



Fuzzy Control methodenorientiert

von
Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Harro Kiendl

Mit 212 Bildern

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1997

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Kiendl, Harro:

Fuzzy control methodenorientiert / von Harro Kiendl. -

München ; Wien : Oldenbourg, 1997

ISBN 3-486-23554-0

© 1997 R. Oldenbourg Verlag

Rosenheimer Straße 145, D-81671 München

Telefon: (089) 45051-0, Internet: <http://www.oldenbourg.de>

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Lektorat: Elmar Krammer

Herstellung: Rainer Hartl

Umschlagkonzeption: Mendell & Oberer, München

Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier

Druck: Grafik + Druck, München

Bindung: R. Oldenbourg Graphische Betriebe GmbH, München

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	XI
1 Einführung	1
1.1 Entstehung der Fuzzy-Technologie	1
1.2 Anwendungsbereiche der Regelungstechnik	2
1.3 Bedeutung von Fuzzy Control	3
2 Grundbegriffe der Regelungstechnik.....	5
2.1 Regelkreise mit Menschen als Regler	5
2.2 Technische Regelkreise	7
2.3 Regelungsziele	10
2.4 Einfache klassische Reglerfunktionale	13
2.5 Regler und Regelstrecken mit und ohne Erinnerung.....	18
2.6 Lineare und nichtlineare Regler und Regelstrecken.....	20
2.7 Entwurfskonzept für klassische Regler	25
3 Regleroptimierung von Hand und modellgestützte Regleroptimierung.....	27
3.1 Regleroptimierung von Hand.....	27
3.2 Modellgestützte Regleroptimierung.....	29
3.2.1 Faustformelverfahren	29
3.2.2 Frequenzkennlinienverfahren.....	31
3.2.3 Regleroptimierung durch modellgestützte Optimierung eines Gütemaßes	35
4 Flexiblere klassische Reglerfunktionale.....	43
4.1 Industrielle PID-Regler.....	43
4.2 Lineare Regler höherer Ordnung	44

4.3	Komplexere Reglerstrukturen.....	48
4.3.1	Vorfilter und Vorsteuerung.....	48
4.3.2	Mehrschleifige Regelkreise und Zustandsregler.....	50
4.3.3	Zustandsbeobachter.....	53
4.3.4	Modellgestützte Regelkreisstrukturen.....	54
4.3.5	Robuste und adaptive Regler.....	55
4.3.6	Abtastregler.....	56
4.3.7	Kennfeldregler.....	57
4.3.8	Mehrgrößenregelungssysteme.....	58
4.4	Lineare, nichtlineare und optimale Regler.....	59
5	Regelbasierte Regler als Vorläufer von Fuzzy-Reglern	63
5.1	Regelbasierte Beeinflussung und Modellierung dynamischer Systeme.....	63
5.2	Linguistische Regeln.....	65
5.3	Abgrenzung regelbasierter Regler von Fuzzy-Reglern.....	66
5.4	Regelbasierte Regler vom einfachen Typ.....	67
5.5	Komplexere regelbasierte Regler.....	74
5.6	Interpretation der konstruktiven und der destruktiven Inferenz.....	79
5.6.1	Interpretation der konstruktiven Inferenz.....	79
5.6.2	Interpretation der destruktiven Inferenz.....	80
5.7	Konstruktion der Ausgangsmengen.....	81
5.8	Entdeckung und Beseitigung von Unvollständigkeit.....	84
5.9	Entdeckung und Beseitigung von Mehrdeutigkeit.....	88
5.10	Redundante Regeln.....	91
5.11	Regelbasierte Regler mit mehreren Eingangsgrößen.....	92
5.12	Regelbasierte Regler mit mehreren Ausgangsgrößen.....	95
5.13	Allgemeinere regelbasierte Strukturen.....	100
6	Einsträngige Fuzzy-Regler.....	103
6.1	Weiche Zuordnung durch Zugehörigkeitsfunktionen.....	104
6.2	Fuzzy-Mengen.....	109
6.3	Einfache Fuzzy-Operatoren.....	111
6.4	Fuzzy-Regler nach Mamdani.....	115
6.4.1	Fuzzifizierung.....	116

6.4.2	Aggregation.....	116
6.4.3	Aktivierung	117
6.4.4	Akkumulation.....	119
6.4.5	Inferenz	122
6.4.6	Defuzzifizierung.....	123
6.4.7	Berücksichtigung von Glaubensgraden.....	127
6.4.8	Gesamtstruktur des Fuzzy-Reglers nach Mamdani.....	127
6.5	Abgewandelte Reglerstrukturen.....	132
7	Entwurf von Fuzzy-Reglern am Beispiel eines Mischventils	135
7.1	Mischwasserbereitungseinrichtungen	135
7.2	Systematischer Entwurf von Fuzzy-Reglern.....	136
7.2.1	Konfigurierung der Regelkreisstruktur	136
7.2.2	Festlegung der Struktur des Fuzzy-Reglers.....	137
7.2.3	Erstellung der Regelbasis	138
7.2.4	Ersteinstellung der Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen	138
7.2.5	Optimierung des Fuzzy-Reglers.....	139
7.3	Erstentwurf eines Fuzzy-Reglers für ein Mischventil.....	139
7.3.1	Konfigurierung der Regelkreisstruktur	139
7.3.2	Festlegung der Struktur des Fuzzy-Reglers und Ersteinstellung der Zugehörigkeitsfunktionen	140
7.3.3	Erstellung der Regelbasis	141
7.3.4	Optimierung der Zugehörigkeitsfunktionen	142
7.3.5	Regelungsverhalten.....	142
7.3.6	Reglerkennlinie	143
7.4	Neukonfigurierung des Regelungssystems	145
7.4.1	Erweiterung der Regelbasis.....	146
7.4.2	Zugehörigkeitsfunktionen	147
7.4.3	Verbessertes Regelungsverhalten.....	147
7.4.4	Reglerkennfeld	148
7.4.5	Entwurf und technische Realisierung.....	150
7.5	Diskussion.....	150
8	Weiterführende Anwendungsaspekte	151
8.1	Fuzzy-Regler mit mehr als zwei Eingangsgrößen.....	151
8.2	Fuzzy-Regler mit strukturell mehrdeutigen / widersprüchlichen Regelbasen.....	152

8.3	Fuzzy-Regeleinrichtungen mit Erinnerung	153
8.4	Fuzzy-Regler auf höherer Automatisierungsebene	155
8.5	Genauigkeitsanforderungen an die Sensoren	156
9	Eigenschaften von Fuzzy-Operatoren.....	159
9.1	UND- und ODER-Operatoren	160
9.2	Gemeinsame Eigenschaften der UND- und ODER-Operatoren	164
9.3	Unterschiedliche Eigenschaften der UND- und ODER-Operatoren	167
9.4	Einbeziehen der Defuzzifizierung.....	174
9.4.1	Gleichzeitige Aktivierung mehrerer Regeln mit derselben Konklusion.....	174
9.4.2	Unsymmetrische ausgangsseitige Zugehörigkeitsfunktionen	175
9.5	Berücksichtigung des Realisierungsaufwandes.....	176
9.5.1	Regelaktivierung	177
9.5.2	Akkumulation.....	179
9.6	Kompensatorische Operatoren.....	181
9.7	Implikationsoperatoren	189
10	Zweisträngige Fuzzy-Regler	193
10.1	Flexibilität und Transparenz.....	193
10.2	Positives und negatives Erfahrungswissen.....	197
10.3	Negative Regeln.....	199
10.4	Zweisträngige Fuzzy-Reglerstruktur.....	201
10.5	Hyperinferenzstrategien.....	202
10.6	Hyperdefuzzifizierungsstrategien	204
10.7	Vergleich von ein- und zweisträngigen Fuzzy-Reglern.....	207
10.7.1	Verbot aller Ausgangsgrößenwerte $u \neq u_0$	208
10.7.2	Berücksichtigung verbotener Zonen	210
10.7.3	Berücksichtigung von Warnungen	212
10.7.4	Verarbeitung von globalen Regeln.....	212
10.7.5	Getrennte Verarbeitung von positiven und negativen Regeln	216
10.7.6	Zusammenfassender Vergleich	217

10.8	Anwendungsbeispiel Positionsregelung mit Haftreibung	218
10.8.1	Die Regelstrecke	218
10.8.2	Einsträngiger Fuzzy-Regler	220
10.8.3	Zweisträngiger Fuzzy-Regler mit Verbot- regel R_1^- zur Vermeidung der Ruhespannung.....	222
10.8.4	Zweisträngiger Fuzzy-Regler mit Verbot- regel R_2^- zur Verkleinerung der bleibenden Regelabweichung.....	224
10.8.5	Zweisträngiger Fuzzy-Regler mit beiden Verbotsregeln R_1^- und R_2^-	225
10.8.6	Anpassung an eine modifizierte Regelstrecke.....	226
10.8.7	Diskussion.....	226
10.9	Anwendungspotential zweisträngiger Fuzzy-Regler.....	228
11	Fuzzy-Regler mit Inferenzfiltern.....	231
11.1	Neue Interpretation von Zugehörigkeitsfunktionen	232
11.2	Das Inferenzfilter	233
11.2.1	Quadratische Filterfunktion.....	234
11.2.2	Lineare Filterfunktion	236
11.2.3	δ -Funktion als Filterfunktion.....	238
11.3	Allgemeinere Filterfunktionen.....	238
11.4	Invarianzforderungen.....	241
11.5	Wirkung und Anwendungspotential des Inferenzfilters.....	246
11.6	Filterung von Singletons	250
11.7	Zweisträngige Fuzzy-Regler mit Inferenzfilter.....	251
11.7.1	Reglerstrukturen.....	251
11.7.2	Eigenschaften	253
11.7.3	Variante für schnelle Echtzeitanwendungen	257
11.8	Verzicht auf die Translationsinvarianz	258
12	Datenbasierte Fuzzy-Modellierung und Regelgenerierung.....	265
12.1	Grundaufgabe der datenbasierten Fuzzy-Modellierung.....	265
12.2	Fuzzy-Modellierung durch vollständige Regeln.....	267
12.3	Fuzzy-Modellierung durch globale Regeln.....	269
12.4	Fuzzy-Modellierung durch relevante Regeln.....	271
12.4.1	Motivierung des Relevanzbegriffes.....	271
12.4.2	Ein Relevanzmaß	272

