingangsinnenwiderstand 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 Wärmeaufnahmefähigkeit 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⁾

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

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 IEC 60050-351-47-02 (S. 137) gilt:

*„Das **Steuern**, die **Steuerung**: Vorgang³⁾ in einem System, bei dem eine oder mehrere variable Größen als Eingangsgrößen andere variable Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist der **offene Wirkungsweg**⁴⁾ (oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken).“*

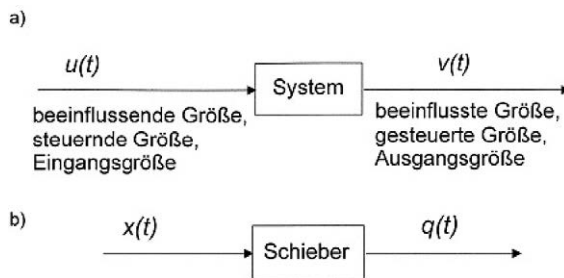


Bild 1.2

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 1.11).

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 Bild 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.

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

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 (As) 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 (Zs). 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 mithilfe eines Sollwerteinstellers (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 weitere 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 Behälter leer ($h = 0$ m). Zum Zeitpunkt t_0 wird eine bestimmte Behälterfüllung als Sollwert h_s vorgegeben (linkes Diagramm, schnelle Verstellung von Se). 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_s 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 dem **Stellglied**, hier dem Zuflussschieber, wird der Massenstrom in der Strecke so dosiert, dass die Aufgabengröße aufgabengemäß beeinflusst wird.

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.

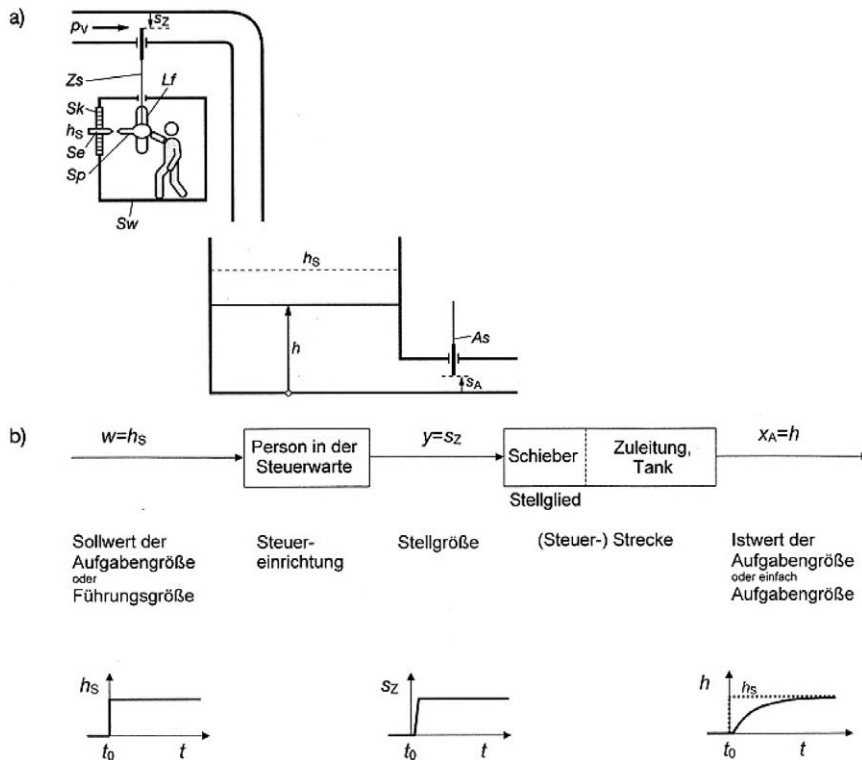


Bild 1.3 Steuerung eines Füllstandes. a) Geräteschema, b) Blockscheema, Begriffe, Zeitdiagramme

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 oft nicht zu vermeiden. Versorgungsstörgrößen sind auf unerwünschte Schwankungen von Versorgungs- oder Hilfsenergien zurückzuführen. In Bild 1.4 sind diese Größen als zusätzliche Eingangsgrößen in den Block „Strecke“ eingetragen.

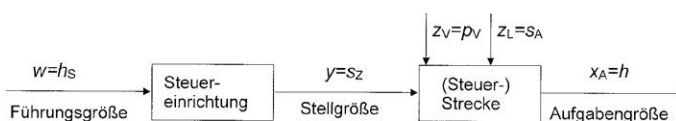


Bild 1.4 Füllstandssteuerung von Bild 1.3 mit Störgrößen

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 hinaus-schauen 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.

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. Beispielsweise 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 Blockscheema 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 gegenseitig einwirken. Die Aufspaltung des Wirkungsweges der Störgröße z_L wird mit einem dicken Punkt dargestellt (sog. **Verzweigungsstelle**). Man beachte, dass das Blockscheema 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**.

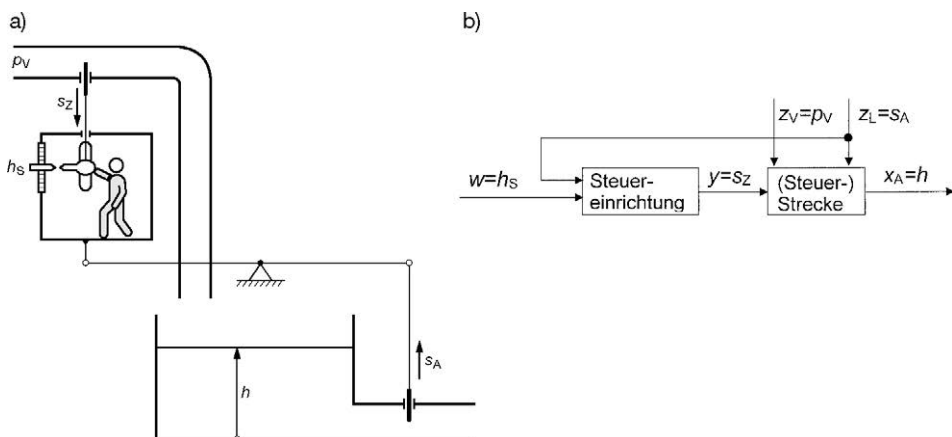


Bild 1.5 Füllstandssteuerung mit Aufschaltung der Störgröße s_A . a) Geräteschema, b) Blockscheema einer Störgrößenaufschaltung



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 Wärmeabfluss 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 Zs 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 $z_{V2} = p_v$.

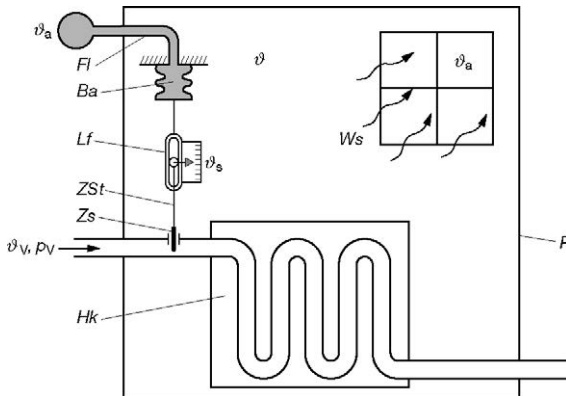


Bild 1.6 Raumtemperatursteuerung mit Aufschaltung der Störgröße ϑ_a

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

⁵⁾ Vgl. DIN IEC 60050-351-51: Größen und Signale in Schaltsystemen.

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 (Seitz, 2025, S.12 – 15) verwiesen.

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 1.4: Regelung eines Füllstandes

Die Strecke ist die gleiche wie bei der Steuerung in Bild 1.3b bzw. Bild 1.4. Sie ist hier als Regelstrecke im Blockschema von Bild 1.7c 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 1.7a 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 1.7d näherungsweise stufenförmig dargestellt). Daraufhin sinkt der Füllstand $x_A = h$ unter seinen Sollwert h_s ab (Bild 1.7d). Der Schwimmer zieht den rechten Hebelarm nach unten (Bild 1.7b), 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 1.7d). Es bleibt nach dem Regelvorgang eine Abweichung $h_s - h$ zwischen Soll- und Istwert des Füllstands 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.

Das Blockschema in Bild 1.7c 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 zu-

rückwirkt. 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. 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.

