



Automatisierungstechnik

Methoden für die Überwachung
und Steuerung kontinuierlicher
und ereignisdiskreter Systeme

von

Prof. Dr. Jan Lunze

3., überarbeitete Auflage mit 93 Anwendungs-
beispielen und 99 Übungsaufgaben

Oldenbourg Verlag München

Prof. Dr. Jan Lunze ist Inhaber des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik an der Ruhr-Universität Bochum.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2012 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München
Telefon: (089) 45051-0
www.oldenbourg-verlag.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: Dr. Gerhard Pappert
Herstellung: Constanze Müller
Titelbild: thinkstockphotos.de
Einbandgestaltung: hauser lacour
Gesamtherstellung: Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

Dieses Papier ist alterungsbeständig nach DIN/ISO 9706.

ISBN 978-3-486-71266-7
eISBN 978-3-486-71703-7

Vorwort

Die Automatisierungstechnik zeichnet sich durch eine große Methodenvielfalt und ein breites Anwendungsfeld aus. Neben der Steuerung und Regelung dynamischer Prozesse haben die Prozessüberwachung und die Fehlerdiagnose in den letzten Jahren eine zunehmende Bedeutung erlangt. Da diese Methoden auf einer systemtheoretischen Betrachtung des zu automatisierenden Prozesses beruhen, sind sie in allen ingenieurtechnischen Gebieten und darüber hinaus in vielen nichttechnischen Bereichen einsetzbar. Verfahrenstechnische Prozesse, die Energieversorgung, fahrzeug- und verkehrstechnische Systeme, Fertigungsprozesse und die Gebäudetechnik sind ohne Automatisierungstechnik undenkbar.

Dieses Buch gibt eine breite Einführung in die grundlegenden Aufgaben und Methoden der Automatisierungstechnik und veranschaulicht diese an zahlreichen Anwendungsbeispielen. Die Palette der Themen reicht von der Modellbildung über die Vorhersage des zukünftigen Systemverhaltens, den Entwurf von Regelungen und Steuerungen bis zur Zustandsbeobachtung und Prozessdiagnose.

Mit der gleichwertigen Behandlung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme betritt das Buch Neuland. Der Autor kennt kein vergleichbares Lehrbuch, das wie dieses alle wichtigen Automatisierungsaufgaben für beide Systemklassen betrachtet.

Bisher wurden die Methoden für die Überwachung und Regelung kontinuierlicher Systeme weitgehend getrennt von denen für ereignisdiskrete Systeme entwickelt und gelehrt. Mit der Einführung der Zustandsraumdarstellung entstand bereits um 1960 die Grundlage für eine durchgängige Theorie kontinuierlicher Systeme, während die breite Entwicklung automatisierungstechnischer Methoden für ereignisdiskrete Systeme erst nach 1980 einsetzte und deshalb noch nicht so weit gediehen ist. Dennoch ist für das Verständnis der Automatisierungstechnik mit ihrem umfangreichen Methodenspektrum und breiten Anwendungsgebiet die weitgehend gemeinsame Behandlung beider Systemklassen unabdingbar. Dieses Buch soll einen Anstoß geben, beide Teilgebiete besser als bisher in der Lehre zu verknüpfen.

Inhalt. Das Buch ist aus dem Manuskript einer Pflichtvorlesung für den Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Die Lehrveranstaltung „Automatisierungstechnik“ ersetzt seit dem Wintersemester 2001 die frühere Vorlesung „Regelungstechnik“, die sich wie ähnliche Pflichtveranstaltungen ingenieurtechnischer Studiengänge an anderen Universitäten im Wesentlichen mit dem einschleifigen linearen Regelkreis beschäftigte. Wichtige regelungstechnische Begriffe und Methoden wie das Zustandsraummodell, die Stabilitätsanalyse rückgekoppelter Systeme und Einstellregeln für PID-Regler werden auch hier behandelt. Darüber hinaus gibt das Buch aber auch eine Einführung in die Zustandsbeobachtung und die Fehlerdiagnose kontinuierlicher Systeme, die traditionell erst in späteren Lehrveranstaltungen geboten werden bzw. bisher überhaupt noch nicht in die Lehre

eingeflossen sind. Die genannten Themen werden anschließend für ereignisdiskrete Systeme behandelt, wobei offensichtlich wird, dass die Automatisierungsaufgaben für beide Systemklassen sehr ähnlich sind, sich die Lösungsmethoden aber auf Grund des unterschiedlichen Charakters beider Systemklassen wesentlich voneinander unterscheiden.

Dieser Stoffauswahl entsprechend ist das Buch in drei Teile gegliedert:

1. **Einführung**

Im ersten Teil werden die Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik behandelt und Methoden für die strukturelle Analyse dynamischer Systeme eingeführt. Ein Grundprinzip der Automatisierungstechnik besteht in der Rückkopplung von Informationen. Hierzu wird der Unterschied zwischen den Steuerungen in der offenen Wirkungskette und im geschlossenen Wirkungskreis erläutert. Alle im ersten Teil behandelten Methoden sind unabhängig davon, ob es sich bei den betrachteten Systemen um kontinuierliche oder ereignisdiskrete handelt.

2. **Automatisierung kontinuierlicher Systeme**

Der zweite Teil befasst sich mit der Automatisierung von Systemen, deren Verhalten durch reellwertige Signale dargestellt und die deshalb durch Differenzialgleichungen beschrieben werden. Der gemeinsame Ausgangspunkt für die Lösung aller Automatisierungsaufgaben ist das Zustandsraummodell des zu automatisierenden Prozesses, das für lineare und nichtlineare Systeme behandelt wird. Nach der Verhaltensanalyse kontinuierlicher Systeme werden wichtige Systemeigenschaften wie die Steuerbarkeit, die Beobachtbarkeit und die Stabilität eingeführt, Verfahren für die Reglereinstellung erläutert und schließlich Methoden für die Zustandsbeobachtung und die Fehlerdiagnose behandelt.

3. **Automatisierung ereignisdiskreter Systeme**

Der dritte Teil beschäftigt sich mit der Automatisierung von Systemen, deren Verhalten durch Ereignisfolgen beschrieben wird. Als Modellformen werden deterministische, nicht-deterministische und stochastische Automaten sowie Petrinetze eingeführt und für die Verhaltensanalyse, den Steuerungsentwurf, die Zustandsbeobachtung sowie die Fehlerdiagnose eingesetzt.

Diese Stoffauswahl verfolgt zwei Ziele. Einerseits ist das Buch für Studenten gedacht, die eine breite Einführung in das Gebiet der Automatisierungstechnik erhalten sollen, um ihre spätere Zusammenarbeit mit Fachleuten der Automatisierungstechnik vorzubereiten. Für sie ist Spezialwissen über Regelkreise nur von zweitrangiger Bedeutung. Dies gilt auch für Studenten der gegenwärtig neu entstehenden Studiengänge mit ingenieurtechnischer Ausrichtung wie z. B. Informatikingenieurwesen, Informationssystemtechnik, Technomathematik oder Wirtschaftsingenieurwesen.

Andererseits soll der Stoff dieses Buches eine breite Basis für das Vertiefungsstudium der Automatisierungstechnik schaffen. Die darauf aufbauenden Spezialvorlesungen umfassen in Bochum Pflichtveranstaltungen, die nach den bereits erschienenen Lehrbüchern¹ des Autors das regelungstechnische Fachwissen bzw. die Kenntnisse über die Beschreibung und Analyse ereignisdiskreter Systeme vertiefen.

¹ J. Lunze: *Regelungstechnik* (2 Bände), Springer-Verlag;
J. Lunze: *Ereignisdiskrete Systeme*, Oldenbourg-Verlag

Die Automatisierungstechnik ist eine Methodenwissenschaft. Deshalb konzentriert sich das Buch auf die methodischen Grundlagen und behandelt gerätetechnische und rechentechnische Probleme der Realisierung von Überwachungs- und Steuereinrichtungen nur am Rande.

Jede Automatisierungsaufgabe soll ein konkretes technisches Problem lösen. Trotz vieler Unterschiede in den Details kann man typische Aufgabenklassen angeben, deren Lösungsmethoden hier in Verbindung mit einer breiten Palette von **Anwendungsbeispielen** (in einer für die Lehre notwendigen Vereinfachung) erläutert werden. Dabei wird auch das große Anwendungspotenzial automatisierungstechnischer Methoden gezeigt.

Die angeführte Breite des Stoffes kann in einer einsemestrigen Lehrveranstaltung nur auf Kosten der Tiefe vermittelt werden. Die Erfahrungen des Autors zeigen, dass es durch eine Konzentration auf die wichtigsten Fragestellungen möglich ist, alle angesprochenen Themen in jeweils ein bis drei Vorlesungsstunden zu behandeln. Da durch das Zustandsraummodell in seiner kontinuierlichen und diskreten Form eine Brücke zwischen den beiden Systemklassen geschlagen wird, mit der sämtliche Automatisierungsaufgaben formuliert und gelöst werden können, entsteht dabei ein breites, zusammenhängendes Bild der Automatisierungstechnik.