12.4.3	Regelgenerierung mit dem Fuzzy-ROSA-Verfahren	275
12.4.4	Reduktionsstrategien	278
12.5	Anwendungen des Fuzzy-ROSA-Verfahrens und des Relevanzindex	279
13	Realisierung von Fuzzy-Reglern und Entwurfsstrategien	283
13.1	Realisierung von Fuzzy-Reglern	283
13.2	Modellfreie und modellbasierte Entwurfsstrategien	286
14	Stabilitätsanalyse	289
14.1	Modellbasierte Stabilitätsanalyse	289
14.1.1	Methode der konvexen Zerlegung	289
14.1.2	Direkte Methode von Ljapunov	297
14.2	Stabilitätsanalyse ohne Prozeßmodell	300
15	Anwendungspotential von Fuzzy Control	303
Anhang	305
A	Aussagen, Eigenschaften und Teilmengen	305
B	Aussagenlogik	307
C	Korrespondenzen zwischen Aussagen und Mengen	316
D	Analytische Berechnung der gefilterten Zugehörigkeitsfunktion	319
Literaturverzeichnis	321
Sachregister	333

Vorwort

Fuzzy Control war vor 1990 in Deutschland weitgehend unbekannt. Der danach einsetzende Fuzzy-Boom löste zwiespältige Reaktionen aus: Skeptiker reagierten mit Zurückhaltung auf Berichte, nach denen bisher unbewältigte Regelungsprobleme nun plötzlich mit einfachen, erfahrungsbasierten Methoden lösbar sein sollten. Enthusiasten sahen in Fuzzy Control eine Universalmethode, die die herkömmliche Regelungstechnik weitgehend überflüssig mache. Inzwischen ist deutlich geworden, daß Fuzzy Control ein ernstzunehmender neuer Zweig der Regelungstechnik ist. Je nach Anwendungsbereich lassen sich Regelungsprobleme besser mit der herkömmlichen Regelungstechnik oder mit Fuzzy Control lösen. Die Methodenentwicklung von Fuzzy Control ist noch keineswegs abgeschlossen. Vielmehr bietet Fuzzy Control als noch junger Wissenschaftszweig besonders gute Chancen für praxisrelevante methodische Neuentwicklungen.

Dieses Buch richtet sich an drei Lesergruppen: Studierende technischer und anderer Disziplinen, die noch keinerlei Vorkenntnisse über die herkömmliche Regelungstechnik haben, möchte ich für die Regelungstechnik und speziell für Fuzzy Control interessieren. Studierende, die bereits mit der herkömmlichen Regelungstechnik vertraut sind, möchte ich in die Grundlagen und ausgewählte fortgeschrittene Methoden von Fuzzy Control einführen. Fuzzy-Experten in Forschungs- und Entwicklungszentren und Anwendern möchte ich Vorteile dieser neuen Methoden für die Praxis aufzeigen. Dementsprechend ist das Buch aufgebaut.

Die Kapitel 2 bis 4 vermitteln ohne Verwendung von viel Mathematik einen Überblick über Begriffe und Methoden der herkömmlichen Regelungstechnik. Sie sollten auch für Nichtfachleute verständlich sein und dienen zur Einordnung und Motivation von Fuzzy Control.

In den Kapiteln 5 bis 9 werden allgemein bekannte Grundlagen von Fuzzy Control mit prinzipiellen Anwendungsmöglichkeiten behandelt. Dabei wird z. B. durch die Verwendung der Begriffe der konstruktiven und destruktiven Inferenz von üblichen Darstellungen abgewichen, um methodische Weiterentwicklungen organisch vorzubereiten.

In den Kapiteln 10 bis 14 werden ausgewählte fortgeschrittene und bereits praktisch erprobte neue Methoden von Fuzzy Control vorgestellt, insbesondere die zweisträngige Fuzzy-Reglerstruktur mit Hyperinferenz und Hyperdefuzzifizierung zur Verarbeitung von positiven und negativen Regeln (Kapitel 10) sowie das Konzept des Inferenzfilters, das herkömmliche Methoden zur Defuzzifizierung verallgemeinert und stufenlose Übergänge dazwischen ermöglicht (Kapitel 11). Im Anschluß werden Methoden zur datenbasierten Regelgenerierung, insbesondere das Fuzzy-ROSA-Verfahren behandelt. Es generiert sowohl positive als auch negative Regeln und ist damit auf die zweisträngige Fuzzy-Reglerstruktur abgestimmt (Kapitel 12). Im Anschluß werden Möglichkeiten zur Reglerrealisierung und Entwurfsstrategien (Kapitel 13) und ausgewählte Methoden zur Stabilitätsanalyse (Kapitel 14) skizziert. Abschließend wird das Anwendungspotential von Fuzzy Control aufgezeigt (Kapitel 15).

Mein Bemühen um eine möglichst systematische Darstellung bereits erprobter Methoden hat auch zu neuen, noch nicht erprobten Ideen geführt. Ich habe diese Ideen in einer kompakten Form skizziert, die dem Leser vergleichsweise deutlich mehr Aufmerksamkeit abverlangt. Dies betrifft die kompensatorischen Operatoren und die Drehmomentmethode (Abschnitte 9.6 und 11.8). Ferner gilt dies für die modellbasierte Stabilitätsanalyse bis hin zur Einführung mehrdeutiger Ljapunov-Funktionen (Abschnitt 14.1).

Für die behandelten Anwendungsbeispiele wurden die Fuzzy-Reglerstrukturen mit Hyperinferenz und Hyperdefuzzifizierung sowie mit Inferenzfilter mit Hilfe des Software-Tools DORA entworfen. Der Fuzzy-Initiative NRW danke ich für die Förderung der Entwicklung dieses Tools. Für die praktische Anwendung der datenbasierten Regelgenerierung wurde das Software-Tool WINROSA eingesetzt. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die Förderung des zugrundeliegenden Fuzzy-ROSA-Verfahrens. Großen Dank schulde ich Frau Gertrud Kasimir und Frau Karin Puzicha für ihre Geduld und Umsicht, mit der sie das Manuskript geschrieben und in die druckfertige Form gebracht haben. Mein herzlicher Dank gilt auch Frau Gabriele Rebbe für ihre Ideen und Sorgfalt bei der Bildgestaltung. Für kritische Diskussionen, für sorgfältige Manuskriptdurchsicht und Durchführung von Simulationen habe ich zu danken: Christian Frenck, Holger Jessen, Rainer Knicker, Angelika Krone, Andreas Michalske, Frank Niewels, Jörg Praczyk, Johannes-Jörg Rüger und Ulf Schwane.

1 Einführung

1.1 Entstehung der Fuzzy-Technologie

Wie kaum ein anderes Thema hat die Fuzzy-Technologie kontroverse Diskussionen ausgelöst. Dies ist verständlich, denn die zugrundeliegende, im Jahre 1965 von *Zadeh* erfundene, *Fuzzy-Logik (unscharfe Logik)* ist revolutionär: Sie paßt nicht zur bisherigen Vorstellung von Logik als Garant für Exaktheit beim Denken. Deswegen wurde die Fuzzy-Logik anfänglich vielfach auch belächelt.

In den achtziger Jahren wurde dann in Japan der praktische Nutzen der Fuzzy-Logik erkannt: Fuzzy-geregelte Waschmaschinen und Staubsauger übertrafen herkömmliche Geräte durch bessere Funktionalität und höheren Bedienungskomfort deutlich und erregten als *denkende Konsumgüter* Aufsehen. Als Fuzzy-Regler danach auch in großtechnischen Anwendungen, wie in der U-Bahn von Sendai, erfolgreich eingesetzt wurden, sah man in Fuzzy Control das künftige Universalwerkzeug der Regelungstechnik.

In Europa und besonders in Deutschland stand man Fuzzy Control zunächst skeptisch gegenüber. Es erschien utopisch, daß ein *unscharfer* Regler präzise funktionieren und mit simplem Erfahrungswissen Probleme lösen könnte, die mit der klassischen Regelungstechnik zuvor nicht lösbar waren. Nahrung erhielt diese Skepsis dadurch, daß in einigen Fuzzy-Konsumgütern nicht der Fuzzy-Regler, sondern zusätzliche Sensoren für die Qualitätsverbesserung verantwortlich waren. So bestand das Neue an der Fuzzy-Waschmaschine eigentlich nur darin, daß der Trübungsgrad der Lauge gemessen wurde. Nicht zuletzt sah man auch Parallelen zur Entwicklung im Bereich der Expertensysteme, wo die anfängliche Euphorie stark zurückgenommen werden mußte, als sich viele Versprechungen als nicht einlösbar erwiesen.

Im Jahre 1990, also im Vergleich zu Japan mit 10jähriger Verspätung, wurden die Themen Fuzzy-Logik und Fuzzy Control dann auch in Deutschland von den Hochschulen, Forschungsinstituten und der Industrie ernsthaft aufgegriffen. Als Ergebnis dieser Arbeiten zeichnet sich immer deutlicher ab,

daß die Fuzzy-Technologie keine vorübergehende Mode, sondern durchaus eine Revolution ist, die mit Denkgewohnheiten bricht und praktisch vorweisbare Vorteile bringt. Insbesondere ist mit Fuzzy Control ein neuer Zweig der Regelungstechnik entstanden, der bestehende Lösungen verbessern kann und neue technische Anwendungsgebiete erschließt. Weitergehend ist Fuzzy Control als eine Querschnittswissenschaft anzusehen, die auch in nichttechnischen Bereichen Vorteile verspricht.