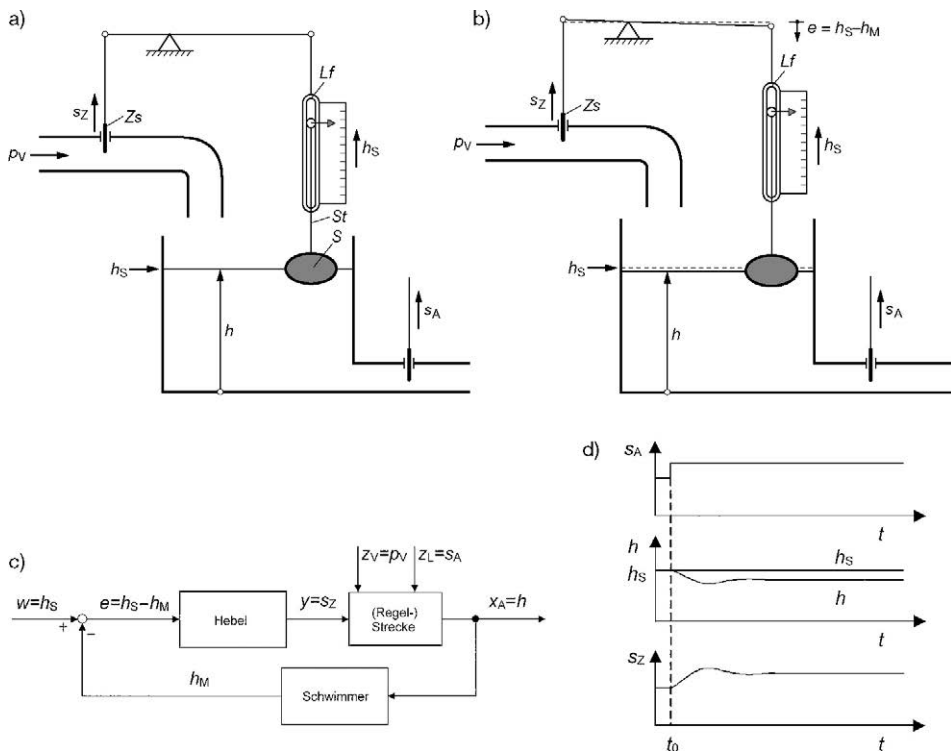


Bild 1.7 Regelung eines Füllstandes. a) Füllstand auf Sollhöhe h_S , b) Füllstand weicht vom Sollwert ab, c) Blockschema einer Regelung, d) ein Regelvorgang

m0108d

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. Das heißt, 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 1.5: 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 1.8b 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 1.8b 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. (Zur Verständnisüberprüfung möge der Leser den verbleibenden Regelfehler plausibilisieren.) Es liegt ein Regelkreis entsprechend Bild 1.7c 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.

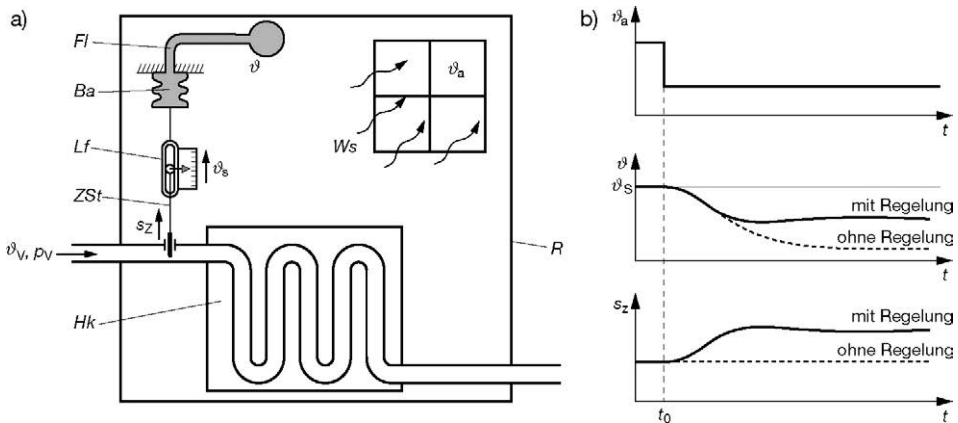


Bild 1.8 Regelung einer Raumtemperatur. a) Anlagenschema, b) Vorgang mit und ohne Regelung

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 Abschnitt 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⁾ Abschnitt 5.6.1 behandelt die Störgrößenaufschaltung in Verbindung mit der Regelung.

⁷⁾ Abschnitt 1.6 (Projektphase 3) und Kapitel 11 gehen ausführlicher auf Realisierungsvarianten ein.

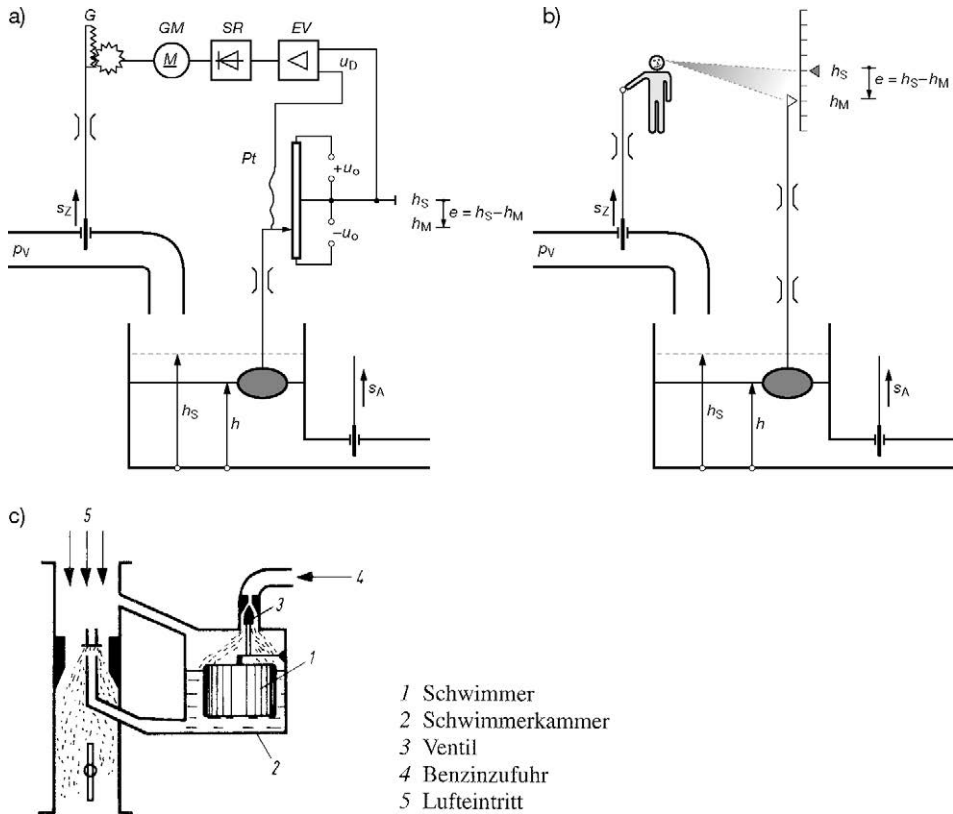


Bild 1.9 Realisierungsvarianten einer Füllstandsregelung (Erläuterung im Text).

a) Elektromechanisch, b) Handregelung, c) mechanisch (Kfz-Vergaser)



Beispiel 1.6: Realisierungsvarianten einer Füllstandsregelung

In Bild 1.9a 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 1.9a 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 1.7c, wenn der Block „Hebel“ mit „Verstärker, Gleichstrommotor, Getriebe“ beschriftet wird. Für den Betrieb der Regelung ist elektrische Hilfsenergie für Potentiometer, Verstärker und Motor erforderlich. Anstelle des elektronischen Verstärkers kann z. B. auch ein geeignet programmierter Mikrorechner eingesetzt werden.

In Bild 1.9b 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 1.7c kann hier mit „Person“ beschriftet werden.

In Kfz älterer Bauart übernimmt im Vergaser (Bild 1.9c) ein einziges, federnd aufgehängtes mechanisches Bauelement die Funktionen Messen (Schwimmer 1), Vergleichen (Soll- und Istwert) und Stellen (Zuflussventil 3).