Leser. Bei den Lesern werden gute Kenntnisse auf den Gebieten der Matrizenrechnung und der linearen gewöhnlichen Differenzialgleichungen vorausgesetzt. Die Systeme werden ausschließlich im Zeitbereich behandelt, so dass keine Kenntnisse über die Funktionaltransformationen erforderlich sind. Die erwarteten Vorkenntnisse aus der diskreten Mathematik beschränken sich auf Grundbegriffe der Grafentheorie, der Mengenlehre und der Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Das Buch wendet sich auch an die in der Praxis stehenden Fachleute, die eine fundierte Einführung in die methodischen Grundlagen der Automatisierungstechnik suchen. Zahlreiche **Übungsaufgaben** mit ausführlichen Lösungen geben Anregungen für das selbstständige Erarbeiten des Stoffes. Alle Kapitel schließen mit einem Ausblick auf weiterführende Themen und Literaturhinweisen. Die Zusammenstellung wichtiger englischer Fachbegriffe im Anhang soll den Einstieg in die Fachliteratur erleichtern.

Danksagung. Die Idee, kontinuierliche und ereignisdiskrete Systeme in weitgehender Analogie zu behandeln, verfolgt mich seit meinem Studium an der Technischen Universität Ilmenau, bei dem ich durch eine Vorlesung von Herrn Prof. Dr. MICHAEL KRAPP in die Automatentheorie eingeführt wurde. Durch diese Lehrveranstaltung habe ich die kontinuierliche Sicht auf Regelungs- und Steuerungssysteme nie als die einzig mögliche Betrachtungsweise angesehen und schon lange geplant, eine möglichst parallele Behandlungsweise beider Systemklassen in die Lehre einzuführen.

Gemeinsam mit meinem ehemaligen Mitarbeiter, Herrn Dr.-Ing. JOCHEN SCHRÖDER, habe ich mehrere Jahre lang untersucht, wie man die Probleme der Zustandsbeobachtung und der Prozessdiagnose für Automaten lösen kann. Die dabei erarbeiteten Methoden haben eine Lücke geschlossen und eine durchgängige Behandlung aller Automatisierungsaufgaben für kontinuierliche und ereignisdiskrete Systeme möglich gemacht. Der häufig plakativ gebrauchte Hinweis auf die Einheit von Forschung und Lehre hat hier seine Berechtigung.

Die Herren Dr.-Ing. JÖRG NEIDIG und Dr.-Ing. PHILIPP PLANCHON haben wesentlich bei der Einführung der Lehrveranstaltung „Automatisierungstechnik“ in Bochum mitgewirkt und wertvolle Hinweise für die Gestaltung der Übungsaufgaben gegeben. Schließlich gilt mein

Dank Frau ANDREA MARSCHALL für das Zeichnen vieler Bilder sowie dem Oldenbourg-Verlag für die schnelle Herausgabe dieses Lehrbuches.

Dritte Auflage. Bei der Überarbeitung des Textes für die dritte Auflage wurden Anregungen meiner Studenten sowie Hinweise von Fachkollegen, die dieses Buch in ihren Lehrveranstaltungen einsetzen, berücksichtigt. Dabei habe ich insbesondere von ausführlichen Anmerkungen von Herrn Prof. Dr.-Ing. GÜNTER SCHRÖDER und Herrn Dipl.-Ing. THOMAS SCHULTE (Universität Siegen) profitiert. Mit neuen Ideen haben meine Doktoranden Dipl.-Ing. CHRISTIAN STÖCKER, M.Sc. ANDREJ MOSEBACH und Dipl.-Ing. YANNICK NKE an der Überarbeitung mitgewirkt.

In der neuen Auflage werden dem Trend in der Fachliteratur entsprechend rückgekoppelte Steuerungen einheitlich als Regler und der dabei entstehende Kreis als Regelkreis bezeichnet, unabhängig davon, ob es sich um kontinuierliche oder diskrete Systeme handelt. Der Begriff Steuerung wird weiterhin als übergeordnete Bezeichnung verwendet, dynamische Systeme zielgerichtet zu beeinflussen.

Da das Programmsystem MATLAB heute an vielen Universitäten bereits in Bachelorstudiengängen eingeführt wird, wurden in das Buch neue Übungsaufgaben aufgenommen, die umfangreichere numerische Lösungsschritte erfordern und zweckmäßigerweise mit diesem Programmsystem gelöst werden.

Bochum, im Januar 2012

Jan Lunze

Auf der Homepage www.atp.ruhr-uni-bochum.de → Books des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik der Ruhr-Universität Bochum finden Interessenten weitere Informationen zu den Beispielen, die zur Erzeugung einiger Bilder verwendeten MATLAB-Programme sowie die Abbildungen dieses Buches in A4-Vergrößerung für die Verwendung in Lehrveranstaltungen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Verzeichnis der Anwendungsbeispiele | xvii |
| Hinweise zum Gebrauch des Buches | xxv |

Teil 1: Einführung

| | |
|--|----|
| 1 Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik | 1 |
| 1.1 Ziele der Automatisierungstechnik | 1 |
| 1.2 Anwendungsbeispiele | 4 |
| 1.2.1 Prozessautomatisierung | 4 |
| 1.2.2 Fertigungsautomatisierung | 9 |
| 1.2.3 Gebäudeautomatisierung | 10 |
| 1.2.4 Überwachung und Steuerung von Energiesystemen | 11 |
| 1.2.5 Automatisierungstechnik in Fahrzeugen | 12 |
| 1.2.6 Überwachung und Steuerung des Flugverkehrs | 14 |
| 1.2.7 Automatisierungsaufgaben in der Informations- und Kommunikationstechnik | 15 |
| 1.2.8 Zusammenfassung: Notwendigkeit der Automatisierung technischer Systeme | 16 |
| 1.3 Grundstruktur automatisierter Systeme | 18 |
| 1.3.1 Beziehungen zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem zu automatisierenden Prozess | 18 |
| 1.3.2 Das Rückkopplungsprinzip | 19 |
| 1.3.3 Die Rolle des Menschen in automatisierten Systemen | 20 |
| 1.3.4 Spezielle Klassen automatisierter Systeme | 21 |
| 1.4 Automatisierungsaufgaben | 23 |
| 1.4.1 Modellbildung dynamischer Systeme | 23 |
| 1.4.2 Vorhersage des Systemverhaltens | 26 |
| 1.4.3 Planung von Steuereingriffen | 27 |
| 1.4.4 Zustandsbeobachtung | 28 |
| 1.4.5 Prozessdiagnose | 28 |
| 1.4.6 Regelung und Steuerung | 29 |
| 1.4.7 Kombination von Automatisierungsfunktionen | 32 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.4.8 | Automatisierungshierarchie | 34 |
| 1.5 | Realisierung von Automatisierungseinrichtungen | 37 |
| 1.5.1 | Methoden und Geräte | 37 |
| 1.5.2 | Lösungsweg für Automatisierungsaufgaben | 39 |
| 1.5.3 | Beziehungen zwischen der Automatisierungstechnik und angrenzenden Fachdisziplinen | 40 |
| | Literaturhinweise | 41 |
| 2 | Grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme | 43 |
| 2.1 | Grundbegriffe der Systemtheorie | 43 |
| 2.1.1 | Signal, Prozess, System | 43 |
| 2.1.2 | Kontinuierliche und diskrete Signale und Systeme | 45 |
| 2.1.3 | Statische und dynamische Systeme | 48 |
| 2.1.4 | Autonome und gesteuerte Systeme | 50 |
| 2.1.5 | Gemeinsamkeiten und Unterschiede kontinuierlicher und diskreter Systeme | 50 |
| 2.2 | Blockschaltbild und Signalflussgraf | 52 |
| 2.2.1 | Struktur dynamischer Systeme | 52 |
| 2.2.2 | Blockschaltbild | 53 |
| 2.2.3 | Signalflussgraf | 60 |
| 2.3 | Dekomposition und Aggregation von Systemen | 61 |
| 2.4 | Kopplungsanalyse | 63 |
| 2.5 | Steuerungen in der offenen Wirkungskette und im geschlossenen Kreis | 69 |
| | Literaturhinweise | 77 |