1.2 Anwendungsbereiche der Regelungstechnik

Die klassische Regelungstechnik hat in den vergangenen 50 Jahren eine überragende praktische Bedeutung erlangt. Augenfällig ist der Einsatz klassischer Regler in Konsumgütern (Tabelle 1.1). Ferner sind klassische Regler in nahezu allen industriellen Einsatzbereichen unentbehrlich geworden (Tabelle 1.2). Sie sorgen dafür, daß Prozeßvariablen, wie die in der Tabelle aufgeführten Größen, mit hoher Genauigkeit auf bestimmten Sollwerten gehalten werden oder gewünschten Sollwertverläufen schnell folgen. Die Regelungstechnik erhöht den Automatisierungsgrad und steigert damit die Produktivität. Sie verbessert die Produktqualität und den Bedienkomfort. Sie spart Kosten ein, vermindert den Energie- und Materialeinsatz, reduziert so schädliche Emissionen und schont damit die Umwelt. Zu den Leistungen der klassischen Regelungstechnik zählt auch, daß sie den Schlüssel für das Verständnis und die Beeinflussung von Regelungsvorgängen auch außerhalb der Technik liefert.

Kühlschränke	Temperatur
Waschmaschinen	Temperatur, Füllstand
Backöfen	Temperatur
Bohrmaschinen	Drehzahl
Fotoapparate	Lichtmenge
Automobile	Geschwindigkeit

Tabelle 1.1 Beispiele für Konsumgüter (links) und darin geregelte Größen (rechts).

So wird die Funktion biologischer Organismen entscheidend durch eine Vielzahl von Regelungsvorgängen bestimmt. Hierzu zählt etwa die Regelung der Körpertemperatur und der Herzfrequenz oder die Gleichgewichtsregelung beim aufrechten Gang. Eine genaue Kenntnis der physiologischen Regelungsvorgänge läßt sich beispielsweise nutzen, um Medikamente ge-

zielter zu dosieren. Ferner ermöglicht es die Regelungstechnik, die Auswirkungen von Eingriffen in Öko-Systeme zu verstehen, vorherzusagen oder unter Umständen sogar gezielt zu steuern. Schließlich wird auch das Wirtschaftsgeschehen durch zahllose Regelungsvorgänge bestimmt: Einzelne Akteure – Individuen und Unternehmen – richten ihr Verhalten nach einer für sie günstigen Strategie aus und treten über den Markt miteinander in Wechselwirkung. Hierdurch entsteht ein stark vermaschtes, rückgekoppeltes Gesamtsystem, dessen Globalverhalten – wie etwa der Wechsel zwischen Rezessionen und Aufschwungphasen – zwar regelungstechnisch verstanden, aber bisher noch nicht befriedigend gezielt beeinflusst werden kann. Die Nutzung regelungstechnischer Methoden in solchen nichttechnischen Anwendungsbereichen ist vielversprechend, steht aber noch ganz am Anfang, da es in diesen Bereichen bei weitem schwieriger als in der Technik ist, das dynamische Verhalten der beteiligten Prozesse durch ein mathematisches Modell zu beschreiben.

Verfahrenstechnik	Druck, Temperatur, pH-Werte
Umwelttechnik	CO- und NO _x -Konzentration
Fertigungstechnik	Drehzahl, Geschwindigkeit
Energietechnik	Frequenz, Leistung
Robotik	Position, Geschwindigkeit
Weltraumtechnik	Position, Geschwindigkeit

Tabelle 1.2 Industrielle Einsatzbereiche der Regelungstechnik (links) und Beispiele für geregelte Prozeßgrößen (rechts).

1.3 Bedeutung von Fuzzy Control

Die klassische Regelungstechnik geht von *qualitativen Konzepten* aus, die dann mit *mathematischen Methoden* oder aufgrund praktischer Erfahrungen ausgestaltet werden. Beispiele hierfür sind die Konzepte der Rückkopplung von Prozeßvariablen oder der Rekonstruktion nichtmeßbarer Prozeßgrößen aus meßbaren Größen. Die mathematischen Methoden sind dann von großem praktischem Wert, wenn man über ein sehr genaues mathematisches Modell des zu regelnden Prozesses verfügt. Beispielsweise kann man das Verhalten eines Satelliten bei Betätigung der Steuerdüsen wegen des Fehlens der Luftreibung sehr genau durch Bewegungsgleichungen der Mechanik beschreiben. Derartige Anwendungen, die auf guten mathematischen

Modellen der Regelstrecke basieren, haben die Entwicklung mathematischer Methoden für die Regelungstechnik sehr stimuliert. Spektakuläre Erfolge, wie die Mondlandung, machen die dabei erzielten enormen Fortschritte deutlich.

Meistens kann man das Verhalten der Regelstrecke aber nur *näherungsweise* beschreiben, insbesondere, wenn die Regelstrecke sehr komplex oder ihr innerer Wirkungsmechanismus nicht ausreichend bekannt ist. Dann stoßen die derzeit bekannten mathematisch orientierten Methoden der Regelungstechnik an Grenzen. Deshalb kann man viele Anwendungsprobleme nur durch eine empirische Vorgehensweise lösen. Beispielsweise können Prozeßexperten aufgrund jahrelanger Erfahrung die Reglerstruktur und die Einstellung der Reglerparameter auch für komplizierte Regelstrecken von Hand optimieren. Dieses empirische Arbeiten mit *Fingerspitzengefühl* und *Erfahrung* ist so erfolgreich, daß man sich häufig auch dann darauf verläßt, wenn mathematisch orientierte Verfahren verfügbar sind. Allerdings hat diese erfahrungsbasierte Vorgehensweise den Nachteil, daß die Problemlösung nicht auf systematischem Wege erfolgt und damit von der Ingenieurskunst des Prozeßexperten abhängig ist. Ferner läßt sich ein empirisch gefundener Lösungsweg nur schlecht dokumentieren, ist von Dritten schwer nachvollziehbar und läßt sich damit schlecht auf neue Probleme übertragen.

Erfahrungsbasiertes Arbeiten wird also in der klassischen Regelungstechnik schon immer und mit größtem Erfolg praktiziert. Dies gilt insbesondere für Anwendungsfälle, in denen man nur über eine qualitative und damit ungenaue Prozeßkenntnis verfügt. Allerdings liegt diese Arbeitsweise insofern in einer *Grauzone*, als sie unsystematisch und intransparent ist.

Fuzzy Control stellt Methoden für einen systematischeren Umgang mit qualitativem Wissen bereit und bringt insofern Licht in diese Grauzone. Hierzu wird von der Fuzzy-Logik Gebrauch gemacht, die neben den klassischen Wahrheitswerten 1 (wahr) und 0 (falsch) auch Zwischenwerte kennt. Sie kann daher auch Aussagen verarbeiten, die *etwas* oder *ziemlich* wahr sind. Damit entspricht die Fuzzy-Logik dem menschlichen Denken und Vorgehen beim erfahrungsbasierten Arbeiten und führt deshalb häufig zu besseren Lösungen. Ferner kann man damit den Lösungsweg übersichtlich und nachvollziehbar dokumentieren und einmal gefundene Lösungen leichter auf verwandte Probleme übertragen.

2 Grundbegriffe der Regelungstechnik

Fuzzy Control stellt einen neuen Zweig der Regelungstechnik dar, der in bestimmten Anwendungsfeldern gegenüber der klassischen Regelungstechnik Vorteile verspricht. Als besonders günstig erweist es sich vielfach, die besonderen Vorzüge von Fuzzy Control mit denen der herkömmlichen Regelungstechnik zu kombinieren. Um die Methoden von Fuzzy Control verständlich und ihren praktischen Wert erkennbar zu machen, ist es daher zweckmäßig, von den Grundlagen der herkömmlichen Regelungstechnik auszugehen. Diese werden im folgenden unter dem Blickwinkel der späteren Einordnung und Abgrenzung von Fuzzy Control dargestellt [1-8], [16].

2.1 Regelkreise mit Menschen als Regler

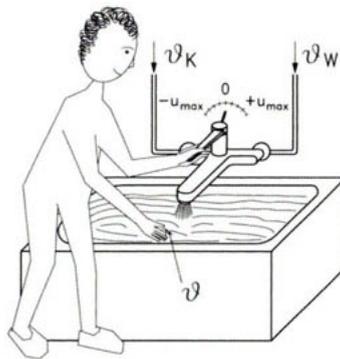


Bild 2.1 Ein Regelungssystem, in dem ein Mensch als Regler agiert.

Menschen besitzen von alters her die Fähigkeit, als Regler zu agieren: Kinder erlernen schon sehr früh das Fahrradfahren, Millionen von Autofahrern bewähren sich tagtäglich in schwierigen Verkehrssituationen, und aus der

Verfahrenstechnik ist bekannt, daß komplizierte Prozesse nicht selten besser von Hand als automatisch gefahren werden können.

Bild 2.1 zeigt ein Beispiel aus dem Alltagsleben: Eine Badewanne wird mit Wasser gefüllt, das durch Vermischung von kaltem und warmem Vorlaufwasser in einer Mischarmatur bereitete wird. Die Stellung u des Hebels der Mischarmatur bestimmt das Mischungsverhältnis und damit die Temperatur des Auslaufwassers. In den beiden mit $-u_{\max}$ und $+u_{\max}$ markierten Endstellungen hat das Auslaufwasser die Temperatur ϑ_K des kalten bzw. ϑ_W des warmen Vorlaufwassers. Bei einer festen Stellung u des Mischhebels ist die Auslauftemperatur und damit die Badtemperatur ϑ meist nicht ganz konstant. Die Ursache hierfür kann z. B. in Schwankungen der Vorlauftemperaturen oder der Versorgungsdrücke liegen. Solche Einflußgrößen werden *äußere Störungen* genannt. Ebenso können mechanischer Verschleiß, Verkalkung der Ventile oder thermische Beanspruchung der Dichtung die Auslauftemperatur in unerwünschter Weise beeinflussen. Solche Änderungen eines technischen Systems werden unter dem Begriff *Parametervariationen* (in bestimmten Fällen auch Strukturänderungen) zusammengefaßt. Daß man die Badtemperatur ϑ trotz des Einflusses äußerer Störungen oder von Parametervariationen durch geeignete Betätigung des Mischhebels von Hand in guter Näherung konstanthalten kann, ist jedem aus eigener Erfahrung bekannt: Hierzu stellt man den Istwert ϑ_{ist} der Badtemperatur fest und vergleicht diesen mit dem Sollwert ϑ_{soll} , d. h. mit der gewünschten Badtemperatur. In Abhängigkeit von der festgestellten Differenz $e = \vartheta_{soll} - \vartheta_{ist}$ verstellt man dann den Mischhebel. Dabei wendet man eine Verstellstrategie (*Regelstrategie*) an, die aufgetretenen Differenzen e nach Möglichkeit entgegenwirkt.