Definitionen, Benennungen

Nach DIN IEC 60050-351-47-01 (S. 136) gilt:

*„Das **Regeln**, die **Regelung**: Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße erfasst (gemessen), mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und 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 1.10 zeigt nach DIN IEC 60050-351-44 (S. 43) festgelegte Benennungen im Regelkreis. Im Vergleich zum Blockschema der mechanischen Füllstandsregelung von Bild 1.7c 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.

Bei der Realisierungsvariante der Füllstandsregelung nach Bild 1.9a sind dem Block „Steller, Stellantrieb“ der Leistungsverstärker (Stromrichter SR) und der Gleichstrommotor GM zuzuordnen. Potentiometer Pt und elektronischer Verstärker EV entsprechen dem Vergleichs- bzw. Regelglied.

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.

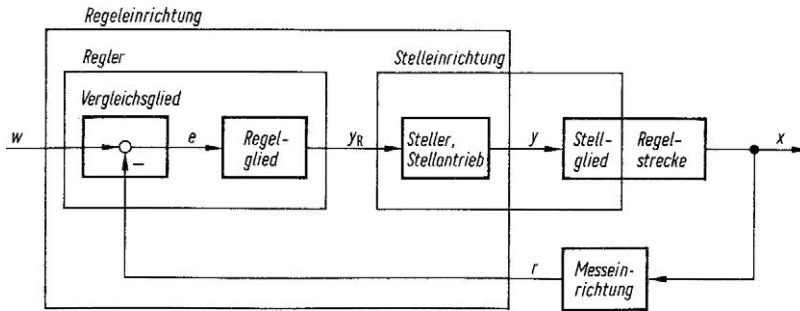


Bild 1.10 Blockschema einer Regelung nach DIN IEC 60050-351-44

y_R Reglerausgangsgröße, r Rückführgröße

Eine grundlegende Aufgabenstellung der Regelungstechnik besteht darin, das Verhalten des Regelgliedes so zu gestalten, dass vereinbarte Anforderungen an das Verhalten der Regelung bestmöglich erfüllt werden. Fasst man alle gegebenen Regelkreisbestandteile (einschließlich Stell- und Messeinrichtung) in einem erweiterten Block „Regelstrecke“ zusammen, so erhält man den sog. **Standard-Regelkreis** (Bild 1.11). Das gesuchte Regelglied wird in diesem Zusammenhang kurz als **Regler** und die Reglerausgangsgröße als Stellgröße y bezeichnet. Ferner wird $r = x$ angenommen, was fehlerfreier Messung entspricht, sodass sich die Regeldifferenz zu $e = w - x$ ergibt. Der Standard-Regelkreis wird im Folgenden Grundlage der Betrachtung sein (vgl. Abschnitt 1.6).

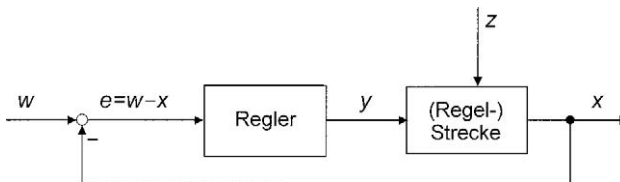


Bild 1.11 Standard-Regelkreis mit Bezeichnungen gemäß DIN IEC 60050-351

x Regelgröße, w Führungsgröße, $e = w - x$ Regeldifferenz, z Störgröße, y Stellgröße

Mit der Führungsgröße w wird das geforderte zeitliche Verhalten der Regelgröße x vorgegeben. Häufig ist w konstant oder wird in größeren Zeitabständen auf verschiedene konstante Werte eingestellt oder umgeschaltet, wie z. B. bei einer Raumtemperaturregelung. Man spricht dann von einer **Festwertregelung**. Ist w laufend veränderlich, wie z. B. bei einer Servolenkung in einem Kraftfahrzeug, spricht man von einer **Folgeregelung**. Wird der Führungsgrößenverlauf zeitlich vorab geplant, wie z. B. die Temperaturkurve bei einem Keramik-Brennofen, spricht man von einer **zeitgeführten Regelung** oder **Zeitplanregelung**.

Begriffliche Abgrenzung der Regelung

Kennzeichnend für eine Regelung ist der fortlaufende geschlossene Wirkungsablauf mit Soll-/Istwert-Vergleich. Ein rückgekoppelter Operationsverstärker, der als Rechenglied

eingesetzt wird (Abschnitt 11.2.1.3), ist wegen fehlendem Soll-/Istwert-Vergleich keine Regelung.¹⁰ Ebenso wenig handelt es sich beim folgenden Beispiel um eine Regelung, bei dem zwar ein Soll-Istwert-Vergleich, jedoch kein fortlaufender Wirkungsablauf vorliegt.



Beispiel 1.7: Wasserkocher mit Abschaltautomatik

Im Geräteschema von Bild 1.12a wird durch Betätigen des Tasters der Ausgang des Flip-Flop (FF) auf eins gesetzt, die Relaisspule (Rs) erregt und der Heizstrom y eingeschaltet. Die Wassertemperatur ϑ steigt an. Wenn die Quecksilbersäule (Qu) im Thermometer den Kontakt (Ko) erreicht, geht ein Einssignal an den Rücksetz- eingang des Flip-Flop, wodurch der Ausgang des Flip-Flop auf null zurückgesetzt und der Heizstrom y abgeschaltet wird. Gemäß Bildteil b) liegt ein geschlossener Wirkungsablauf vor, jedoch kein fortlaufender Wirkungsablauf, weil eine Rückwirkung der Wassertemperatur ϑ auf sich selbst nur ein einziges Mal erfolgt, nämlich beim Abschalten der Heizung.

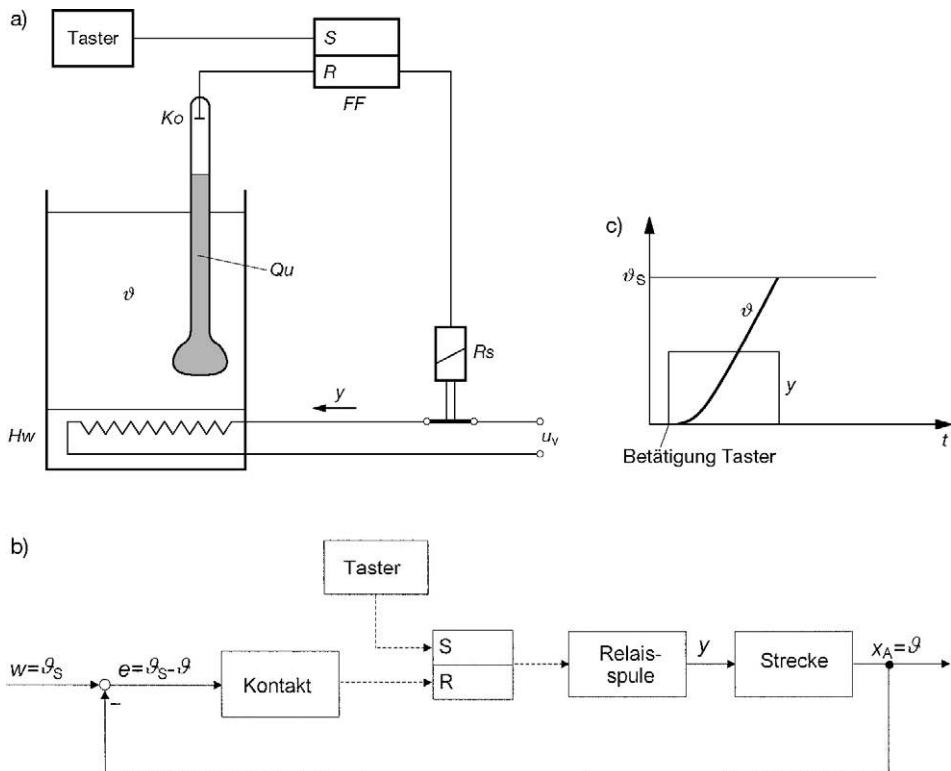


Bild 1.12 Wasserkocher mit Abschaltautomatik. a) Geräteschema, b) Blockschema, gestrichelt: binäre Größen, c) Zeitdiagramm

¹⁰ Der geschlossene Wirkungsablauf dient der Verminderung der Auswirkung von Verstärkungsschwankungen der Operationsverstärker auf das Verhalten der Gesamtschaltung (vgl. Abschnitt 4.2.7).