Teil 2: Automatisierung kontinuierlicher Systeme

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Beschreibung kontinuierlicher Systeme | 79 |
| 3.1 | Modellbildungsaufgabe | 79 |
| 3.2 | Systembeschreibung durch lineare Differenzialgleichungen | 80 |
| 3.3 | Zustandsraummodell linearer Systeme | 85 |
| 3.3.1 | Zustandsgleichung und Ausgangsgleichung | 85 |
| 3.3.2 | Zustandsbegriff | 88 |
| 3.3.3 | Normierung der Signale und Parameter | 90 |
| 3.3.4 | Blockschaltbild und Signalflussgraf des Zustandsraummodells | 93 |
| 3.3.5 | Zustandsraumdarstellung von Mehrgrößensystemen | 94 |
| 3.3.6 | Gleichgewichtszustand linearer Systeme | 95 |
| 3.4 | Zustandsraummodell nichtlinearer Systeme | 97 |
| 3.5 | Linearisierung | 108 |
| 3.6 | Kompositionale Modellbildung kontinuierlicher Systeme | 112 |
| | Literaturhinweise | 117 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 4 | Verhalten kontinuierlicher Systeme | 119 |
| 4.1 | Vorhersage des Systemverhaltens | 119 |
| 4.2 | Verhalten linearer Systeme | 120 |
| 4.2.1 | Lösung der Zustandsgleichung | 120 |
| 4.2.2 | Berechnung der Ausgangsgröße | 123 |
| 4.2.3 | Anmerkungen zum Zustandsbegriff | 128 |
| 4.2.4 | Bewegungsgleichung in kanonischer Form | 132 |
| 4.2.5 | Übergangsfunktion | 137 |
| 4.2.6 | Berechnung der Matrixexponentialfunktion | 139 |
| 4.3 | Verhalten nichtlinearer Systeme | 140 |
| 4.3.1 | Lösung der nichtlinearen Modellgleichungen | 140 |
| 4.3.2 | Rechnergestützte Analyse nichtlinearer Systeme | 142 |
| 4.4 | Kennwertermittlung | 146 |
| | Literaturhinweise | 149 |
| 5 | Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit | 151 |
| 5.1 | Definition der Steuerbarkeit und der Beobachtbarkeit | 151 |
| 5.2 | Steuerbarkeit linearer Systeme | 153 |
| 5.2.1 | Steuerbarkeitskriterium | 153 |
| 5.2.2 | Eigenschaften vollständig steuerbarer Systeme | 154 |
| 5.3 | Beobachtbarkeit linearer Systeme | 159 |
| 5.3.1 | Beobachtbarkeitskriterium | 159 |
| 5.3.2 | Berechnung des Anfangszustands aus n Messwerten | 161 |
| 5.3.3 | Bestimmung des Anfangszustands mit Hilfe der gramischen Beobachtbarkeitsmatrix | 162 |
| 5.4 | Strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit | 165 |
| 5.4.1 | Strukturgraf | 165 |
| 5.4.2 | Definition und Kriterien für die strukturelle Steuerbarkeit und strukturelle Beobachtbarkeit | 166 |
| 5.4.3 | Strukturelle Analyse nichtlinearer Systeme | 171 |
| 5.5 | Systemzerlegung entsprechend den Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitseigenschaften | 172 |
| | Literaturhinweise | 176 |
| 6 | Stabilität | 177 |
| 6.1 | Stabilitätsdefinition | 177 |
| 6.2 | Stabilitätsanalyse linearer Systeme | 180 |
| 6.2.1 | Stabilitätsanalyse anhand der Eigenwerte der Systemmatrix | 180 |
| 6.2.2 | Hurwitzkriterium | 183 |
| 6.3 | Stabilitätsanalyse nichtlinearer Systeme | 186 |
| 6.3.1 | Lösungswege | 186 |
| 6.3.2 | Stabilitätsprüfung mit dem linearisierten Modell | 188 |
| 6.3.3 | Direkte Methode von Ljapunow | 191 |
| 6.3.4 | Anwendung der Direkten Methode auf lineare Systeme | 196 |
| 6.4 | Stabilität von Regelkreisen | 199 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4.1 | Stabilität der Regelstrecke und des Regelkreises | 199 |
| 6.4.2 | Robuste Stabilität | 202 |
| 6.5 | Ausblick: Weitere Verfahren für die Stabilitätsprüfung | 204 |
| | Literaturhinweise | 205 |
| 7 | Einschleifige Regelkreise | 207 |
| 7.1 | Regelungsaufgabe für kontinuierliche Systeme | 207 |
| 7.2 | Modell des Standardregelkreises | 210 |
| 7.2.1 | Linearer Regelkreis | 210 |
| 7.2.2 | Nichtlinearer Regelkreis | 213 |
| 7.3 | Wichtige Eigenschaften von Regelkreisen | 215 |
| 7.3.1 | Störkompensation und Sollwertfolge | 215 |
| 7.3.2 | Erreichbare Regelgüte | 223 |
| 7.3.3 | Robustheit | 226 |
| 7.4 | Reglertypen | 230 |
| 7.4.1 | PID-Regler | 230 |
| 7.4.2 | Weitere Reglerkomponenten | 233 |
| | Literaturhinweise | 235 |
| 8 | Einstellregeln für PID-Regler | 237 |
| 8.1 | Entwurfsschritte | 237 |
| 8.2 | Einstellregeln für PID-Regler | 239 |
| 8.3 | Robuste PI-Regelung | 246 |
| 8.3.1 | Gegenkopplungsbedingung für I-Regler | 246 |
| 8.3.2 | Reglereinstellung | 249 |
| 8.3.3 | Erweiterung auf PI-Regler | 251 |
| 8.4 | Ausblick: Verfahren für den Reglerentwurf | 256 |
| | Literaturhinweise | 257 |
| 9 | Zustandsbeobachtung kontinuierlicher Systeme | 259 |
| 9.1 | Beobachtungsaufgabe | 259 |
| 9.2 | Luenbergerbeobachter | 261 |
| 9.2.1 | Grundidee | 261 |
| 9.2.2 | Beobachterstruktur | 263 |
| 9.2.3 | Wahl der Beobachterrückführung | 264 |
| 9.2.4 | Verhalten des Beobachters bei Störungen und Modellunsicherheiten | 270 |
| 9.3 | Beobachter für nichtlineare Systeme | 277 |
| 9.4 | Anwendungen der Zustandsbeobachtung | 278 |
| 9.4.1 | Beobachtung eines Teilsystems | 278 |
| 9.4.2 | Online-Vorhersage des Systemverhaltens | 279 |
| 9.4.3 | Regelung unter Verwendung einer beobachteten Regelgröße | 281 |
| | Literaturhinweise | 283 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 10 | Diagnose kontinuierlicher Systeme | 285 |
| 10.1 | Diagnoseaufgabe und Lösungswege | 285 |
| 10.1.1 | Diagnoseaufgabe | 285 |
| 10.1.2 | Diagnoseschritte | 287 |
| 10.1.3 | Signalbasierte und modellbasierte Diagnose | 288 |
| 10.1.4 | Modelle des fehlerfreien und des fehlerhaften Systems | 290 |
| 10.1.5 | Diagnose mit statischen und dynamischen Modellen | 292 |
| 10.1.6 | Prinzip der konsistenzbasierten Diagnose | 293 |
| 10.2 | Fehlererkennung mit einem Zustandsbeobachter | 295 |
| 10.3 | Sensorüberwachung | 303 |
| 10.3.1 | Aufgabenstellung | 303 |
| 10.3.2 | Fehlerlokalisierung mit dedizierten Beobachtern | 304 |
| 10.3.3 | Erweiterung | 313 |
| 10.4 | Fehleridentifikation | 313 |
| 10.4.1 | Fehleridentifikation mit einer Beobachterbank | 313 |
| 10.4.2 | Fehleridentifikation unter Verwendung von Fehlermodellen | 315 |
| 10.4.3 | Entwurf beobachtergestützter Diagnosesysteme | 317 |
| 10.5 | Ausblick: Diagnose und fehlertolerante Steuerung | 325 |
| | Literaturhinweise | 326 |