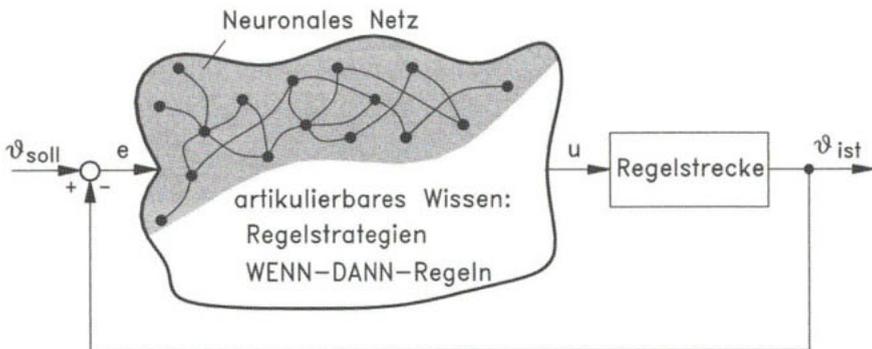


Bild 2.2 Strukturbild eines Regelkreises, in dem ein Mensch als Regler agiert.

Das Wesentliche an dieser Vorgehensweise zur Konstanthaltung der Badtemperatur ist die *Rückkopplung*. Durch sie entsteht ein geschlossener Wirkungskreis, den man *Regelkreis* nennt (Bild 2.2). Der zu regelnde Prozeß (Badewanne mit Mischarmatur) wird *Regelstrecke* genannt. Die Badtemperatur, die Ausgangsgröße der Regelstrecke, heißt *Regelgröße*. Der *Istwert* ϑ_{ist} der Regelgröße wird im Bewußtsein des Menschen mit dem eigentlich gewünschten *Sollwert* ϑ_{soll} verglichen. In Abhängigkeit von der festgestellten Differenz $e = \vartheta_{soll} - \vartheta_{ist}$ verstellt der Mensch dann den Mischhebel, um festgestellten Differenzen e nach Möglichkeit entgegenzuwirken.

Bei einem solchen Regeln von Hand agiert der Mensch teilweise *unbewußt* mit *Fingerspitzengefühl*. Dieses wird vom neuronalen Netz, das aus miteinander verbundenen Nervenzellen besteht, gesteuert. Es befindet sich überwiegend im Gehirn, aber auch im Rückenmark. Teilweise setzt der Mensch aber auch *bewußte Regelstrategien* ein, die auf Erfahrungen oder Einsicht basieren.

Im obigen Beispiel besteht eine naheliegende Regelstrategie beispielsweise darin, für eine hohe Auslauftemperatur zu sorgen, wenn die Regelabweichung positiv ist, d. h., wenn die Badtemperatur zu niedrig ist, und umgekehrt.

2.2 Technische Regelkreise

In der Technik ist man daran interessiert, automatisch arbeitende Regelkreise zu schaffen, die ganz oder weitgehend ohne menschliche Eingriffe arbeiten (Bild 2.3). An die Stelle eines Menschen tritt dann eine technische Regeleinrichtung (*Regler*). Ihre Aufgabe ist es, in Abhängigkeit von der festgestellten *Regelabweichung* e eine *Stellgröße* u zu erzeugen, die der Regelabweichung nach Möglichkeit entgegenwirkt. Wie gut dies gelingt, hängt entscheidend von dem funktionalen Zusammenhang (*Reglerfunktional*)

$$u = \mathcal{F}\{e(t)\} \quad (2.1)$$

ab, den der Regler zwischen der Regelabweichung und der Stellgröße herstellt. Der Regler kann beispielsweise als elektronische Schaltung ausgeführt sein (analoge Reglerrealisierung), oder es kann ein Mikroprozessor die Aufgabe übernehmen, das gewählte Reglerfunktional zu realisieren (digitale Reglerrealisierung). Aufgabe des nachgeschalteten *Stellgliedes* ist es, das vom Regler gelieferte Signal in eine dazu proportionale Größe um-

zuwandeln, die direkt auf die Regelstrecke einwirkt. Im Beispiel der Mischwasserbereitung kann das Stellglied ein Motor sein, der den Mischhebel in die vom Regler gewünschte Position u bringt. Zur Vervollständigung ist in Bild 2.3 eingezeichnet, daß ein Meßglied zur Erfassung des Istwertes der Regelgröße erforderlich ist und daß die Regelstrecke stets mehr oder minder großen äußeren Störungen $d(t)$ und Parametervariationen $p(t)$ unterworfen ist.

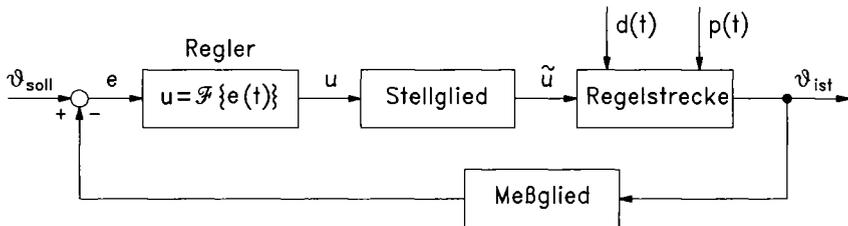


Bild 2.3 Strukturbild eines technischen Regelkreises.

Regelstrecken, Stellglieder, Regler und Meßglieder werden zusammenfassend auch als *technische dynamische Systeme* oder als *technische Übertragungssysteme* angesprochen, die *Eingangs-* und *Ausgangsgrößen* aufweisen. Die Eingangsgrößen einer Regelstrecke sind die Stellgrößen, die zur gezielten Systembeeinflussung dienen sowie die auf das System einwirkenden äußeren Störungen. Jedes technische dynamische System unterliegt aufgrund unerwünschter Wechselwirkungen mit seiner Umgebung mehr oder minder großen äußeren Störungen. Oft lassen sich größere Hauptstörungen, deren Ursache man kennt, von kleineren *sonstigen Störungen*, deren Ursache man nicht oder nicht genau kennt, unterscheiden. Die Regelgröße ist die Ausgangsgröße der Regelstrecke. Jede andere Größe, die das Verhalten der Regelstrecke charakterisiert, kann aber ebenfalls als Ausgangsgröße erscheinen. Im obigen Beispiel ist die Mischtemperatur die Ausgangsgröße. Statt dessen oder daneben kann aber auch der Geräuschpegel oder der Füllstand der Wanne Ausgangsgröße derselben Regelstrecke sein.

Die obige Regelkreisstruktur (Bild 2.3) läßt sich so interpretieren, daß die *Intelligenz* zur Ermittlung einer günstigen Reaktion in dem eigentlichen Regler steckt, während das Stellglied die *Kraft* für die Umsetzung dieser vom Regler vorgeschlagenen Reaktion liefert. Es gibt aber auch Regler, in denen diese beiden Funktionen nicht voneinander zu trennen sind. Ein Beispiel hierfür ist der *Bimetall-Temperaturregler*, der sich beispielsweise in Heizlüftern findet (Bild 2.4). Bei einer Temperaturerhöhung krümmt sich

das Bimetall aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Metalle, aus denen der Bimetallstreifen besteht. Daher wird die Wärmezufuhr unterbrochen, wenn die Temperatur einen bestimmten, über die Stellschraube eingestellten Wert erreicht. Der Permanentmagnet sorgt dafür, daß die Temperatur, bei der sich der Kontakt öffnet, etwas höher ist als die Temperatur, bei der er sich wieder schließt. Hierdurch wird ein unerwünschtes schnelles Hin- und Herschalten (*Rattern*) verhindert.

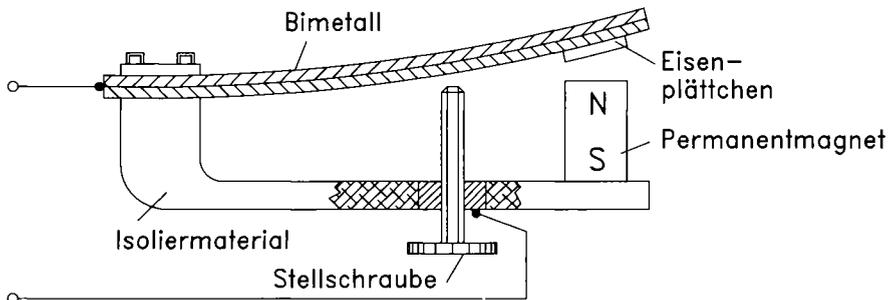


Bild 2.4 Bimetall-Temperaturregler.

Aufgrund der *Rückkopplung* ist ein Regelkreis in der Lage, den Einfluß von äußeren Störungen oder Parametervariationen zu reduzieren. Daraus ergibt sich, daß der Einsatz einer Regelung insbesondere dann günstig ist, wenn große äußere Störungen oder Parametervariationen vorliegen. Statt einen Regelkreis aufzubauen, kann man aber auch versuchen, äußere Störungen und Parametervariationen von der Regelstrecke fernzuhalten. Beispielsweise können Roboter so solide aufgebaut werden, daß das Gewicht der Traglast die Position des Greifers nicht störend beeinflußt. Dann kann man auf eine Rückkopplung verzichten. Man spricht dann im Unterschied zu einer Regelung auch von einer *Steuerung* oder von einer *offenen Wirkungskette* (Bild 2.5).



Bild 2.5 Offene Wirkungskette (Steuerung). Im Unterschied zu einem Regelkreis wird die Ausgangsgröße des technischen Systems nicht zurückgekoppelt.

2.3 Regelungsziele

In der Praxis werden sehr unterschiedliche Forderungen an Regelungssysteme gestellt. So ist man im Beispiel der Mischwasserbereitung (Bild 2.1) daran interessiert, die Ausgangsgröße der Regelstrecke trotz äußerer Störungen oder Änderungen von Systemparametern auf einem konstanten Wert zu halten (*Konstanthaltungproblem*). In anderen Fällen ist der Sollwert nicht konstant, sondern hat einen bestimmten Zeitverlauf. Der Sollwert wird dann auch Führungsgröße genannt. Die Ausgangsgröße der Regelstrecke soll dann ein möglichst gutes *Führungsverhalten* zeigen: Sie soll dem Verlauf der Führungsgröße möglichst schnell, möglichst genau oder ohne großes Überschwingen folgen (*Folgeregelungsproblem*). Beispielsweise besteht ein Prozeßschritt bei der Keramikherstellung darin, das Glühgut nach einem bestimmten zeitlichen Temperaturprofil zunächst zu erwärmen, dann bei konstanter Temperatur zu halten und schließlich wieder abzukühlen (Bild 2.6).