Von einer Regelung spricht man auch dann, wenn der geschlossene Wirkungsablauf mit kleinen zeitlichen Unterbrechungen erfolgt, wie z. B. bei einer digitalen Regelung mit ausreichend hoher Abtastfrequenz, sodass von einer näherungsweise fortlaufenden Erfassung und Weiterverarbeitung der Regelgröße ausgegangen werden kann (Kapitel 6 bis 9). Auch unstetige Vorgänge können fortlaufend sein wie z. B. bei Zweipunktregelungen in Abschnitt 4.3.

1.4 Internationale Bezeichnungen

Die im vorherigen Abschnitt eingeführten Bezeichnungen der Signale und Systeme im Regelkreis entsprechen den Vorgaben der einschlägigen DIN-EN- bzw. DIN-IEC-Normen.¹¹⁾ (DIN EN 60027), (DIN IEC 60050-351). Diese Nomenklatur wird jedoch nicht durchgängig in der Standardliteratur angewendet. Vielmehr werden in der deutschsprachigen und auch der englischsprachigen Standardliteratur jeweils fallweise individuelle Benennungen gewählt, für die sich leider auch außerhalb der DIN-Normen kein akzeptierter, umfassender Standard finden ließe. Auch die für die Anwendung so wesentliche regelungstechnische Software benennt die Regelkreiselemente meist ohne normative Grundlage.

Um dem Leser den Vergleich mit anderen Literaturstellen und Anwendungen zu erleichtern, soll hier eine vergleichende Gegenüberstellung angegeben werden. Als Gegenpunkt zur Darstellung in diesem Werk wird dabei das Benennungsschema in der regelungstechnischen Software Matlab/Simulink gewählt, da dieses aufgrund seiner weiten Verbreitung am ehesten geeignet erscheint, einen gemeinsamen Standard zu etablieren. Zumindest in der englischsprachigen Literatur und auch in neueren deutschsprachigen Werken scheint sich diese Nomenklatur in den wesentlichen Punkten durchzusetzen.

Ausgangspunkt ist der in Bild 1.13 dargestellte Standard-Regelkreis. Im „Matlab Control-System-Designer“ wird dieser als „Standard Feedback Configuration“ wie folgt dargestellt:

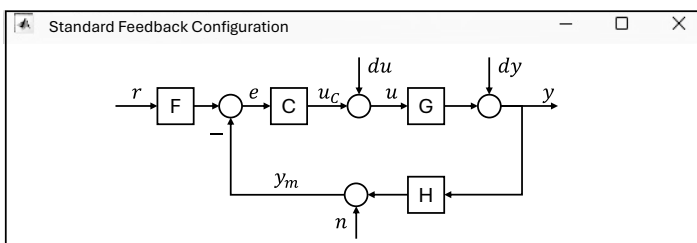


Bild 1.13 Standard Regelkreis in der Darstellung und Benennung des Matlab Control-System-Designer (Quelle: Matlab, Fa. MathWorks)

¹¹ In den vorherigen Auflagen dieses Werks war die Nomenklatur bezogen auf die DIN 19221, 19222, 19225 und 19226. Diese sind inzwischen nicht mehr gültig. Sie sind abgelöst durch die genannten DIN EN 60027 bzw. DIN IEC 60050-351. Alle relevanten Bezeichnungen von Signalen und Systemen im Regelkreis sind dabei jedoch unverändert weitergeführt worden und somit noch aktuell gültig.

Vernachlässigt man hierin die Elemente „Feed-Forward-Controller F“ und „Sensor H“¹², dann kann der Standard-Regelkreis gemäß DIN-Bezeichnung mit der internationalen Darstellung verglichen werden, siehe Bild 1.14.

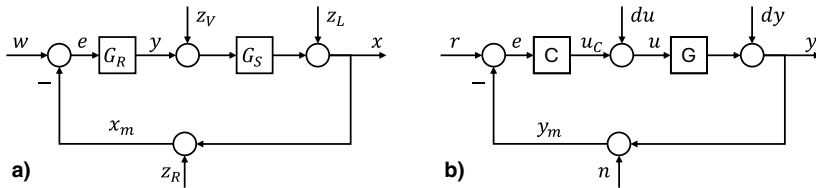


Bild 1.14 Gegenüberstellung der Bezeichnungen von Signalen und Systemen im Standardregelkreis. a) Darstellung gemäß DIN EN/DIN ISO, b) Darstellung gemäß Matlab Control-System-Designer (international)

Die folgenden Tabellen geben jeweils eine Übersicht zu den entsprechenden Formelzeichen und deren deutschsprachigen und internationalen Bezeichnungen.

Tabelle 1.1 Formelzeichen und Bezeichnungen von Signalen im Regelkreis gemäß DIN-EN bzw. International

Signal (DIN)	Bezeichnung (DIN)	Signal (int.)	Bezeichnung (int.)
w	Führungsgröße	r	reference
e	Regelfehler	e	error
y	Stellgröße	u_C	controller effort
z_V	(Versorgungs)-Störung	du	(input)-disturbance
z_L	(Last)-Störung	dy	(output)-disturbance
z_R	Messrauschen	n	noise
x	Istwert, Regelgröße	y	actual value
x_m	Messgröße	y_m	measured variable

Tabelle 1.2 Formelzeichen und Bezeichnungen von Systemen im Regelkreis gemäß DIN EN bzw. international

System (DIN)	Bezeichnung (DIN)	System (int.)	Bezeichnung (int.)
G_S	(Regel)-Strecke	G (P)	Plant
G_R	Regler	C	Controller

¹² Im Control-System-Designer erfolgt dies durch feste Vorgaben der Elemente $F=1$ und $H=1$.

Tabelle 1.3 Formelzeichen und Bezeichnungen wichtiger Übertragungspfade im Regelkreis gemäß DIN EN bzw. international

Übertragung von $\rightarrow$ nach (DIN)	Bezeichnung (DIN)	Übertragung von $\rightarrow$ nach (int.)	Bezeichnung (int.)
$w \rightarrow x$	Führungsübertragung (Führungsverhalten)	$r \rightarrow y$	reference tracking
$w \rightarrow y$	Stellübertragung	$r \rightarrow u$	controller effort
$z \rightarrow x$	Störübertragung	$dy \rightarrow y$	disturbance rejection
$e \rightarrow x_m$	offener Regelkreis	$e \rightarrow y_m$	open-loop

Aus den Tabellen werden die gewählten Formelzeichen für Signale und Systeme mit ihrem jeweiligen Bezug zu den englischsprachigen Bezeichnungen meist direkt deutlich, ausgenommen u und y . Auffällig ist hier das Fehlen des Formelzeichens x in den internationalen Signalbezeichnungen. Begründet ist dies, da üblicherweise bei Darstellungen von Systemen im Zustandsraum das Formelzeichen x für den wichtigen Zustandsvektor in der Darstellung $\dot{x} = f(x, u)$; $y = g(x, u)$ reserviert ist.¹³⁾

1.5 Weitere Beispiele für Steuerungen und Regelungen

Dieser Abschnitt bringt weitere Beispiele zur gezielten Beeinflussung von Größen in Geräten, Anlagen, Fahrzeugen und im menschlichen Körper. Die Wirkungsabläufe werden anhand von Blockschemas erläutert.



Beispiel 1.8: Regelung der Drehzahl eines Gleichstrommotors

Die Drehzahl ω eines Aufzugantriebs (Gleichstrommotor $\underline{M}$ in Bild 1.15a) soll gezielt beeinflusst werden: Der Aufzug soll sich bei jeder Beladung (Lastmoment M_L) mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. ω ist die Aufgabengröße ($x_A = \omega$) und M_L eine (Last-)Störgröße ($z = M_L$). Mit der Ankerspannung des Motors (Stellgröße $y = u_A$, Felderregerstrom i_F konstant) kann dem Störeinfluss $z = M_L$ auf die Aufgabengröße $x_A = \omega$ entgegengewirkt werden. Im Blockschema (Bildteil b) bestimmen diese drei Größen die mit „Motor mit Aufzug“ bezeichnete Strecke. Die gezielte Beeinflussung von w wird mittels Regelung vorgenommen: w wird mit dem Tachogenerator Tg erfasst (w ist damit auch Regelgröße, $x = \omega$) und in die elektrische Spannung u_ω umgeformt ($r = u_\omega$, Rückführgröße). Der Drehzahlsollwert $w = \omega_s$ wird am Potentiometer Pt als elektrische Spannung u_s vorgegeben. Der Soll-/Istwert-Vergleich wird mit den beiden

¹³⁾ In den DIN-Normen wird ebenfalls x als Bezeichnung für den Zustandsvektor verwendet, was leider nicht konsistent ist zu der parallelen Verwendung der gleichen Bezeichnung für die Istgröße.