Teil 3: Automatisierung ereignisdiskreter Systeme

| | | |
|-----------|---|-----|
| 11 | Beschreibung diskreter Systeme | 329 |
| 11.1 | Modellbildungsaufgabe | 329 |
| 11.1.1 | Diskrete Signale und Ereignisse | 329 |
| 11.1.2 | Modellbildungsziel und Modellbildungsschritte | 336 |
| 11.2 | Deterministische Automaten | 339 |
| 11.2.1 | Autonome deterministische Automaten | 339 |
| 11.2.2 | Deterministische Automaten mit Eingang und Ausgang | 345 |
| 11.3 | Nichtdeterministische Automaten | 351 |
| 11.3.1 | Deterministische und nichtdeterministische Systeme | 351 |
| 11.3.2 | Autonome nichtdeterministische Automaten | 353 |
| 11.3.3 | Nichtdeterministische Automaten mit Eingang und Ausgang | 363 |
| 11.4 | Stochastische Automaten | 368 |
| 11.4.1 | Stochastische Prozesse | 368 |
| 11.4.2 | Autonome stochastische Automaten | 372 |
| 11.4.3 | Stochastische Automaten mit Eingang und Ausgang | 378 |
| 11.4.4 | Markoveigenschaft dynamischer Systeme | 381 |
| 11.5 | Petrinetze | 384 |
| 11.5.1 | Autonome Petrinetze | 384 |
| 11.5.2 | Petrinetze mit Eingang und Ausgang | 397 |
| 11.5.3 | Beziehungen zwischen Petrinetzen und Automaten | 400 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11.6 | Kompositionale Modellbildung diskreter Systeme | 403 |
| 11.6.1 | Modellbildungsaufgabe | 403 |
| 11.6.2 | Synchronisation von Automaten | 404 |
| 11.6.3 | Reihenschaltung | 408 |
| 11.6.4 | Rückführautomat | 411 |
| | Literaturhinweise | 420 |
| 12 | Verhalten diskreter Systeme | 423 |
| 12.1 | Vorhersage des Systemverhaltens | 423 |
| 12.2 | Verhalten deterministischer Automaten | 424 |
| 12.2.1 | Berechnung der Zustands- und Ausgabefolge | 424 |
| 12.2.2 | Erreichbarkeitsanalyse des Automatengraphen | 425 |
| 12.2.3 | Strukturelle Analyse deterministischer Automaten | 427 |
| 12.2.4 | Steuerbarkeit deterministischer Automaten | 429 |
| 12.3 | Verhalten nichtdeterministischer Automaten | 430 |
| 12.3.1 | Berechnung der Zustands- und Ausgabefolgen | 430 |
| 12.3.2 | Strukturelle Analyse nichtdeterministischer Automaten | 433 |
| 12.3.3 | Steuerbarkeit nichtdeterministischer Automaten | 434 |
| 12.4 | Verhalten stochastischer Automaten | 437 |
| 12.4.1 | Berechnung der Zustandsfolgen autonomer stochastischer Automaten | 437 |
| 12.4.2 | Strukturelle Analyse stochastischer Automaten | 440 |
| 12.4.3 | Erweiterung auf Automaten mit Eingang und Ausgang | 440 |
| 12.5 | Verhalten von Petrinetzen | 442 |
| 12.5.1 | Berechnung der Markierungsfolgen | 442 |
| 12.5.2 | Strukturelle Analyse von Petrinetzen | 443 |
| 12.5.3 | Invarianten | 444 |
| | Literaturhinweise | 451 |
| 13 | Steuerung diskreter Systeme | 453 |
| 13.1 | Steuerungsaufgaben für diskrete Systeme | 453 |
| 13.2 | Verknüpfungssteuerungen | 456 |
| 13.3 | Ablaufsteuerungen | 458 |
| 13.3.1 | Reglergesetz | 458 |
| 13.3.2 | Zeitplansteuerungen | 461 |
| 13.4 | Speicherprogrammierbare Steuerungen | 468 |
| | Literaturhinweise | 470 |
| 14 | Entwurf diskreter Steuerungen | 471 |
| 14.1 | Entwurfsschritte | 471 |
| 14.1.1 | Systematischer Steuerungsentwurf | 472 |
| 14.1.2 | Heuristische Festlegung des Steuerungsgesetzes | 473 |
| 14.2 | Reglerentwurf für Automaten | 476 |
| 14.2.1 | Entwurfsproblem | 476 |
| 14.2.2 | Reglerentwurf für deterministische Automaten | 476 |
| 14.2.3 | Erweiterungen | 479 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 14.2.4 | Reglerentwurf für nichtdeterministische Automaten | 483 |
| 14.3 | Steuerungsentwurf für Petrinetze | 484 |
| 14.3.1 | Entwurf mit Hilfe des Erreichbarkeitsgraphen | 484 |
| 14.3.2 | Steuerungsentwurf unter Nutzung von S-Invarianten | 486 |
| 14.4 | Verifikation diskreter Steuerungen | 493 |
| | Literaturhinweise | 495 |
| 15 | Zustandsbeobachtung diskreter Systeme | 497 |
| 15.1 | Beobachtungsaufgabe | 497 |
| 15.2 | Beobachtung deterministischer und nichtdeterministischer Automaten | 498 |
| 15.2.1 | Beobachtungsalgorithmus für nichtdeterministische Automaten | 498 |
| 15.2.2 | Darstellung des Beobachtungsalgorithmus als Automat | 504 |
| 15.2.3 | Anwendung des Beobachtungsalgorithmus auf deterministische Automaten | 506 |
| 15.2.4 | Konsistenz von E/A-Paaren mit nichtdeterministischen Automaten | 508 |
| 15.3 | Beobachtung stochastischer Automaten | 511 |
| | Literaturhinweise | 519 |
| 16 | Diagnose diskreter Systeme | 521 |
| 16.1 | Diagnoseaufgabe | 521 |
| 16.2 | Diagnose nichtdeterministischer Automaten | 522 |
| 16.2.1 | Modellierung fehlerbehafteter Systeme | 522 |
| 16.2.2 | Detektion konstanter Fehler | 524 |
| 16.2.3 | Identifikation konstanter Fehler | 525 |
| 16.2.4 | Identifikation zeitabhängiger Fehler | 532 |
| 16.3 | Diagnose stochastischer Automaten | 533 |
| 16.3.1 | Beschreibung fehlerbehafteter Systeme durch stochastische Automaten | 533 |
| 16.3.2 | Grundidee der Diagnose stochastischer Systeme | 534 |
| 16.3.3 | Diagnosealgorithmus | 540 |
| | Literaturhinweise | 548 |
| 17 | Ausblick: Überwachung und Steuerung hybrider dynamischer Systeme | 549 |
| 17.1 | Automatisierung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme | 549 |
| 17.2 | Hybride dynamische Systeme | 551 |
| | Literaturhinweise | 556 |
| | Literaturverzeichnis | 557 |

Anhänge

| | |
|--|------------|
| Anhang 1: Lösung der Übungsaufgaben | 561 |
| Anhang 2: Fachwörter deutsch – englisch | 657 |
| Sachwortverzeichnis | 661 |

Verzeichnis der Anwendungsbeispiele

Prozessautomatisierung

| | |
|--|----------|
| Aufgaben der Prozessautomatisierung (Abschn. 1.2.1) | 4 |
| Batchreaktor und Paketlager (Beispiel 2.1) | 47 |
| Steuerung einer Screening-Anlage (Aufgabe 11.17) | 402 |
| Überwachung eines automatischen Qualitätskontrollsystems (Aufgabe 16.4) | 540 |
| • Analyse und Steuerung einer Abfüllanlage | |
| Steuerung einer Abfüllanlage (Aufgabe 2.5 mit Lösung) | 77, 563 |
| Blockschaltbild und Kopplungsstruktur (Beispiel 2.4) | 56 |
| Veränderung der Kopplungsstruktur (Beispiel 2.9) | 65 |
| Analyse der erweiterten Abfüllanlage (Aufgabe 2.3 mit Lösung) | 67, 568 |
| • Modellierung und Analyse eines Wärmeübertragers | |
| Zustandsraummodell eines Wärmeübertragers (Aufgabe 3.9 mit Lösung) | 111, 584 |
| Kennwertermittlung (Aufgabe 4.4 mit Lösung) | 149, 588 |
| Stabilitätsanalyse (Aufgabe 6.1 mit Lösung) | 185, 597 |
| • Steuerung und Diagnose von Rührkesselreaktoren | |
| Temperatur- und Füllstandsregelung eines Reaktors (Beispiel 1.2) | 5 |
| Temperaturverhalten eines Rührkesselreaktors (Aufgabe 4.2 mit Lösung) | 136, 585 |
| Stabilität des Temperaturregelkreises (Aufgabe 6.7 mit Lösung) | 202, 602 |
| Einstellung der Temperaturregelung (Beispiel 8.1) | 242 |
| Entwurf eines Beobachters für zwei gekoppelte Behälter (Aufgabe 9.1 mit Lösung) | 270, 608 |
| Fehlerdiagnose eines Reaktors mit Füllstandsregelung (Aufgabe 10.1 mit Lösung) | 301, 610 |
| Erprobung des Diagnosealgorithmus aus Aufgabe 10.1 (Aufgabe 10.2) | 302 |
| Diagnose zweier gekoppelter Reaktoren mit einem ereignisdiskreten Modell (Aufgabe 16.2 mit Lösung) | 530, 654 |
| • Steuerung und Diagnose von Batchprozessen | |
| Steuerung eines Batchprozesses (Beispiel 1.3) | 7 |
| Vergleich von Zeitplansteuerung und Ablaufsteuerung (Beispiel 2.11) | 73 |