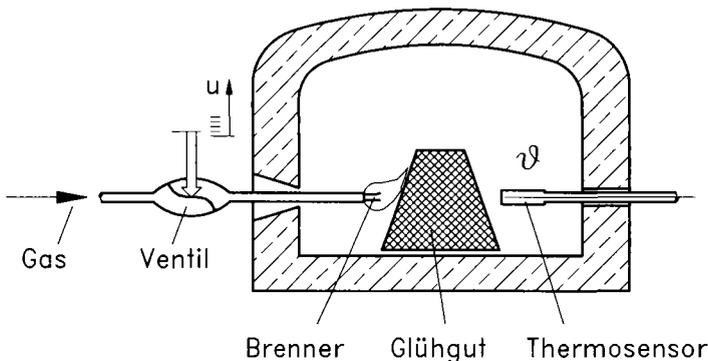


Bild 2.6 Glühofen als Beispiel für eine Regelstrecke zur Veranschaulichung der Herkunft von äußeren Störungen und Parametervariationen.

Als Grundlage für die Beurteilung des Führungsverhaltens dient meist die *Sprungantwort* des Regelungssystems. Das ist der Verlauf der Ausgangsgröße bei einer sprungförmigen Veränderung der Führungsgröße (Bild 2.7). Die daraus ablesbare *bleibende Regelabweichung* e_∞ , die *Ausregelzeit* T_a sowie die *Überschwingweite* M_p sind wichtige Kenngrößen für die Regelgüte. Die bleibende Regelabweichung ist die Differenz zwischen Führungs- und Regelgröße, die auf Dauer bestehen bleibt. Die Ausregelzeit ist diejenige Zeit, die nach der sprungförmigen Änderung der Führungsgröße verstreicht, bis der Verlauf der Ausgangsgröße auf Dauer eine bestimmte *Ein-*

schwings toleranz nicht verletzt. Diese kennzeichnet die Abweichungen vom Sollwert, die auf Dauer akzeptabel sind. Die *Überschwingweite* gibt an, um wieviel Prozent die Ausgangsgröße bei sprungförmiger Änderung des Sollwertes anfänglich über den gewünschten Sollwert hinaus schießt.

Daneben werden meist auch Anforderungen an das *Störverhalten* gestellt. Äußere Störungen sollen sich auf den Verlauf der Regelgröße nicht stark auswirken. Im Beispiel des Glühofens können äußere Störungen beispielsweise in Schwankungen des Gasdrucks, des Heizwertes, der Außentemperatur oder der Temperatur des Glühgutes bei Einbringung in den Ofen bestehen. Ferner soll das Regelungssystem meist in dem Sinne *robust* sein, daß sich Änderungen von Parametern der Regelstrecke nicht stark auf das Führungs- oder Störverhalten auswirken. Im Beispiel des Glühofens können Parametervariationen darin bestehen, daß die Masse des Glühgutes und seine Anfangstemperatur bei jeder Charge unterschiedlich sind. Ferner können Ablagerungen an der Innenwand der Brennkammer den Wärmeübergang beeinträchtigen oder Abnutzungen des Ventilkegels dazu führen, daß sich der Öffnungsquerschnitt ändert. Dieses Beispiel zeigt übrigens, daß die Trennlinie zwischen äußeren Störungen und Parametervariationen davon abhängt, welche Faktoren man als zum System gehörig und welche man als von außen kommend ansehen will.

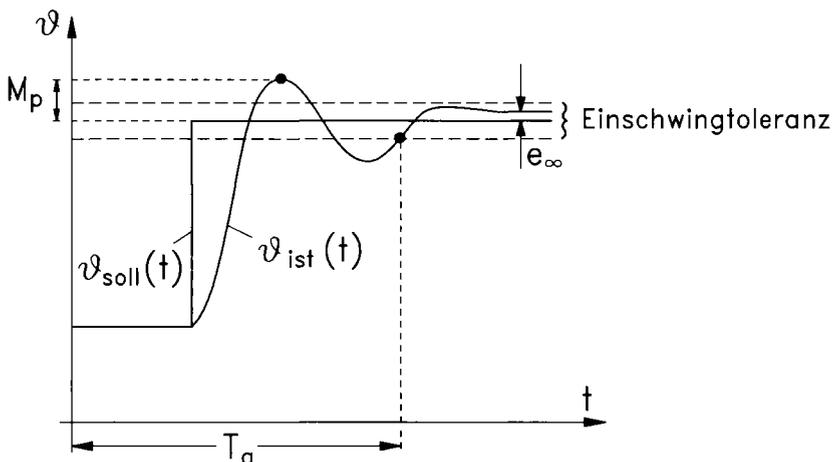


Bild 2.7 Definition der Kenngrößen Überschwingweite M_p , Ausregelzeit T_a und bleibende Regelabweichung e_∞ zur Bewertung des Führungsverhaltens eines Regelkreises.

Schließlich werden häufig *Nebenbedingungen* gestellt. Beispielsweise sollen die Verläufe der dynamischen Variablen des Regelungssystems vorgegebene Arbeitsbereiche nicht verlassen. Insbesondere soll der Verlauf der Stellgröße u meist einer *Stellgrößenbeschränkung* $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ genügen.

Die genannten Forderungen an das Führungs- und Störverhalten werden meist für die häufig vorkommenden Betriebsfälle gestellt. Für diese Fälle möchte man gewährleisten, daß bestimmte Spezifikationen strikt und andere möglichst gut erfüllt werden (*harte und weiche Forderungen*). Daneben möchte man sicherstellen, daß sich das System in jedem anderen möglichen Betriebsfall zumindest noch akzeptabel verhält. Beispielsweise soll das System in dem Sinne stabil sein, daß die Regelgröße unter keinen Umständen dauerhaft oszilliert (schwingt) oder sogar über alle Grenzen wächst.

Derartige Forderungen, die sich auf unendlich viele mögliche Betriebsfälle beziehen (*globale Forderungen*), führen auf ein prinzipielles Problem (*Kontinuumsproblem*), da man stets nur endlich viele Betriebsfälle experimentell untersuchen kann. Beispielsweise läßt sich das Sprungantwortverhalten eines Regelungssystems auf experimentellem Wege nur für endlich viele unterschiedliche Sprunghöhen untersuchen. Tatsächlich ist man jedoch an allen Sprunghöhen (bis hin zu einer bestimmten Maximalhöhe), also an einem Kontinuum von möglichen Fällen interessiert. Diese Diskrepanz stört bei vielen praktisch vorkommenden Regelungssystemen nicht. Oft weiß man nämlich aus heuristischen oder physikalisch motivierten Überlegungen heraus, daß sich das Regelungssystem "gutartig" verhält, d. h. bei kleinen Änderungen der Sprunghöhe sein Verhalten nicht grundlegend ändert. Dann überträgt man das Ergebnis punktueller Untersuchungen ohne große Bedenken auf das Verhalten in nicht untersuchten "benachbarten Betriebsituationen".

Auch die unterschiedlichen gebräuchlichen Stabilitäts- oder Robustheitsforderungen laufen meist darauf hinaus, daß das Regelungsverhalten für ein Kontinuum von möglichen Betriebsfällen gewisse Mindestspezifikationen erfüllen soll. So kann im Beispiel des Glühofens eine Robustheitsforderung darin bestehen, daß das Regelungsverhalten für alle Anfangstemperaturen δ und alle Massen m des Glühgutes aus kontinuierlichen Wertebereichen $\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$ und $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$ akzeptabel sein soll.

2.4 Einfache klassische Reglerfunktionale

Die einfachsten klassischen Reglerfunktionale gehen aus unmittelbar einsichtigen *qualitativen Regelstrategien* hervor, die der Mensch bewußt einsetzt, wenn er selbst als Regler agiert. Beispielsweise ist für die Regelung der Badtemperatur die Strategie

$$\begin{array}{ll} \text{WENN} & \text{Regelabweichung negativ} \\ \text{DANN} & \text{niedrige Auslauftemperatur einstellen} \end{array} \quad (2.2)$$

naheliegend (Abschnitt 2.1). Diese qualitative Strategie wird durch die Regeln

$$\begin{array}{ll} \text{WENN } e > 0 & \text{DANN } u = +u_{\max}, \\ \text{WENN } e \leq 0 & \text{DANN } u = -u_{\max} \end{array} \quad (2.3)$$

oder damit gleichwertig durch das nichtlineare Reglerfunktional

$$u(e) = \begin{cases} +u_{\max}, & \text{falls } e > 0, \\ -u_{\max} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.4)$$

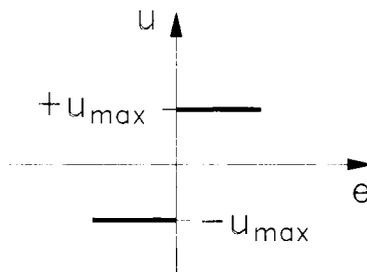


Bild 2.8 Kennlinie eines Zweipunktreglers.

quantitativ präzisiert. Der zugehörige Funktionsgraph wird *Reglerkennlinie* genannt (Bild 2.8). Regler, die nach diesem Funktional (2.4) arbeiten, heißen *Zweipunktregler*. Sie sind einfach zu realisieren, können allerdings zu einem unerwünschten Rattern, d. h. schnellem Hin- und Herschalten zwischen den Maximalwerten $+u_{\max}$ und $-u_{\max}$ führen. Dieser Nachteil läßt sich mildern bzw. abstellen, indem man die Strategie (2.2) durch die auch aus dem täglichen Leben bekannte Verhaltensregel "nicht gleich in Panik geraten" ergänzt. Sie führt auf das Reglerfunktional

$$u(e) = \begin{cases} +u_{\max}, & \text{falls } e > c, \\ 0, & \text{falls } -c \leq e \leq c, \\ -u_{\max} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.5)$$

des *Dreipunktreglers* (Bild 2.9 links). Kennzeichnend ist die sogenannte *to-te Zone* $-c \leq e \leq c$, in der der Regler nicht reagiert. Eine andere Möglichkeit zur Verringerung des Ratterns ergibt sich aus der qualitativen Strategie "nicht sofort das Ruder herumreißen". Sie führt auf das Reglerfunktional

$$u(e) = \begin{cases} +u_{\max}, & \text{falls } e > c \text{ oder falls } e \text{ im Intervall } [-c, +c] \\ & \text{liegt und der Verlauf von } e(t) \text{ von rechts} \\ & \text{kommend in dieses Intervall eingetreten ist,} \\ -u_{\max} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.6)$$

des *Zweipunktreglers mit Hysterese* (Bild 2.9 rechts). Die zugehörige Kennlinie ist nicht eindeutig (Hystereseeffekt). Der Wert der Ausgangsgröße hängt vielmehr von der *Vorgeschichte* des Verlaufs der Regelabweichung ab. Die Größen u_{\max} und c sind einstellbare Parameter (*Reglerparameter*) zur Beeinflussung des Regelungsverhaltens. Der in Bild 2.4 gezeigte Temperaturregler ist ein solcher Zweipunktregler mit Hysterese.