Spannungen u_s und u_ω vorgenommen: $u_D = u_s - u_\omega$ ist die Regeldifferenz e . Das Regelglied ist analog-elektronisch mittels beschaltetem Operationsverstärker realisiert (Block „Elektronischer Verstärker“ bzw. EV). Der Stromrichter Sr verstärkt die Reglerausgangsspannung u_R (Reglerausgangsgröße $y_R = u_R$) auf das für die Stellgröße $y = u_A$ erforderliche Niveau. Zu den Versorgungsstörrößen gehören bei dieser technischen Realisierung die Versorgungsspannungen von Potentiometer, elektronischem Verstärker und Stromrichter und der Erregerstrom i_F des Magnetfelds im Motor.

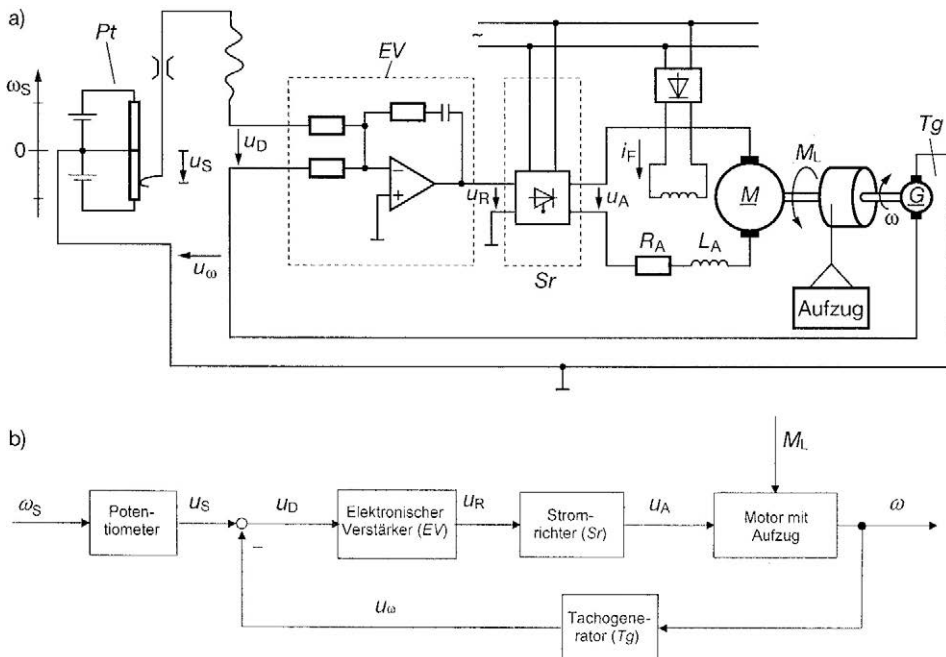


Bild 1.15 Drehzahlregelung. a) Geräteschema, b) Blockschema



Beispiel 1.9: Regelung der Strahlungsleistung einer Laserdiode

Die Leistung Φ_e des Laserstrahls S in Bild 1.16a soll gezielt so beeinflusst werden, dass sie möglichst unabhängig von Temperatureinflüssen wird. In Bildteil b ist der Block „Laserdiode“ die Strecke mit $x_A = \Phi_e$ (Strahlleistung als Aufgabenröße), $z = \vartheta$ (Temperatur als Störgröße) und $y = i$ (Stromstärke als Stellgröße). Die gezielte Beeinflussung von Φ_e wird mittels Regelung vorgenommen: Φ_e wird mit der Fotodiode Fd erfasst (Φ_e ist damit auch Regelgröße, $x = F_e$) und in eine elektrische Spannung u_ω umgeformt. Wie im vorherigen Beispiel 1.9 können Vergleich und Regelglied analogelektronisch realisiert werden. Der u - i -Verstärker liefert die Stellgröße $y = i$ auf dem erforderlichen Energieniveau. Zu den Versorgungsstörrößen gehören bei dieser technischen Realisierung die Versorgungsspannungen der Verstärker.

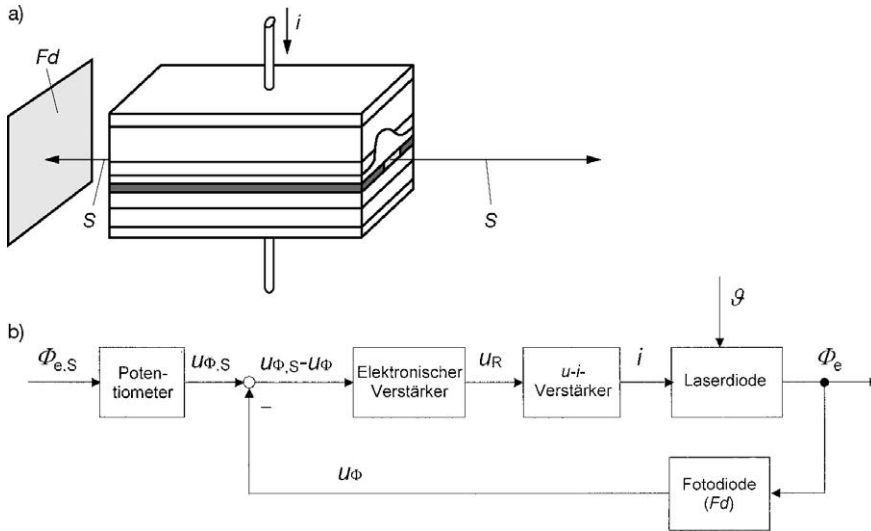


Bild 1.16 Leistungsregelung einer Laserdiode. a) Laserdiode mit Fotodiode F_d , b) Blockschema



Beispiel 1.10: Automatische Bildschärfeeinstellung bei einer Kamera

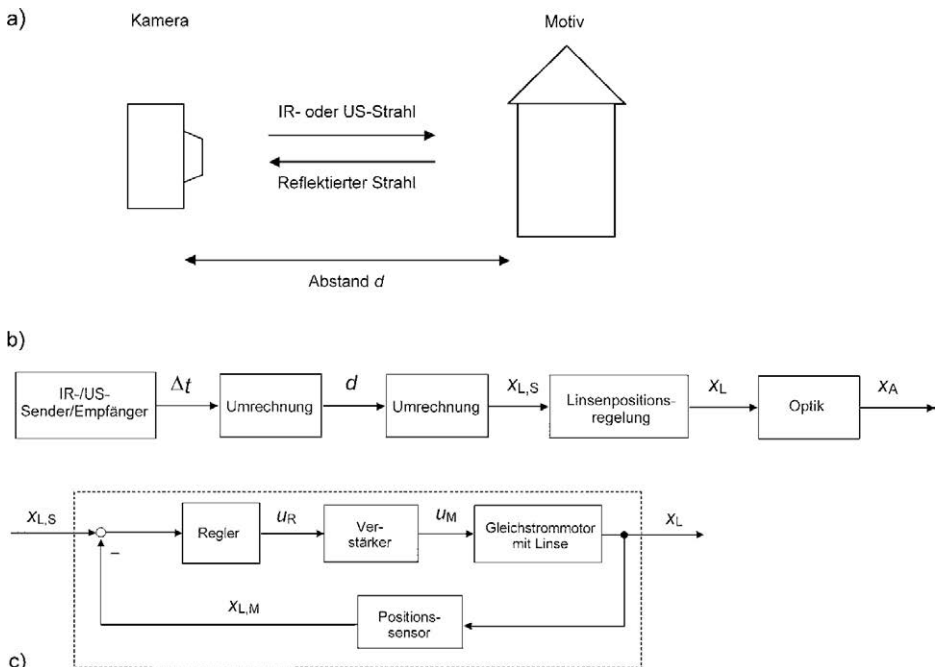


Bild 1.17 Automatische Bildschärfeeinstellung. a) Aufnahmesituation, b) Blockschema Bildschärfesteuerung, c) Blockschema Linsenpositionsregelung

Die Kamera in Bild 1.17a soll ein ausgewähltes Motiv automatisch scharf einstellen können. Aufgabengröße x_A ist somit die Bildscharfe, die mit technischen Mitteln nur sehr aufwendig zu erfassen ist. Einfacher ist die Messung des Abstands d zum Objekt (Bild 1.17a) und eine davon abhängige Einstellung der Linienposition x_L . Damit erfolgt die gezielte Beeinflussung der Bildscharfe mittels Steuerung und Regelung: x_L steuert über den Block „Optik“ (Bild 1.17b) die Aufgabengröße x_A (Bildscharfe). Die Linienposition x_L ist Regelgröße im Regelkreis von Bildteil c, der jeder Abweichung von der Sollposition $x_{L,s}$ entgegenwirkt. $x_{L,s}$ wird durch Umrechnung aus dem Motivabstand d gewonnen. d wird mittels Messung der Laufzeiten $\Delta t = t_{\text{Senden}} - t_{\text{Empfangen}}$ von reflektierten Infrarot- oder Ultraschallimpulsen bestimmt.