| | |
|--|----------|
| Kontinuierliches Modell eines Behältersystems (Aufgabe 3.6 mit Lösung) | 107, 579 |
| Verhalten eines Batchprozesses (Beispiel 12.5) | 435 |
| Rezeptsteuerung (Beispiel 14.1) | 474 |
| Wertefolgen und Ereignisse beim Füllen eines Reaktors (Beispiel 11.1) | 333 |
| Beschreibung eines Batchprozesses durch ein Petrinetz (Aufgabe 11.13 mit Lösung) | 396, 624 |
| Invarianten des Petrinetzes (Beispiel 12.9) | 448 |
| Kompositionale Modellbildung eines geregelten Vorratsbehälters (Aufgabe 11.24 mit Lösung) | 419, 635 |
| Steuerung eines Batchprozesses (Aufgabe 13.4 mit Lösung) | 467, 643 |
| Diagnose mit ereignisdiskretem Modell (Beispiel 16.1) | 527 |
| Modellierung eines Batchreaktors für die Fehlerdiagnose (Aufgabe 16.6 mit Lösung) | 548, 655 |
| Anwendung des Diagnosealgorithmus (Aufgabe 16.1) | 530 |
| Erweiterung der Diagnose unter Berücksichtigung der Fehlerwahrscheinlichkeit (Beispiel 16.5) | 546 |
| Darstellung eines Behältersystems als hybrider Automat (Aufgabe 17.1) | 556 |
| • Diagnose von Servoventilen | |
| Fehlerdiagnose eines Servoventils (Beispiel 10.4) | 317 |
| Diagnostizierbarkeitsanalyse (Aufgabe 10.4 mit Lösung) | 324, 614 |
| • Überwachung von pH-Sensoren | |
| Überwachung eines pH-Sensors (Beispiel 10.3) | 306 |
| Intelligenter pH-Sensor (Aufgabe 10.3 mit Lösung) | 311, 612 |
| • Überwachung und Regelung eines Industrieofens | |
| Steuerbarkeit eines Industrieofens (Beispiel 5.1) | 154 |
| Beobachtbarkeit (Beispiel 5.2) | 162 |
| Strukturelle Analyse (Beispiel 5.3) | 168 |
| Beobachterentwurf für den Industrieofen (Beispiel 9.1) | 268 |
| Verhalten des Beobachters bei Störungen (Beispiel 9.2) | 274 |
| Temperaturregelung des Industrieofens (Aufgabe 9.2) | 282 |
| Fertigungsautomatisierung | |
| Transportsysteme in der Schaltkreisfertigung (Beispiel 1.4) | 9 |
| • Robotersteuerungen | |
| Grundstruktur von Robotersteuerungen (Abschn. 1.2.2) | 9 |
| Steuerung eines elastischen Roboters (Beispiel 2.12) | 76 |

- **Automatisierung von Fertigungszellen**

| | |
|--|----------|
| Hierarchische Steuerung einer Fertigungszelle (Beispiel 1.10) | 36 |
| Modellierung der Fertigungszelle (Aufgabe 11.7 mit Lösung) | 361, 619 |
| Zustandsbeobachtung (Aufgabe 15.2 mit Lösung) | 503, 650 |
| Beschreibung der Zuverlässigkeit einer Werkzeugmaschine (Beispiel 11.10) | 377 |
| Kompositionale Modellbildung von drei Werkzeugmaschinen (Beispiel 11.14) | 409 |
| Beschreibung von vier Werkzeugmaschinen durch einen nichtdeterministischen Automaten (Beispiel 11.4) | 359 |
| Beschreibung durch ein Petrinetz (Beispiel 11.10) | 392 |
| Invarianten des Petrinetzes (Beispiel 12.8) | 447 |
| Beschreibung der vier Werkzeugmaschinen als Steuerstrecke (Beispiel 11.11) | 398 |
| Analyse der vier Werkzeugmaschinen (Aufgabe 12.1) | 434 |
| Steuerung der vier Werkzeugmaschinen (Aufgabe 14.4) | 495 |
| Zustandsbeobachtung der vier Werkzeugmaschinen (Aufgabe 15.3) | 507 |

- **Modellierung einer Stanze**

| | |
|--|-----|
| Ereignisdiskrete Beschreibung einer Stanze (Beispiel 11.2) | 343 |
| Modellerweiterung zur Berücksichtigung von Fehlermöglichkeiten (Beispiel 11.3) | 356 |
| Modellerweiterung zur Erfassung der Fehlerwahrscheinlichkeiten (Beispiel 11.7) | 376 |
| Verhaltensanalyse (Beispiel 12.6) | 438 |
| Analyse der gesteuerten Stanze (Aufgabe 14.3) | 494 |

Automatisierung von Kraftfahrzeugen

| | |
|---|----------|
| Automatisches Anfahren am Berg (Aufgabe 1.1) | 4 |
| Regelungsaufgaben bei Fahrzeugen (Abschn. 1.2.5) | 12 |
| Autofahren als Problem der Mehrebenensteuerung (Aufgabe 1.5 mit Lösung) | 37, 563 |
| Ereignisdiskrete Beschreibung des Autofahrens (Aufgabe 11.3 mit Lösung) | 350, 617 |
| Komfortverbesserung in Kraftfahrzeugen (Aufgabe 13.1) | 465 |
| Aktive Federung (Beispiel 1.9) | 20 |

- **Modellierung der Längsbewegung**

| | |
|---|---------|
| Blockschaltbild des Antriebsstrangs eines Kraftfahrzeugs (Aufgabe 2.1 mit Lösung) | 59, 565 |
| Längsbewegung eines Fahrzeugs (Beispiel 4.1) | 125 |
| Modellunbestimmtheiten und Störungen der Fahrzeugbewegung (Beispiel 7.5) | 227 |

- **Antiblockiersystem**

| | |
|--|-----|
| Bremsassistent und Antiblockiersystem (Beispiel 1.8) | 13 |
| Modell für den Abbremsvorgang eines Fahrzeugs (Beispiel 3.9) | 102 |

| | |
|---|----------|
| Linearisierte Beschreibung des Abbremsvorgangs (Aufgabe 3.8 mit Lösung) | 111, 581 |
| Simulation des Abbremsvorgangs (Beispiel 4.2) | 143 |
| Strukturelle Analyse des Modells für den Abbremsvorgang (Aufgabe 5.5 mit Lösung) | 174, 595 |
| Stabilitätsanalyse des Schlupfverhaltens (Aufgabe 6.4 mit Lösung) | 190, 599 |
| Robustheit eines Antiblockiersystems (Aufgabe 6.8 mit Lösung) | 203, 604 |
| Realisierung eines Antiblockiersystems (Beispiel 7.7) | 234 |
| Diskrete Beschreibung eines Antiblockiersystems (Aufgabe 11.23) | 418 |
| • Onboard-Diagnose | |
| Diagnose von Kraftfahrzeugen (Beispiel 10.1) | 286 |
| Diagnose eines Motorkühlsystems (Beispiel 16.2) | 538 |
| Einklemmschutz für einen Fensterheber (Beispiel 10.2) | 297 |
| Strukturelle Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des Fensterhebers (Aufgabe 5.6) | 175 |
| • Motorsteuerung | |
| Aufgaben der Motorsteuerung (Beispiel 1.7) | 12 |
| Blockschaltbild einer Motorsteuerung (Aufgabe 2.2 mit Lösung) | 59, 567 |
| Beschreibung der Arbeitsweise eines Verbrennungsmotors (Beispiel 11.16) | 401 |
| Ereignisdiskrete Beschreibung des Startvorgangs eines Fahrzeugs (Aufgabe 11.6) | 361 |
| • Modellierung eines Regensors | |
| Beschreibung eines Regensors durch einen nichtdeterministischen Automaten (Beispiel 11.5) | 364 |
| Modellerweiterung zum stochastischen Automaten (Aufgabe 11.12 mit Lösung) | 381, 623 |
| Verhaltensanalyse (Aufgabe 12.2 mit Lösung) | 442, 637 |
| • Autarke Unterwasserfahrzeuge | |
| Nichtlineares Zustandsraummodell eines autarken Unterwasserfahrzeugs (Beispiel 3.8) .. | 99 |
| Linearisierung des Modells (Aufgabe 3.7 mit Lösung) | 110, 580 |
| Stabilität des Unterwasserfahrzeugs (Aufgabe 6.3 mit Lösung) | 190, 598 |
| Verkehrsleittechnik | |
| Steuerung einer Schiffsschleuse (Aufgabe 14.2 mit Lösung) | 492, 647 |
| • Ampelsteuerung | |
| Steuerung der Ampel an einer Garageneinfahrt (Beispiel 13.1) | 457 |
| Steuerung einer „Bremsampel“ (Aufgabe 13.3 mit Lösung) | 466, 641 |

| | |
|--|----------|
| • Automatisierung von U-Bahn, Eisenbahn und Flugzeug | |
| Aufgaben der Flugregelung (Abschn. 1.2.6) | 14 |
| Steuerung der vollautomatischen U-Bahn in Lille (Aufgabe 13.5) | 467 |
| Diskrete und kontinuierliche Elemente der U-Bahn-Steuerung (Beispiel 17.1) | 551 |
| Beschreibung eines Streckenabschnitts der Eisenbahn (Aufgabe 11.15 mit Lösung) | 400, 628 |