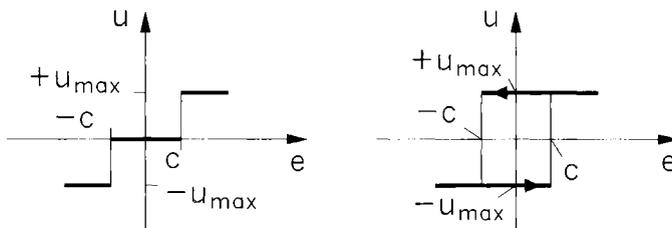


Bild 2.9 Kennlinien eines Dreipunktreglers (links) und eines Zweipunktreglers mit Hysterese (rechts).

Weitere, aus dem täglichen Leben bekannte qualitative Regelstrategien entsprechen den Verhaltensmustern "Auge um Auge", "nachtragend sein" und "Präventivschlag". Sie lassen sich als qualitative Regeln

$$\begin{aligned} & \text{"Je größer die Regelabweichung,} \\ & \text{desto größer die Gegenreaktion"} \end{aligned} \quad (2.7)$$

und

"Je länger eine Regelabweichung bereits andauert hat,
desto größer die Gegenreaktion" (2.8)

sowie

"Je größer die Änderungstendenz der Regelabweichung,
desto größer die Gegenreaktion" (2.9)

formulieren. Naheliegende mathematische Präzisierungen dieser Regeln führen auf das Funktional

$$u = c_1 e \quad (2.10)$$

des *Proportionalreglers* (*P-Regler*), auf das Funktional

$$u = c_2 \int_0^t e(t') dt' \quad (2.11)$$

des *Integralreglers* (*I-Regler*) sowie auf das Funktional

$$u = c_3 \frac{d}{dt} e \quad (2.12)$$

des *Differentialreglers* (*D-Regler*). Dabei sind die Faktoren c_1 , c_2 und c_3 einstellbare Reglerparameter. Ihre Größe bestimmt die Stärke der Gegenreaktion. Bei richtiger Einstellung der Reglerparameter können diese Regler die gewünschte Verringerung der Regelabweichung bewirken. Bei falscher Wahl kann der gegenteilige Effekt auftreten und die Regelabweichung im schlimmsten Fall sogar über alle Grenzen anwachsen (*instabiles Systemverhalten*). Durch eine Kombination dieser drei Funktionale gelangt man zum Funktional

$$u = c_1 e + c_2 \int_0^t e(t') dt' + c_3 \frac{d}{dt} e \quad (2.13)$$

des *PID-Reglers*. Seine Funktion wird durch das Strukturbild (2.10) veranschaulicht.

Für $c_3 = 0$ bzw. $c_2 = 0$ erhält man die Sonderfälle des PI- bzw. PD-Reglers. Durch geeignete Einstellung der Reglerparameter c_1 , c_2 und c_3 läßt sich der PID-Regler an unterschiedliche Regelstrecken und Regelungsziele anpassen. Dabei sind diese Parameter *transparent*, d. h., es ist qualitativ einsichtig, wie sich eine Verstellung der Parameter auf das Regelungsverhalten

auswirkt. Beispielsweise führen selbst kleine, aber lang andauernde Regelabweichungen zu einer ständigen Vergrößerung des Integralwertes und damit zu einer ständigen Vergrößerung des Stellgrößenwertes. Damit wird der Regelabweichung zunehmend stärker entgegengewirkt. Wegen des integralen Terms (2.11) kann daher ein PID-Regler aufgetretene Regelabweichungen schließlich *vollständig beseitigen*. Diese Tendenz wird vergrößert, wenn man den Wert des Parameters c_2 vergrößert. Andererseits entsteht dadurch die Gefahr einer *Überkompensation* und damit die Neigung zur *Instabilität*. Der differentielle Term (2.12) des PID-Reglers reagiert demgegenüber auf kurzzeitige Änderungen der Regelabweichung. Hierdurch kann er Regelabweichungen bereits im Zeitpunkt ihres Entstehens kräftig entgegenwirken. Eine Vergrößerung des Wertes von c_3 verstärkt diese an sich erwünschte Gegenreaktion, kann aber auch zur Instabilität führen.

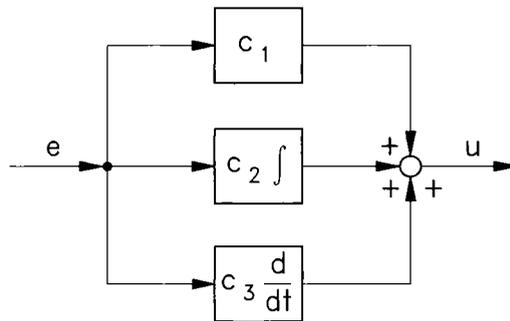


Bild 2.10 Strukturbild des PID-Reglers mit den Parametern c_1 , c_2 und c_3 .

Für praktisch eingesetzte PID-Regler hat sich durchgesetzt, nicht von der Beziehung (2.13), sondern von dem Funktional

$$u = K_R \left(e + \frac{1}{T_n} \int e(t') dt + T_v \frac{de}{dt} \right) \quad (2.14)$$

auszugehen (Bild 2.11). Beide Funktionale sind insofern gleichwertig, als man ihre Parameter ineinander umrechnen kann. Die Parameter K_R (*Reglerverstärkung*), T_v (*Vorhaltzeit*) und T_n (*Nachstellzeit*) sind aber im Vergleich zu den Parametern c_1 , c_2 und c_3 noch transparenter.

Beispielsweise kann man die Auswirkungen von Veränderungen des Verstärkungsfaktors V der Regelstrecke allein durch Anpassung des Parameters K_R kompensieren (Bild 2.12). Hierzu ist K_R um den Faktor $1/k$ zu verstell-

len, wenn sich V um den Faktor k verändert. Bild 2.13 veranschaulicht die Transparenz der Parameter T_v und T_n . Dargestellt sind ein Verlauf $e(t)$ der

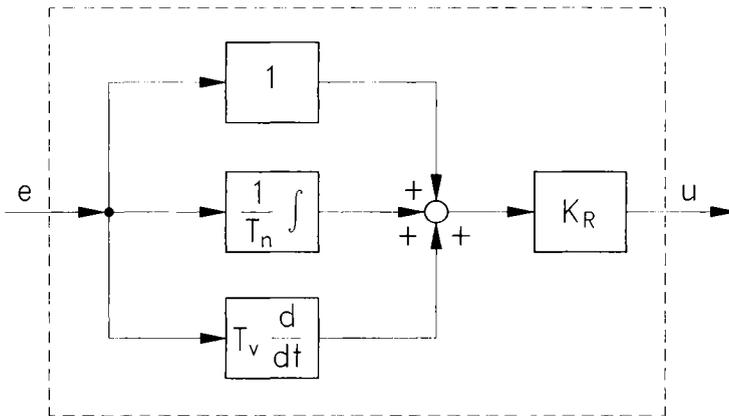


Bild 2.11 Strukturbild eines PID-Reglers mit den besonders transparenten Parametern K_R , T_n und T_v

Regelabweichung und die dazugehörige Reaktion eines PID-Reglers. Multipliziert man die Werte der Reglerparameter T_n und T_v mit dem Faktor zwei, so reagiert der Regler auf den im Vergleich zu $e(t)$ um den Faktor zwei langsameren Verlauf $e(t/2)$ mit dem im Vergleich zu $u(t)$ ebenfalls um

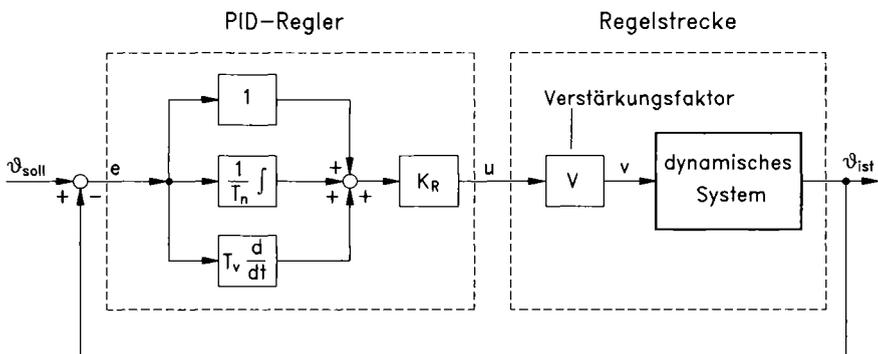


Bild 2.12 Zur Transparenz des Parameters K_R eines PID-Reglers. Änderungen des Verstärkungsfaktors V der Regelstrecke lassen sich vollständig durch Änderungen der Reglerverstärkung K_R kompensieren.

den Faktor zwei langsameren Verlauf $u(t/2)$. Wenn daher in einem Regelungssystem mit PID-Regler (Bild 2.12) das Zeitverhalten der Regelstrecke um den Faktor k langsamer wird, so kann man den Regler hieran anpassen, indem man die Werte der Reglerparameter T_n und T_v um den Faktor k vergrößert.