Beispiel 1.11: Automatische Regelung der Blutzuckerkonzentration

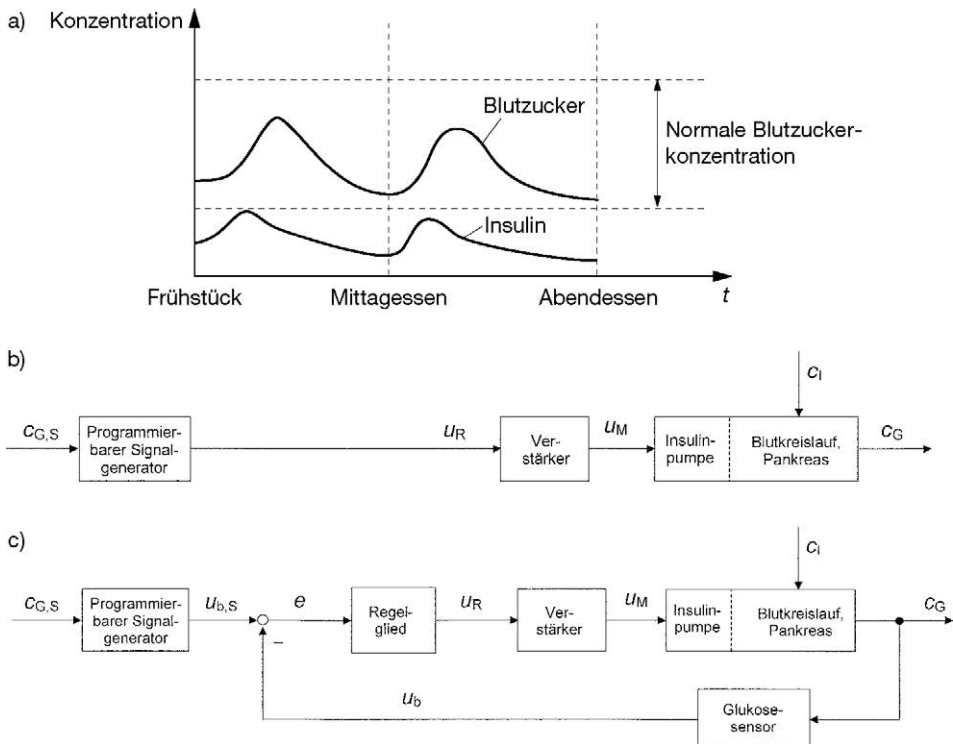


Bild 1.18 Automatische Einhaltung einer Blutzuckerkonzentration. a) Täglicher Verlauf von Insulin- und Blutzuckerkonzentration, b) Blockschema Konzentrationssteuerung, c) Blockschema Konzentrationsregelung

Ist die Insulinproduktion im menschlichen Körper gestört, kann die Bauchspeicheldrüse (Pankreas) nicht genügend Blutzucker (Glukose) abbauen, um deren Konzentration c_G im normalen Bereich zu halten (Bild 1.18a). Die Blutzuckerkonzentration c_G (Aufgabengröße) muss gezielt so beeinflusst werden, dass sie auch bei zu geringer

Insulinkonzentration c_i (Störgröße) den normalen c_G -Bereich (Bild 1.18a) nicht verlässt. Das ist mit einem implantierbaren Gerät mit einer Insulinpumpe möglich. Der Block „Blutkreislauf, Pankreas“ in Bildteil b und c ist die Strecke mit der Insulinpumpe als Stellglied und der Pumpenspannung u_M als Stellgröße. Bildteile b und c zeigen eine Steuerung bzw. Regelung der Blutzuckerkonzentration c_G . Die beste Lösung ist die Regelung, wobei der Sollverlauf $c_{G,s}$ mit einem programmierbaren Signalgenerator (Mikrorechner) vorgegeben werden kann.

In den vorherigen Ausgaben dieses Werks wurde noch von der Notwendigkeit der rein gesteuerten Insulinabgabe berichtet, mangels verfügbarer, ausreichend genauer Sensoren zum Schließen des Regelkreises. Das gilt inzwischen als veraltet. Aktuelle Systeme zur automatisierten Insulinabgabe reagieren zumindest teilweise geregelt. Wobei lediglich noch größere Mahlzeiten angekündigt werden müssen, im Sinne einer Vorsteuerung – das System aber ansonsten automatisiert im geschlossenen Regelkreis die jeweils angemessene Insulinmenge abgibt (American Diabetes Association, 2025).



Beispiel 1.12: Regelung einer Raumtemperatur

In Bild 1.19a soll die Raumtemperatur ϑ mittels Wärmezufuhr über einen Heizkörper (Hk) gezielt beeinflusst werden. Störend wirken vor allem Schwankungen der Außentemperatur ϑ_a . Die Wärme wird mittels Heizwasser (Hw) zugeführt, das vor dem Thermostatventil (Tv, Details in Bildteil b) mit dem Druck p_v und der Temperatur ϑ_v anliegt. Das Thermostatventil ist eine Mess- und Regeleinrichtung: Die gewünschte Solltemperatur ϑ_s im Raum wird mit der Sollwertschraube (S) eingestellt. Der Istwert wird durch die Dehnung x_B des mit einer Flüssigkeit (Fl) gefüllten Faltenbalgs (Ba) erfasst. Der Soll-/Istwert-Vergleich wird zwischen den beiden Wegen x_s (Stellung Sollwertschraube) und x_B (Istwert) vorgenommen. Die Regeldifferenz $e = x_s - x_B$ steuert die Zuflussventilstellung s_z für den Heizkörper (ohne Hilfsenergie).

Die Versorgungsstörgrößen p_v und ϑ_v sollen möglichst konstant sein. Für p_v reicht eine konstante Drehzahl der Vorlaufpumpe P aus. ϑ_v kann je nach Raumwärmebedarf auch stärker absinken. Daher wird ϑ_v im Kessel (K) mit einer weiteren Regelung auf einem Sollwert $\vartheta_{v,s}$ gehalten (Bild 1.19a und d). Der Soll-Istwert-Vergleich wird mit den elektrischen Spannungen u_ϑ (von Sensor Se1) und $u_{\vartheta,s}$ durchgeführt. Bei positiver Regeldifferenz $e = u_{\vartheta,s} - u_\vartheta$ schaltet das Regelgerät (Rg) einen Brenner (Br) ein und bei negativem e wieder ab usw. (sog. Zweipunktreger, Abschnitt 4.3). Dabei pendelt ϑ_v zwar ein wenig um den Sollwert, was sich aber auf die Raumtemperatur ϑ kaum auswirkt. Um Heizenergie zu sparen, wird der Sollwert $\vartheta_{v,s}$ bzw. $u_{\vartheta,s}$ mit einem Steuergerät gesenkt, wenn die Außentemperatur ϑ_a (Sensor Se2) steigt (und umgekehrt).