Automatisierungsaufgaben in der Energietechnik

| | |
|---|----------|
| • Überwachung von Elektroenergienetzen | |
| Automatisierungsaufgaben in Energiesystemen (Abschn. 1.2.4) | 11 |
| Überwachung und Steuerung von Elektroenergienetzen (Beispiel 1.6) | 11 |
| Kopplungsanalyse eines Elektroenergieversorgungsnetzes (Aufgabe 2.4 mit Lösung) | 67, 568 |
| • Modellierung und Analyse von Gleichstrommotoren | |
| Aufstellung der Differenzialgleichung für einen Gleichstrommotor (Beispiel 3.1) | 82 |
| Zustandsraummodell (Beispiel 3.2) | 86 |
| Zustandstrajektorie (Beispiel 3.3) | 90 |
| Normierung des Zustandsraummodells (Beispiel 3.4) | 91 |
| Signalfussgraf (Beispiel 3.5) | 94 |
| Statisches Verhalten (Beispiel 3.6) | 96 |
| Verhalten bei Störungen und Modellunbestimmtheiten (Aufgabe 7.3 mit Lösung) | 229, 605 |
| Zustandsbeobachtung (Aufgabe 9.3) | 283 |
| Blockschaltbild eines drehzahlgeregelten Gleichstrommotors (Beispiel 2.3) | 55 |
| Hierarchische Modellbildung des drehzahlgeregelten Motors (Beispiel 2.7) | 62 |
| Zustandsraummodell des geregelten Motors (Beispiel 7.1) | 211 |
| Bleibende Regelabweichung beim drehzahlgeregelten Gleichstrommotor (Beispiel 7.3) .. | 218 |
| Verschlechterung der Regelgüte durch Messverzögerungen (Beispiel 7.4) | 224 |

Modellierung und Regelung mechanischer Systeme

| | |
|--|----------|
| Stabilitätsanalyse eines Pendels mit Hilfe des linearisierten Modells (Beispiel 6.2) | 188 |
| • Invertiertes Pendel | |
| Aufrichten eines invertierten Pendels (Beispiel 2.10) | 70 |
| Zustandsraummodell (Aufgabe 3.2 mit Lösung) | 97, 575 |
| Stabilitätsanalyse (Aufgabe 6.2) | 189 |
| Stabilitätsanalyse des geregelten Pendels (Aufgabe 6.6 mit Lösung) | 201, 601 |
| Robuste Stabilisierung des invertierten Pendels (Aufgabe 6.9) | 204 |

| | |
|--|----------|
| Stabilisierung des invertierten Pendels (Beispiel 7.6) | 231 |
| • Radioteleskop | |
| Zustandsraummodell (Aufgabe 3.3 mit Lösung) | 106, 576 |
| Regelung (Beispiel 7.2) | 214 |
| Automatisierung von Kommunikationsnetzen | |
| Steuerungsaufgaben in ATM-Netzen (Abschn. 1.2.7) | 15 |
| Steuerung von ATM-Netzen (Aufgabe 3.4 mit Lösung) | 106, 577 |
| Beschreibung einer Rechnerkommunikation (Beispiel 11.13) | 407 |
| Beobachtbarkeit eines Kommunikationssatelliten (Aufgabe 5.7 mit Lösung) | 175, 596 |
| Gebäudeautomatisierung | |
| Aufgaben der Gebäudeautomatisierung (Beispiel 1.2.3) | 10 |
| Wirkungsweise einer Raumtemperaturregelung (Beispiel 1.5) | 10 |
| Blockschaltbild einer Raumtemperaturregelung (Aufgabe 2.6 mit Lösung) | 77, 570 |
| Steuerung einer Sicherheitsschleuse (Beispiel 14.3) | 488 |
| • Steuerung und Diagnose einer Raumbeleuchtung | |
| Beschreibung der Funktion einer Raumbeleuchtung durch einen Automaten (Aufgabe 11.8 mit Lösung) | 368, 620 |
| Modellerweiterung zum stochastischen Automaten (Aufgabe 11.11 mit Lösung) | 381, 622 |
| Diagnose einer Raumbeleuchtung (Aufgabe 16.3) | 532 |
| Steuerung einer Treppenhausbeleuchtung (Aufgabe 13.2 mit Lösung) | 466, 640 |
| • Steuerung von Rolltreppen | |
| Modellierung einer Rolltreppe (Aufgabe 11.18 mit Lösung) | 408, 629 |
| Beschreibung der gesteuerten Rolltreppe durch einen Rückführautomaten (Beispiel 11.15) | 414 |
| Regelung der Rolltreppe (Beispiel 13.3) | 462 |
| • Modellierung und Steuerung eines Personenaufzugs | |
| Beschreibung eines Personenaufzugs durch gekoppelte Automaten und ein Petrinetz (Aufgabe 11.22 mit Lösung) | 417, 633 |
| Steuerung eines Personenaufzugs (Beispiel 14.2) | 479 |
| Verhinderung verbotener Zustände (Aufgabe 14.1 mit Lösung) | 492, 645 |

Automatisierungstechnik im täglichen Leben

| | |
|---|----------|
| Beispiele für die Automatisierungstechnik im täglichen Leben (Aufgabe 1.2 mit Lösung) . | 22, 561 |
| Automatiktoaster und andere automatische Geräte (Aufgabe 1.3 mit Lösung) | 22, 562 |
| Waschautomat (Beispiel 1.1) | 3 |
| Beschreibung eines Kartentelefons (Aufgabe 11.9) | 368 |
| Steuerung einer Digitalkamera (Aufgabe 11.14 mit Lösung) | 400, 626 |
| Modell eines Getränkeautomaten (Aufgabe 11.1 mit Lösung) | 350, 616 |
| Steuerung eines Getränkeautomaten (Beispiel 13.2) | 458 |
| Beschreibung eines Bestellvorgangs (Aufgabe 11.4 mit Lösung) | 350, 619 |
| Analyse des Elbehochwassers (Beispiel 2.5) | 57 |
| Rezeptsteuerung in einer Bäckerei (Aufgabe 1.4) | 23 |
| Modellierung der Flugbahn eines Golfballs (Aufgabe 3.5 mit Lösung) | 107, 578 |
| Automatentheoretische Beschreibung der Fußball-Weltmeisterschaft (Aufgabe 11.5) | 351 |

Hinweise zum Gebrauch des Buches

Formelzeichen. Die Wahl der Formelzeichen hält sich an folgende Konventionen: Kleine Buchstaben bezeichnen Skalare, z. B. x , a , t . Vektoren sind durch halbfette Kleinbuchstaben (\boldsymbol{x} , \boldsymbol{a}) und Matrizen durch halbfette Großbuchstaben (\boldsymbol{A} , \boldsymbol{X}) dargestellt. Entsprechend dieser Festlegung werden die Elemente der Matrizen und Vektoren durch kursive Kleinbuchstaben (mit Indizes) symbolisiert, beispielsweise durch x_1 , x_2 , x_i für Elemente des Vektors \boldsymbol{x} und durch a_{12} , a_{ij} für Elemente der Matrix \boldsymbol{A} . Werden Größen, die im allgemeinen Fall als Vektor oder Matrix geschrieben werden (z. B. \boldsymbol{x} , \boldsymbol{A}), in einem einfachen Beispiel durch Skalare ersetzt, so wird dies durch den Übergang zu kleinen kursiven Buchstaben (x bzw. a) verdeutlicht. Dann gelten die vorher mit Vektoren und Matrizen geschriebenen Gleichungen mit den skalaren Größen gleichen Namens.

Vektoren sind stets als Spaltenvektoren definiert. Die Transposition von Vektoren und Matrizen wird durch ein hochgestelltes „T“ gekennzeichnet (\boldsymbol{c}^T).

Mengen sind durch kalligrafische Buchstaben dargestellt: \mathcal{Q} , \mathcal{P} .

Bei den Indizes wird zwischen steil gesetzten Abkürzungen und kursiv gesetzten Laufindizes unterschieden. Beispielsweise kennzeichnet der Index „m“ bei y_m den Messwert einer Ausgangsgröße y , während er bei y_m den m -ten Systemausgang bezeichnet. Im zweiten Fall kann für m eine beliebige Zahl eingesetzt werden, und es gibt außer y_m z. B. auch die Größe y_{m-1} .

Die verwendeten Formelzeichen und Bezeichnungen orientieren sich an den international üblichen und weichen deshalb von der DIN 19299 ab. Beispielsweise werden bei kontinuierlichen Systemen für die Regel- und die Stellgröße die Buchstaben y und u verwendet. x und \boldsymbol{x} sind die international gebräuchlichen Formelzeichen für eine Zustandsvariable bzw. den Zustandsvektor.

Wenn bei einer Gleichung hervorgehoben werden soll, dass es sich um eine Forderung handelt, die durch eine geeignete Wahl von bestimmten Parametern erfüllt werden soll, wird über das Gleichheitszeichen ein Ausrufezeichen gesetzt ($\stackrel{!}{=}$).

Bei den Beispielen wird mit Zahlengleichungen gearbeitet, in die die physikalischen Größen in einer zuvor festgelegten Maßeinheit einzusetzen sind. Bei den Ergebnissen werden die Maßeinheiten wieder an die Größen geschrieben. Dabei wird zur Vereinfachung der Darstellung in den Gleichungen nicht zwischen den physikalischen Größen und ihren auf eine vorgegebene Maßeinheit bezogenen Größen unterschieden (vgl. Abschn. 3.3.3).