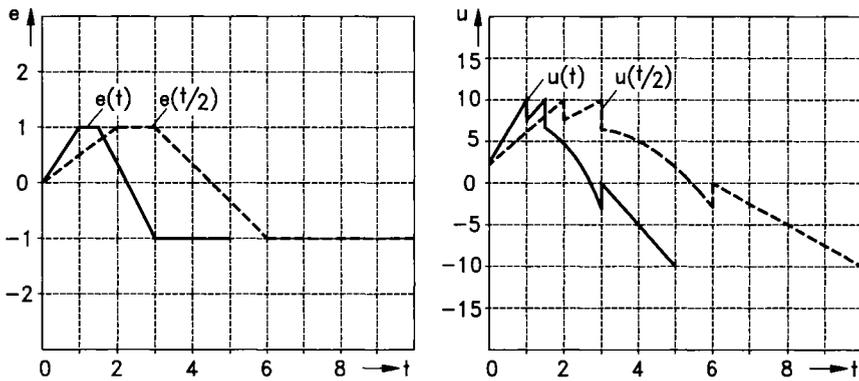


Bild 2.13 Zur Transparenz der Parameter T_n und T_v eines PID-Reglers. Die ausgezogenen Kurven zeigen einen Verlauf $e(t)$ der Regelabweichung und die Reaktion $u(t)$ eines PID-Reglers mit den Einstellwerten $K_R = 5$, $T_n = 2$ und $T_v = 1$. Die gestrichelt gezeichneten Kurven zeigen die im Vergleich zu $e(t)$ und $u(t)$ um den Faktor zwei langsameren Verläufe $e(t/2)$ der Regelabweichung und $u(t/2)$ der Reaktion eines PID-Reglers mit den Einstellwerten $K_R = 5$, $T_n = 4$ und $T_v = 2$.

2.5 Regler und Regelstrecken mit und ohne Erinnerung

Die Reglerfunktionale (2.4), (2.5) und (2.10) des Zweipunkt-, Dreipunkt- und P-Reglers haben insofern *keine Erinnerung*, als der Momentanwert der Stellgröße allein vom Momentanwert der Regelabweichung abhängt. Diese Reglerfunktionale haben also kein Zeitverhalten: Es sind gewöhnliche Funktionen, die zu jedem Momentanwert der Regelabweichung einen Momentanwert der Stellgröße liefern. Im Unterschied hierzu haben die Reglerfunktionale (2.6), (2.11) und (2.12) *Erinnerung*, denn der Momentanwert der von ihnen gebildeten Stellgröße hängt nicht nur vom Momentanwert, sondern vom bisherigen Verlauf $e(t)$ und damit von der Vorgeschichte der

Regelabweichung ab. Dabei berücksichtigt das Integral in den Vorschriften (2.11) und (2.13) die *gesamte* Vorgeschichte, der differentielle Term in den Funktionalen (2.12) und (2.13) dagegen nur eine *infinitesimal kurze* Vorgeschichte. Es ist qualitativ plausibel, daß es zur Verbesserung des Regelungsverhaltens nützlich sein kann, sowohl die lang- als auch die kurzfristige Vorgeschichte zu berücksichtigen. Beispielsweise stellt ein Arzt seine Therapie auch darauf ab, ob Beschwerden erst seit kurzem oder schon länger bestehen.

Der Integrator in den Strukturbildern 2.10 bis 2.12 läßt sich als *Langzeitgedächtnis* des PID-Reglers interpretieren. Der jeweilige Gedächtnisinhalt – er heißt auch der aktuelle *Zustand* des PID-Reglers – ist der Wert, der sich aus der Integration des bisherigen Verlaufs von $e(t)$ ergibt. Für die technische Realisierung eines Integrators muß man den jeweils aktuellen Wert des Integrals speichern. Bei einer Realisierung durch eine analoge elektronische Schaltung wird hierzu ein Kondensator verwendet, dessen jeweilige Spannung dem Wert des Integrals entspricht. Der Ausgangsgrößenverlauf $u(t)$ eines PID-Reglers hängt außer vom Eingangsgrößenverlauf $e(t)$ auch noch von dem Wert ab, den das Integral im Einschaltzeitpunkt t_0 aufweist. Für den häufigen Fall, daß dieser Wert Null ist, spricht man vom Verhalten des PID-Reglers bei *Erregung aus der Ruhelage*.

Kompliziertere Regler können mehr als einen Integrator enthalten (Abschnitt 4.2). Dann wird der aktuelle Zustand des Reglers durch die Momentanwerte aller Integrale bestimmt. Sie heißen daher die *Zustandsgrößen* des Reglers. Ihre Anzahl wird auch als *Ordnung* oder *Dimension* des Reglers bezeichnet.

Auch Regelstrecken kann man danach unterscheiden, ob sie Erinnerung haben oder nicht. Die meisten Regelstrecken haben Erinnerung, so daß sie folgendes *Zeitverhalten* aufweisen: Der aktuelle Ausgangsgrößenwert hängt dann nicht allein vom Momentanwert, sondern auch von der Vorgeschichte des Eingangsgrößenverlaufs ab. Solche Regelstrecken werden *dynamische Systeme* genannt. Ihr Verhalten ist um so komplizierter, je mehr Zustandsgrößen das System aufweist.

Der aktuelle Zustand eines dynamischen Systems läßt sich geometrisch veranschaulichen. Hierzu ordnet man jeder Zustandsgröße eine Koordinatenachse zu. Diese Achsen spannen den *Zustandsraum* auf. Beispielsweise erhält man für ein gedämpftes Feder-Masse-System (Bild 2.14 links) einen zweidimensionalen Zustandsraum mit Koordinatenachsen, die dem Ort x und der Geschwindigkeit $v = \dot{x}$ der Masse zugeordnet sind (Bild 2.14 rechts). In diesem Raum erscheint jeder aktuelle Zustand als ein Punkt (*Zu-*

standspunkt). Zeitliche Zustandsänderungen erscheinen als Bahnkurven (*Zustandstrajektorien*). Beispielsweise veranschaulicht die Trajektorie in Bild 2.14 (rechts) das Verhalten des Feder-Masse-Systems für den Fall, daß es im Zeitpunkt t_0 in eine Anfangsauslenkung $x(t_0)$ versetzt und danach sich selbst überlassen wird. Die Masse schwingt nicht gleichförmig, sondern wegen der Reibung mit kleiner werdender Amplitude hin und her. Zur vollständigen Beschreibung des Systemverhaltens benötigt man außer der Zustandstrajektorie auch noch Zeitmarken darauf, die angeben, zu welchem Zeitpunkt der Zustand die einzelnen Trajektorienpunkte durchläuft.

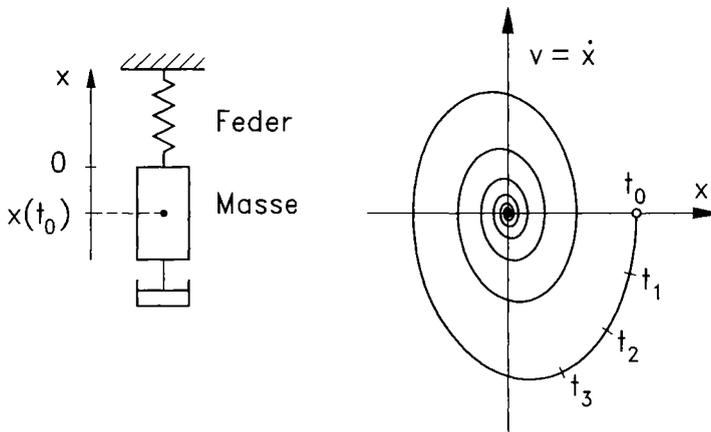


Bild 2.14 Gedämpftes Feder-Masse-System (links) und zugehöriger Zustandsraum (rechts). Die spiralförmige Zustandstrajektorie beschreibt das Verhalten des Feder-Masse-Systems für den Fall, daß die Masse zum Zeitpunkt t_0 in eine Anfangsauslenkung $x(t_0)$ versetzt und danach sich selbst überlassen wird.

2.6 Lineare und nichtlineare Regler und Regelstrecken

Der PID-Regler sowie der P-, D-, I-, PD- und PI-Regler werden *linear* genannt, weil für sie folgendes *Superpositionsprinzip* gilt: Es seien $u_1(t)$ und $u_2(t)$ die Ausgangsgrößenverläufe eines solchen Reglers (bei verschwindendem Anfangswert des Integrierers), die zu den Eingangsgrößenverläufen $e_1(t)$ bzw. $e_2(t)$ gehören. Dann ist die Reglerreaktion (bei Erregung aus der Ruhelage) für jede Linearkombination

$$e(t) = k_1 e_1(t) + k_2 e_2(t) \quad (2.15)$$

dieser Eingangsgrößenverläufe mit beliebig gewählten Koeffizienten k_1 und k_2 durch die entsprechende Linearkombination

$$u(t) = k_1 u_1(t) + k_2 u_2(t) \quad (2.16)$$

der Ausgangsgrößenverläufe $u_1(t)$ und $u_2(t)$ bestimmt. Bei linearen Reglern kann man also aus dem Verhalten für wenige Spezialfälle auf das Verhalten in vielen anderen Fällen schließen. Deshalb verhalten sich lineare Regler im Vergleich zu nichtlinearen Reglern überschaubarer. Multipliziert man beispielsweise die Eingangsfunktion $e(t)$ mit dem Faktor zwei, so multipliziert sich die Ausgangsfunktion um denselben Faktor (Bild 2.15). Für einen Zweipunkt- oder Dreipunktregler gilt dies nicht.