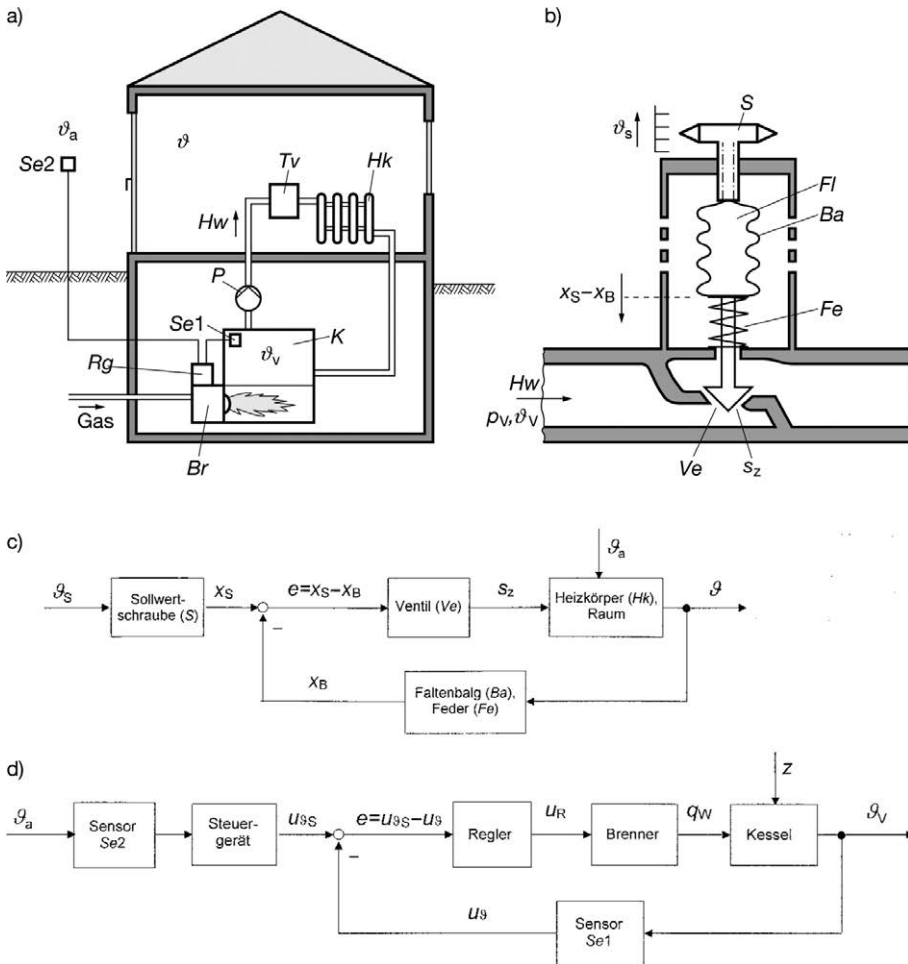


Bild 1.19 Raum- und Heizwassertemperaturregelung. a) Anlagenschema, b) Thermostatventil zur Raumtemperaturregelung, c) Blockscheema der Raumtemperaturregelung, d) Blockscheema der Kesselwassertemperaturregelung

1.6 Zur Lösung regelungstechnischer Aufgabenstellungen

Allgemein lässt sich eine systematische Vorgehensweise zur Lösung technischer Aufgabenstellungen in zeitlich aufeinanderfolgende Projektphasen gliedern wie z. B.

1. Aufgabenstellung formulieren,
2. Lösungsvarianten ausarbeiten,
3. beste Lösung technisch realisieren.

Im Folgenden sollen diese drei Phasen für die Aufgabenstellung behandelt werden, einen bestmöglichen Regler für den Standard-Regelkreis von Bild 1.20 (vgl. Abschnitt 1.3) zu finden und technisch zu realisieren. Vorausgesetzt wird, dass die Regelstrecke bekannt ist, d. h., dass die Aufgaben- bzw. Regelgröße x benannt, der Einfluss wesentlicher Störgrößen z abgeschätzt und geeignete Mess- und Stelleinrichtungen ausgewählt wurden (vgl. Abschnitt 11.1 bzw. 11.4). Alle Projektphasen können mit geeigneter CAE-Software wie z. B. Matlab/Simulink (vgl. Anhang A.12.1) wirkungsvoll unterstützt werden.

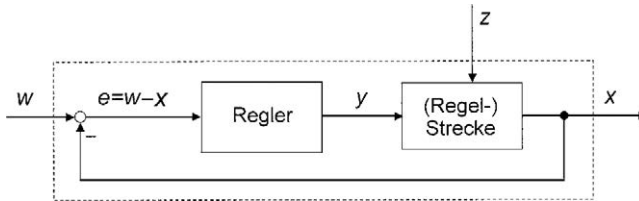


Bild 1.20 Standard-Regelkreis (Benennungen vgl. Bild 1.11)

1.6.1 1. Aufgabenstellung (Spezifikationen) für Regelung bzw. Regler formulieren

Genauigkeit und Schnelligkeit vorgeben

Es ist festzulegen, wie schnell und genau der Regler die Regelgröße x an die Führungsgröße w angleichen soll, wenn sich Störgröße z oder Führungsgröße w (Eingangsgrößen in den gestrichelten Block von Bild 1.20) in betriebstypischer Weise verändern. Betriebstypische Änderungen werden dabei häufig durch **Testsignale** (vgl. Abschnitt 2.4) ersetzt, die einen „schlimmsten Fall“ darstellen und mit denen zugleich rechnerisch z. B. in einer Simulation und bei der Inbetriebnahme einfacher umzugehen ist. In vielen Fällen können die Veränderungen als stufenförmig angenommen werden. Als Beispiel zeigt Bild 1.21a das **Störverhalten** (nur z wird verändert, w bleibt konstant) eines Regelkreises bei stufenförmiger Änderung der Störgröße z (die Zeitverläufe entsprechen etwa der Füllstandsregelung von Bild 1.7d). Bild 1.21b ist ein Beispiel für das **Führungsverhalten** (nur w wird verändert, z bleibt konstant) bei stufenförmiger Änderung der Führungsgröße w .

Für die Festlegung von Genauigkeit und Schnelligkeit werden **Kenngrößen** verwendet wie z. B. Ausregelzeit T_{aus} und Überschwingweite x_m für die Schnelligkeit und bleibende Regeldifferenz e_b für die Genauigkeit (vgl. Bild 1.21, mit Hochkomma beim Störverhalten). Mit dem **Toleranzbereich** $\pm \varepsilon$ um die Führungsgröße w wird eine Obergrenze für die bleibende Regeldifferenz e_b bzw. e'_b festgelegt. Zudem ist der Toleranzbereich erforderlich, um die Ausregelzeit T_{aus} bzw. T'_{aus} zu bestimmen. In der Aufgabenstellung werden üblicherweise Mindestwerte für Genauigkeit und Schnelligkeit durch Vorgabe von Ober-

grenzen festgelegt. Wegen technischer Randbedingungen müssen zugleich bestimmte Wertebereiche Z_h , Y_h , X_h und W_h eingehalten werden, was im Folgenden erläutert wird.

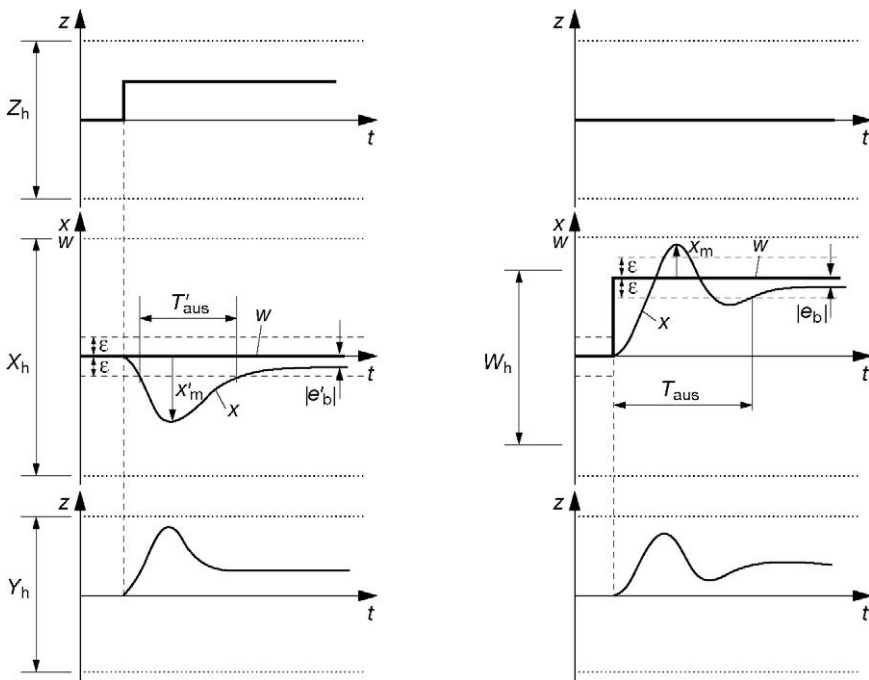


Bild 1.21 a) Störverhalten (T'_{aus} , x'_m , e'_b), b) Führungsverhalten (T_{aus} , x_m , e_b)

T_{aus} Ausregelzeit, x_m Überschwingweite, $e = w - x$ Regeldifferenz, e_b bleibende Regeldifferenz

Technische Randbedingungen ermitteln (z. B. vorgegebene Beschränkungen, verfügbare Energiequellen usw.)