Übungsaufgaben. Die angegebenen Übungsaufgaben sind ihrem Schwierigkeitsgrad entsprechend folgendermaßen gekennzeichnet:

- Aufgaben ohne Markierung dienen der Wiederholung und Festigung des unmittelbar zuvor vermittelten Stoffes. Sie können in direkter Analogie zu den behandelten Beispielen gelöst werden.
- Aufgaben, die mit einem Stern markiert sind, befassen sich mit der Anwendung des Lehrstoffes auf ein praxisnahes Beispiel. Für ihre Lösung werden vielfach außer dem unmittelbar zuvor erläuterten Stoff auch Ergebnisse und Methoden vorhergehender Kapitel genutzt. Die Leser sollen bei der Bearbeitung dieser Aufgaben zunächst den prinzipiellen Lösungsweg festlegen und erst danach die Lösungsschritte nacheinander ausführen. Die Lösungen dieser Aufgaben sind im Anhang 1 angegeben.
- Aufgaben, die umfangreiche numerische Rechnungen erfordern und deshalb zweckmäßigerweise unter Verwendung von MATLAB gelöst werden sollten, sind durch das Symbol  gekennzeichnet.

1

Ziele und Aufgaben der Automatisierungstechnik

Das Einführungskapitel veranschaulicht anhand von Beispielen aus verschiedenen Anwendungsfeldern die Ziele und die grundlegenden Aufgaben der Automatisierungstechnik und erläutert die unterschiedlichen Informationskopplungen zwischen dem zu automatisierenden System und der Automatisierungseinrichtung, die für die Lösung von Automatisierungsaufgaben typisch sind.

1.1 Ziele der Automatisierungstechnik

Die Automatisierungstechnik beschäftigt sich mit der Überwachung und Steuerung technischer Systeme. Geräte und Anlagen sollen durch Automatisierungseinrichtungen so überwacht und gesteuert werden, dass sie ihre Funktionen weitgehend selbsttätig erfüllen und Sicherheitsanforderungen genügen. In Erweiterung dessen will man zukünftig sogar erreichen, dass automatisierte Systeme die aktuell zu erfüllenden Aufgaben selbstständig erkennen und daraus die auszuführenden Lösungsschritte ableiten, also autonom (ohne den Eingriff eines Menschen) arbeiten.

|| Es ist das Ziel der Automatisierungstechnik, Systeme so zu steuern, dass die automatisierten Systeme selbstständig ihre Funktion erfüllen.

Anschauliche Beispiele für autonom arbeitende Systeme sind Raumflugkörper, die ohne menschliche Hilfe Messaufgaben durchführen, ihre Position bestimmen und gegebenenfalls ihre Bewegung korrigieren. Fahrerlose Transportsysteme erkunden den Mars oder bewegen selbsttätig Werkstücke zu Fertigungseinrichtungen oder Wafer durch die Reinräume der Schaltkreisherstellung. In medizinischen Labors werden Serien von Proben ohne Eingriff eines Menschen analysiert und in der Fahrzeugindustrie schweißen mehrere Roboter gemeinsam eine Karosserie. Auch im täglichen Leben ist die Automatisierungstechnik allgegenwärtig, wenn auch nicht immer ohne Weiteres zu erkennen. Fotoapparate, Waschmaschinen, Videorecorder und viele andere Geräte enthalten komplizierte Regelungen und Steuerungen, durch die sie ihre Aufgaben weitgehend selbstständig lösen. Selbst wenn im Folgenden allgemein von technischen Anlagen gesprochen wird, sind auch solche Geräte in die Betrachtungen eingeschlossen.

Die Bedeutung der Automatisierungstechnik kann man am besten dadurch verstehen, dass man sich Anlagen ohne Steuereinrichtungen vorstellt. Ein Personenaufzug ohne Steuerung steht und reagiert nicht auf Fahrtwünsche, eine Rolltreppe schaltet sich nicht selbsttätig ein und aus, Temperatur und Luftfeuchtigkeit großer Räume werden nicht selbsttätig der wechselnden Außentemperatur, der Sonneneinstrahlung und der sich verändernden Anzahl anwesender Personen angepasst. Die Fahrzeugtechnik wäre auf dem Stand von Mitte des letzten Jahrhunderts ohne Antiblockiersysteme, geregelten Katalysator, Servolenkung und Klimaanlage. Nicht bei allen Beispielen führt die Automatisierung zu einer vollständig autonomen Arbeitsweise, aber in jedem Fall sorgt die Automatisierungstechnik dafür, dass die Anlage wichtige Teilprozesse selbsttätig ausführt.

Die Automatisierung übernimmt in allen genannten Systemen Überwachungs- und Steuerungsaufgaben:

- *Überwachen* heißt, die wichtigsten Prozessgrößen zu messen und die Messwerte zu sammeln, auszuwerten und für das Bedienpersonal in zweckmäßiger Weise darzustellen. Die Auswertung umfasst auch die Verknüpfung der Informationen, die von unterschiedlichen Sensoren kommen. Mit Hilfe eines Modells können nicht messbare Größen berechnet und Fehler aufgedeckt werden.
- *Steuern* heißt, Prozesse zielgerichtet zu beeinflussen. Die von außen vorgebbaren Größen werden so gewählt, dass die in der Anlage ablaufenden Prozesse in einer gewünschten Folge aktiviert oder wichtige Prozessgrößen trotz des Einwirkens von Störungen auf vorgeschriebenen Werten gehalten werden. Der Begriff Steuerung in seiner allgemeinen Bedeutung umfasst sowohl kontinuierlich wirkende als auch diskret arbeitende Steuerungen und er kann sich auch auf Steuereingriffe des Bedienpersonals beziehen.

Vereinfacht ausgedrückt heißt das:

|| Automatisieren = Überwachen + Steuern.

Dieses Buch beschäftigt sich mit den *Methoden*, die man kennen und anwenden muss, um technische Systeme durch mathematische Modelle zu beschreiben, die wichtigsten Eigenschaften herauszufinden, Automatisierungsaufgaben mit Hilfe dieser Modelle zu lösen und das Verhalten des Gesamtsystems, das aus dem zu steuernden Prozess und der Automatisierungsein-

richtung besteht, zu analysieren und zu bewerten. Diese Methoden sind das wichtigste *Know-how* der Automatisierungstechniker.

Daneben sind für die Lösung automatisierungstechnischer Aufgaben auch Automatisierungsgeräte wie Sensoren, Stellglieder (Aktoren), Rechner für die Echtzeitdatenverarbeitung und Programmmodule für die Realisierung einzelner Komponenten einer Automatisierungseinrichtung notwendig. Auf diese gerätetechnischen Fragen wird hier nur am Rande eingegangen.

Mechanisierung und Automatisierung. Wie der Name Automatisierungstechnik sagt, sollen die in einem Gerät oder einer Anlage ablaufenden Prozesse *automatisch*, also ohne Eingriff des Menschen, ablaufen. Häufig denkt man dabei an Tätigkeiten, die früher der Mensch *manuell* ausführen musste und die jetzt von Maschinen übernommen werden. Dabei muss man jedoch zwischen mechanisierten und automatisierten Prozessen unterscheiden. Um Tätigkeiten zu automatisieren, müssen zuerst Konstruktionen und Verfahren entworfen und realisiert werden, die die manuellen Tätigkeiten ersetzen. Dieser Schritt wird *Mechanisierung* genannt. Die entstehenden Maschinen ersetzen die körperliche Tätigkeit durch eine maschinelle, wobei nach einem Kommando der bisher durch Menschen erledigte Prozess selbsttätig abläuft. Die Steuereingriffe, die die Teilprozesse zum richtigen Zeitpunkt in Gang setzen, müssen bei mechanisierten Systemen allerdings weiterhin vom Menschen ausgeübt werden.

Darauf aufbauend sorgt die Automatisierung für die *selbsttätige Steuerung* von Anlagen, die die mechanisierten Teilprozesse aktiviert und überwacht. Damit wird die zur Steuerung notwendige *geistige* Tätigkeit einem technischen Gerät übertragen. Aus dieser Sicht besteht die Automatisierung also in der Schaffung und Anwendung von technischen Mitteln, mit deren Hilfe mechanisierte Operationen nach vorgegebenen Programmen selbsttätig gesteuert werden.

Beispiel 1.1 Waschautomat

Die Schritte der Mechanisierung und der Automatisierung werden offensichtlich, wenn man das Wäschewaschen per Hand durch eine Waschmaschine erleichtern will. Dass sich die Trommel mit der Wäsche dreht, Wasser in die Waschmaschine hineingelassen und wieder abgepumpt wird und das Wasser gegebenenfalls auf eine vorgegebene Temperatur erhitzt wird, ist das Ergebnis einer Mechanisierung. Frühe Formen von Waschmaschinen, die damals bereits mit der Bezeichnung „Waschautomat“ verkauft wurden, führten diese mechanisierten Prozesse durch, aber die Prozesse mussten von der Hausfrau an- und abgeschaltet werden.

Dieses An- und Abschalten übernimmt bei modernen Waschautomaten die eingebaute Automatisierungseinrichtung. Sie sorgt dafür, dass ein richtiger „Waschautomat“ die gewünschten Prozesse in der programmierten Reihenfolge und mit der gewünschten Dauer ausführt. Für Wäsche unterschiedlicher Art kann man zwischen verschiedenen Waschprogrammen wählen. Dabei wird nicht die Mechanisierung des Waschprozesses verändert, sondern das Automatisierungsziel und folglich die Steuerung der mechanisierten Teilprozesse.