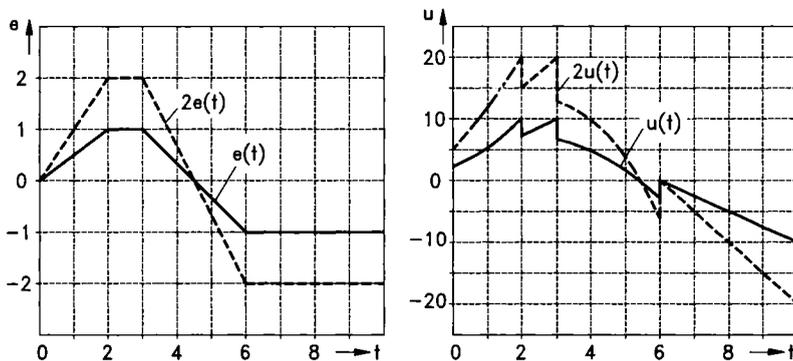


Bild 2.15 Veranschaulichung der Linearität eines Reglers. Wenn $u(t)$ die Reaktion des Reglers auf den Verlauf $e(t)$ der Regelabweichung ist, so ist $2u(t)$ die Reaktion auf den Verlauf $2e(t)$.

Alle für die Anwendungen wichtigen Funktionen $e(t)$ kann man bekanntlich in beliebig guter Näherung als endliche bzw. unendliche Linearkombination harmonischer (sinusförmiger) Funktionen darstellen (Fourierreihe, Fourierintegral). Wegen des Superpositionsprinzips kann man deshalb das Verhalten eines linearen Reglers für *beliebige* Eingangsfunktionen $e(t)$ bestimmen, wenn man es für alle *harmonischen* Eingangsfunktionen

$$e(t) = \cos \omega t \quad (2.17)$$

kennt. Der Ausgangsgrößenverlauf eines linearen Reglers ist für harmonische Eingangsfunktionen (2.17) nach Abklingen von Einschwingvorgängen selbst wieder eine harmonische Funktion

$$u(t) = a \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.18)$$

mit gleicher Frequenz ω , aber mit einer im Vergleich zur Eingangsfunktion im allgemeinen anderen Amplitude a und einer um den Winkel φ verschobenen Phase. Dabei hängen die Größen a und φ im allgemeinen von der Frequenz ω ab. Die resultierenden Funktionen $a(\omega)$ und $\varphi(\omega)$ werden *Amplitudengang* bzw. *Phasengang* genannt. Beide Funktionen werden zusammen als *Frequenzgang* des linearen Systems angesprochen. Bild 2.16 zeigt den Frequenzgang eines PI-Reglers in der Darstellung des *Bode-Diagramms* mit der *Betragskennlinie* $a(\omega)$ und der *Phasenkennlinie* $\varphi(\omega)$. Darin sind die Frequenz- und die Amplitudenachse logarithmisch geteilt, wobei die Amplituden in *Dezibel* (dB) ausgedrückt werden, um handliche Zahlen zu erhalten (a in Dezibel = $20 \log a$, also entsprechen die Werte 0 dB, 20 dB und 40 dB den Werten $a = 1$, $a = 10$ und $a = 100$). Dieses Bode-Diagramm veranschaulicht das Verhalten des zugrundeliegenden PI-Reglers: Im Frequenzbereich $\omega \gg 1$ stimmt der harmonische Ausgangsgrößenverlauf mit dem harmonischen Eingangsgrößenverlauf nach Betrag und Phasenwinkel überein. Für $\omega \ll 1$ vergrößert sich $a(\omega)$ zunehmend, während der Phasenwinkel negative Werte annimmt (*Phasenrückdrehung*).

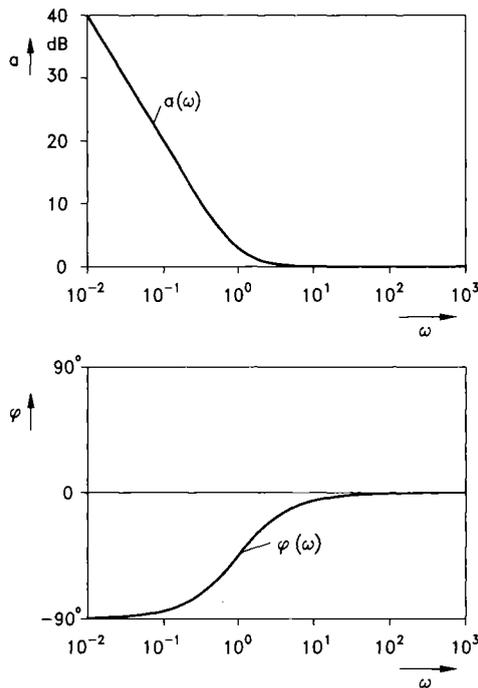


Bild 2.16 Bode-Diagramm des PI-Reglers für die Einstellwerte $K_R = 1$ und $T_n = 1$ s: Betragskennlinie (oben) und Phasenkennlinie (unten).

Mit der im Bode-Diagramm verwendeten logarithmischen Darstellung kann man große Frequenz- und Amplitudenbereiche in einem Diagramm erfassen. Noch wichtiger ist die mit dieser Darstellung geschaffene Transparenz: Vergrößert man nämlich den Parameter K_R eines PI-Reglers um den Faktor 10, so ändert sich die Phasenkennlinie nicht, und die Betragskennlinie wird ohne Änderung ihrer Form um den Betrag 20 dB nach oben verschoben. Vergrößert man den Parameter T_n um den Faktor 10, so werden beide Kennlinien ohne Änderung ihrer Form um eine Dekade nach links verschoben. Es reicht also das eine in Bild 2.16 dargestellte Bode-Diagramm aus, um das Verhalten aller PI-Regler zu charakterisieren.

Analog zu Reglern werden auch Regelstrecken als linear bezeichnet, wenn für sie das Superpositionsprinzip gilt. Sind Regler und Regelstrecke linear, so ist auch das gesamte Regelungssystem linear. Wegen des Superpositionsprinzips kann man dann aus dem Verhalten für einzelne Betriebsfälle auf das generelle Verhalten des Regelungssystems schließen. Dies ist für die Sicherstellung globaler Eigenschaften (vgl. Abschnitt 2.4) interessant. Beispielsweise gehen alle Sprungantworten eines linearen Regelungssystems, die zu unterschiedlichen Sprunghöhen $a_i \neq 1$ gehören, aus der Sprungantwort zur Sprunghöhe 1 durch Multiplikation mit dem Faktor a_i hervor. Man braucht also nur eine einzige Sprungantwort zu bestimmen, um auch alle anderen zu kennen. Lineare Regelungssysteme zeichnen sich also wegen der Gültigkeit des Superpositionsprinzips durch eine besonders bequeme mathematische Handhabbarkeit aus. Dies erleichtert die Analyse und die Synthese (den Entwurf) linearer Regelungssysteme. Der praktische Wert dieser Feststellung wird allerdings dadurch relativiert, daß sich reale Regelstrecken stets nur näherungsweise linear verhalten und daß man den Grad der Näherung nie genau kennt.

Der Betrag der Ausgangsgröße realer Stellglieder unterliegt meist Beschränkungen. Beispielsweise kann man mit einem Stellmotor immer nur bestimmte Maximalwerte der Drehzahl und des Drehmomentes erreichen. Stellglieder setzen die vom Regler erzeugten Stellgrößenverläufe $u(t)$ daher nur dann unverfälscht um, wenn sie einer Nebenbedingung der Form

$$|u(t)| \leq u_{\max} \quad (2.19)$$

genügen.

Bei Vorliegen einer linearen Regelstrecke sind zwei Möglichkeiten zur Berücksichtigung einer solchen Nebenbedingung mit einem linearen Regler voneinander zu unterscheiden. Die erste Möglichkeit besteht darin, den Regler so auszulegen, daß seine Reaktion $u(t)$ bei den größten auftretenden

Störungen $d(t)$ noch der Nebenbedingung (2.19) genügt. Dies hat den Vorteil, daß sich das gesamte Regelungssystem dann linear verhält, so daß man die leistungsfähigen Entwurfs- und Analysemethoden der linearen Systemtheorie nutzen kann. Eine solche Reglerauslegung ist allerdings prinzipiell konservativ: Gerade wegen der Gültigkeit des Superpositionsprinzips wird damit der zulässige Maximalbetrag der Stellgröße bei kleineren als den größtmöglichen Störungen nicht mehr voll ausgenutzt. Dies ist ein prinzipieller Mangel aller linearen Regler.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, den linearen Regler so auszulegen, daß seine Ausgangsgröße den zulässigen Maximalbetrag u . U. gelegentlich überschreitet und daß man die unerwünscht großen Stellgrößenwerte durch ein nachgeschaltetes Begrenzungsglied abschneidet (Bild 2.17). Eine solche Reglerauslenkung kann wegen der besseren Stellgrößenausnutzung im Vergleich zur konservativen Auslegung zu einer deutlich besseren Regelgüte, aber auch zu Instabilität führen. Nachteilig an dieser Möglichkeit ist, daß die leistungsfähigen Entwurfs- und Analysemethoden der linearen Systemtheorie nicht mehr anwendbar sind, da sich das System jetzt nicht mehr linear verhält.

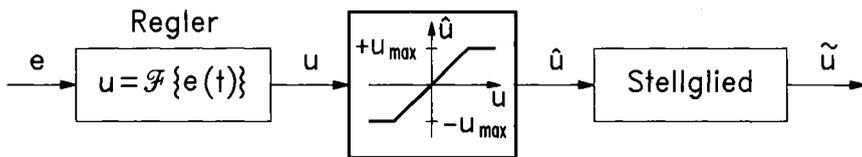


Bild 2.17 Berücksichtigung einer Stellgrößenbeschränkung durch ein Begrenzungsglied.

Der Ausgangsgrößenverlauf realer Stellglieder wird meist zusätzlich dadurch beschränkt, daß auch ihre Änderungsgeschwindigkeit einen bestimmten Maximalbetrag nicht überschreiten kann. Dann ist der Regler entweder konservativ auszulegen, so daß seine Ausgangsgrößenverläufe $u(t)$ stets der Beschränkung

$$\left| \frac{du(t)}{dt} \right| \leq v_{\max} \quad (2.20)$$

genügen, oder man schaltet dem Regler ein Begrenzungsglied nach, das unerwünscht schnelle Stellgrößenänderungen vom Stellglied fernhält (Bild 2.18). Hiermit kann man u. U. eine höhere Regelgüte als mit einer konservativen Systemauslegung erzielen. Dies wird jedoch wieder damit bezahlt, daß dann Verfahren der linearen Systemtheorie nicht mehr anwendbar sind.