Die Stellgröße y ist grundsätzlich beschränkt: Zum Beispiel hat der Zuflussschieber bei Füllstands- und Raumtemperaturregelung einen oberen und einen unteren Anschlag (Bild 1.7 bzw. Bild 1.8). Der Bereich, innerhalb dessen die Stellgröße y einstellbar ist, heißt **Stellbereich** Y_h . Aufgrund ihrer Beschränkungen kann die Stellgröße y die Regelgröße x nur über einen bestimmten Wertebereich einstellen. Im Falle der Raumtemperaturregelung (Beispiel 1.6) stellt sich z. B. bei größtmöglicher Zuflussschieberöffnung eine bestimmte Höchsttemperatur im Raum ein, die aber auch noch von der Störgröße z , der Außentemperatur ϑ_a , abhängig ist. Der **Störbereich** Z_h ist der Bereich, innerhalb dessen die Störgröße z liegen darf, ohne dass die Funktionsfähigkeit einer Steuerung oder Regelung beeinträchtigt wird. Liegt z. B. die Außentemperatur ϑ_a unterhalb des zulässigen Störbereiches, dann kann auch bei größtmöglicher Heizleistung (Stellbereich!) eine gewünschte Raumtemperatur von z. B. 20 °C nicht mehr erreicht werden. Der **Regelbereich** X_h ist der Bereich, innerhalb dessen die Regelgröße x unter Berücksichtigung

vereinbarter Werte der Störgröße z eingestellt werden kann. Der **Führungsbereich** W_h ist der Bereich, innerhalb dessen die Führungsgröße w liegen kann (Bild 1.21).

Testbedingungen definieren

Es sind Spezifikationen und Bedingungen zusammenzustellen, mit denen die Funktionsfähigkeit der Regelung in den folgenden Projektphasen nachgewiesen werden kann (z. B. gegenüber einem Auftraggeber).

1.6.2 2. Varianten für geeignetes Reglerverfahren ausarbeiten

Reglertyp auswählen

Zum Beispiel PID-Regler (Abschnitt 4.2), Zweipunkt- oder Dreipunktregler (Abschnitt 4.3), Fuzzy-Regler (Abschnitt 10).

Bestmögliche Einstellung des ausgewählten Reglertyps finden

In unkritischen Fällen oder Fällen, in denen jahrelange Erfahrungen vorliegen, können z. B. PID-Regler direkt an Gerät oder Anlage eingestellt und in Betrieb genommen werden (vgl. Abschnitt 5.5.2, Einstellregeln). Dieser Lösungsweg setzt voraus, dass die reale Strecke (oder ein geeignetes Labormodell) mit Mess- und Stelleinrichtung zum Experimentieren zur Verfügung steht.

In kritischen Fällen, z. B. bei schnellen Vorgängen mit hohen Genauigkeits- oder Sicherheitsanforderungen oder hohem Kostenrisiko, ist ein rein experimentelles Vorgehen meist nicht vertretbar. Dann muss das Regelkreisverhalten (Bild 1.20) zumindest für kritische Betriebszustände vorausberechnet oder simuliert werden. Dazu sind **mathematische Modelle** (z. B. Differenzialgleichungen) des Verhaltens der gegebenen Strecke und des gesuchten Reglers erforderlich. Für die Strecke werden mathematische Modellbildung und häufig verwendete Standardmodelle in Abschnitt 2.3 und Kapitel 3 behandelt. Geeignete mathematische Modellvarianten für den Regler ergeben sich dann aus Berechnung und Simulation (Kapitel 4 und 5 für analoge und Kapitel 6 bis 9 für digitale Regler). Ein Ergebnis ist z. B. eine PID-Reglergleichung mit zahlenmäßig bestimmten Reglerparametern.

Testbedingungen überprüfen

Es ist nachzuweisen, dass ein ermitteltes Reglerverhalten die für diese Projektphase definierten Testbedingungen erfüllt. Das können Simulationsstudien mit detaillierteren Streckenmodellen sein oder auch praktische Versuche mit der realen Strecke oder einem Labormodell. Dabei bietet das sog. **schnelle Regler-Prototyping** (auch RCP: Rapid Control Prototyping) eine sehr flexible Testmöglichkeit (Bild 1.22): Auf einem Entwicklungsrechner kann der Regler zunächst mit einem mathematischen Streckenmodell simuliert werden.

Bei zufriedenstellendem Ergebnis kann das Reglermodell an der realen Strecke (oder am Labormodell) getestet werden, indem es „auf Knopfdruck“ mit einem C-Code-Generator automatisch in ein C-Programm übersetzt (daher „schnelles“ Regler-Prototyping), kompiliert und in einen Prozessrechner (s. Glossar und Abschnitt 11.3.2) geladen wird (Bild 1.22 unterer Teil). Regelungstechnische CAE-Software wie z. B. Matlab/Simulink bietet ferner sehr flexible Einstellmöglichkeiten am laufenden Regler-Prototyp.¹⁴⁾

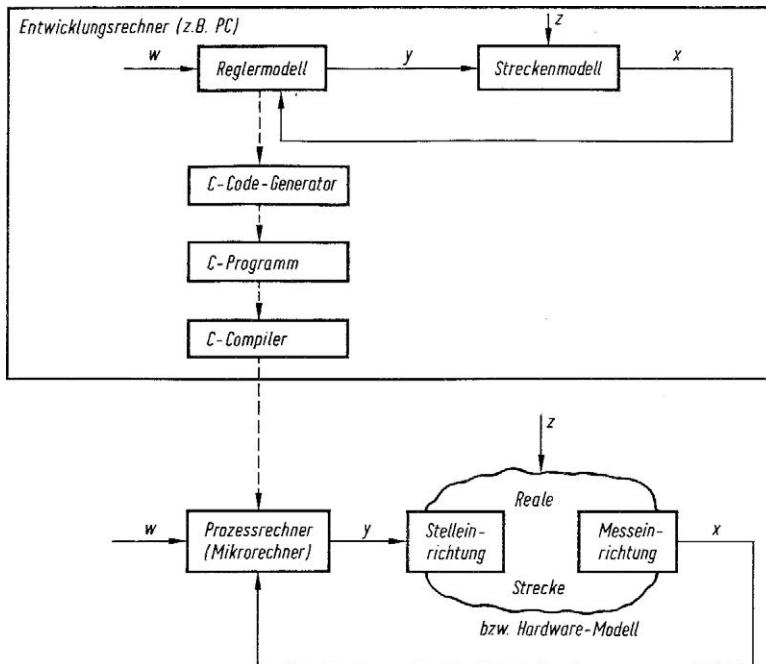


Bild 1.22 Simulation und Test an einer realen Strecke mittels schnellem Regler-Prototyping

1.6.3 3. Bestes Reglerverhalten technisch realisieren

Realisierungsart für den Regler festlegen

Aus der vorhergehenden zweiten Projektphase liege das mathematische Modell eines besten Reglerverhaltens vor, über dessen endgültige technische Realisierung nun zu entscheiden ist. Dabei spielen technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte eine Rolle. Zu den technischen gehören die einzusetzenden physikalischen Medien und die erforderlichen Hilfsenergiequellen.

¹⁴ Matlab/Simulink (mit Zusatzprogramm Simulink Real Time bzw. Simulink Desktop Realtime) erzeugt ein Echtzeitbetriebssystem, wobei z. B. auch ein preisgünstiger PC als Prozessrechner verwendet werden kann.