Die Automatisierung erfordert i. Allg. den Einbau neuer Sensoren, mit denen der Fortschritt der aktivierten Prozesse gemessen wird. Beim Waschautomat muss beispielsweise mit Hilfe eines Temperatursensors festgestellt werden, wann die Waschlauge die richtige Temperatur besitzt, oder mit einer Uhr gemessen werden, wie lange der Waschprozess bereits andauert. □

Aufgabe 1.1 *Automatisches Anfahren am Berg*

Jeder Fahrschüler weiß, wie schwierig es für Anfänger ist, mit einem Fahrzeug am Berg anzufahren, ohne anfangs zurückzurollen. Kupplung, Gaspedal und Handbremse müssen dabei in genau abgestimmter Weise betätigt werden.

Welche Schritte der Mechanisierung und der Automatisierung muss man ausführen, damit das Fahrzeug automatisch am Berg anfahren kann, so dass der Fahrer nur noch das Gaspedal zu betätigen braucht? Kann man ein Fahrzeug mit Handbremse automatisch anfahren? Welche zusätzlichen Sensoren sind notwendig?

Zur weiteren Automatisierung soll bei dem Fahrzeug die Kofferraumklappe automatisch abgeschlossen werden, wenn die Fahrgäste eingestiegen sind und das Fahrzeug anfährt. Welche Mechanisierungs- und Automatisierungsschritte sind hierfür durchzuführen? □

1.2 Anwendungsbeispiele

1.2.1 Prozessautomatisierung

Die Realisierung verfahrenstechnischer Prozesse beinhaltet vielfältige Automatisierungsaufgaben, so dass für dieses Gebiet ein eigener Begriff geprägt wurde: Prozessautomatisierung. Die Palette der zu lösenden Aufgaben beginnt bei der Informationsgewinnung, -übertragung und -aufbereitung für das Bedienpersonal in der Warte einer großen verfahrenstechnischen Anlage und führt über die Realisierung von Durchfluss-, Temperatur- oder Füllstandsregelungen bis zu Rezeptsteuerungen, mit denen Batchprozesse realisiert werden. Darüber hinaus kann die Automatisierungseinrichtung auch die Produktionsplanung übernehmen.

Die Verfahrenstechnik ist eines der ältesten Anwendungsgebiete der Automatisierungstechnik, denn hier werden automatische Steuerungs- und Überwachungseinrichtungen bereits seit etwa 1960 in breitem Umfang genutzt.

Kontinuierliche Prozesse. Viele verfahrenstechnische Prozesse laufen kontinuierlich ab. Drücke, Temperaturen, Konzentrationen, Durchflüsse, pH-Werte usw. müssen kontinuierlich überwacht und konstant gehalten oder in einer vorgeschriebenen Weise verändert werden. Dafür sind an industriellen Anlagen typischerweise hunderte von Regelkreisen installiert.

Bei der Betrachtung dieser Automatisierungsaufgaben sind vier Signaltypen wichtig:

- *Regelgröße:* Die Größe, die auf einem vorgegebenen Wert gehalten werden soll, wird Regelgröße genannt und mit dem Symbol y bezeichnet. So ist bei einer Temperaturregelung die Temperatur die Regelgröße, bei einer Füllstandsregelung der Füllstand usw.
- *Stellgröße:* Um ihre Aufgabe erfüllen zu können, muss die Regeleinrichtung eine Eingangsgröße des Prozesses so verändern, dass die Regelgröße den vorgegebenen Wert annimmt. Diese Eingangsgröße heißt Stellgröße u .
- *Führungsgröße:* Der gewünschte Verlauf der Regelgröße wird durch ein Signal w vorgegeben, das Führungsgröße heißt. w kann konstant sein oder sich zeitlich ändern. Im ersten

Falle spricht man bei w auch von einem *Sollwert*. In beiden Fällen besteht das Regelungsziel in der Erfüllung der Forderung $y(t) \stackrel{!}{=} w(t)$. Um dies zu erfüllen, erhalten Regler die *Regelabweichung* $e(t) = w(t) - y(t)$ als Eingangsgröße und sollen die Stellgröße so bestimmen, dass die Regelabweichung asymptotisch verschwindet.

- *Störgröße*: Abweichungen zwischen der Regelgröße und der Führungsgröße werden durch nicht beeinflussbare äußere Störungen hervorgerufen, die durch das Signal d dargestellt werden. Bei der Füllstandsregelung ist beispielsweise die Entnahme von Flüssigkeit aus einem Behälter die Störung.

Diese Signaltypen treten auch bei diskreten Prozessen auf.

Beispiel 1.2 Temperatur- und Füllstandsregelung eines Reaktors

Als Beispiel zeigt Abb. 1.1 einen Reaktor, dessen Aufgabe darin besteht, Flüssigkeit mit einer vorgegebenen Solltemperatur für die weitere Verarbeitung bereitzustellen. Die Flüssigkeit kann bei Bedarf durch das untere Ventil entnommen werden, wodurch der Reaktorfüllstand verkleinert („gestört“) wird. Der Reaktor ist mit einer Füllstandsregelung (LC – level control) ausgerüstet, die das obere Ventil öffnet, damit der Reaktor stets bis zu einer vorgegebenen Höhe gefüllt ist. Die Temperaturregelung (TC – temperature control) greift auf das Ventil zu, das den Dampfstrom durch die Heizung dosiert. Ihre Funktion ist es, die Temperatur konstant zu halten.

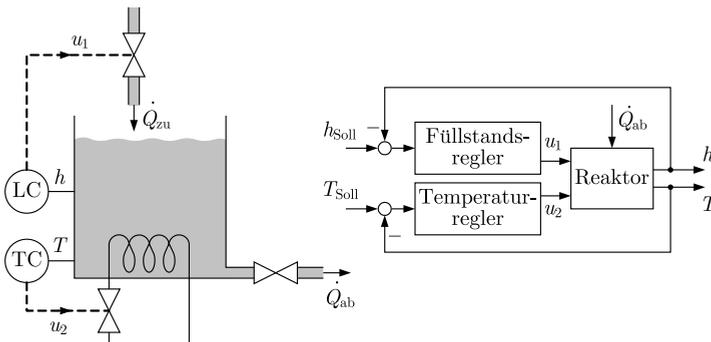


Abb. 1.1: Füllstands- und Temperaturregelung eines Reaktors

Die Funktionsweise der Regelung ist in dem rechts angegebenen Blockschaltbild zu sehen, in dem der Reaktor durch einen Block mit den beiden Ventilstellungen als Stellgrößen u_1 und u_2 , der Füllhöhe h und der Temperatur T als Regelgrößen sowie dem Flüssigkeitsstrom \dot{Q}_{ab} als Störgröße zu sehen ist. Die gemessenen Istwerte für die Füllhöhe und die Temperatur werden mit den vorgegebenen Sollwerten h_{Soll} bzw. T_{Soll} verglichen. Die erhaltenen Differenzen dienen als Eingangsgrößen für die beiden Regler, die die Ventilstellungen vorgeben.

Kennzeichnend für die Regelung sind die im Blockschaltbild erkennbaren Rückführungen. Der gemessene Temperaturwert T beeinflusst den Temperaturregler, der die Ventilstellung u_2 vorgibt und damit auf die Temperatur T zurückwirkt. Derartige Rückführungen sind ein wichtiges Hilfsmittel der Automatisierungstechnik in allen Anwendungsbereichen. Sie treten in vielfältiger Form in diesem Buch auf.

Die Regelungen des Füllstands und der Temperatur können getrennt voneinander aufgebaut werden, weil sich beide Größen zwar gegenseitig beeinflussen, dieser Einfluss die Funktionsweise der getrennten Regelungen jedoch nicht gefährdet. Die Regelung besteht also aus zwei unabhängigen Regelkreisen und wird deshalb als *dezentrale Regelung* bezeichnet. □

Batchprozesse. Eine andere Klasse verfahrenstechnischer Anlagen realisiert Batchprozesse, bei denen Stoffe in bestimmten Mengen in Apparate eingefüllt werden, dort eine bestimmte Zeit verbleiben, dabei chemisch reagieren oder mechanisch bearbeitet werden und schließlich in nachfolgende Apparate fließen. Die Automatisierung derartiger Prozesse erfolgt durch diskrete Steuerungen, die im Unterschied zu kontinuierlichen Steuerungen mit diskreten, häufig binären Mess- und Stellgrößen arbeiten und beispielsweise Ventile (vollständig) öffnen und schließen oder Heizungen oder Mühlen an- und abschalten.

Auch bezüglich des Zeitverhaltens gibt es grundlegende Unterschiede zwischen diskreten und kontinuierlichen Steuerungen. Während im kontinuierlichen Regelkreis Ist- und Sollwert der Regelgröße fortwährend miteinander verglichen und die Stellgröße in Abhängigkeit von dem dabei erhaltenen Ergebnis fortwährend verändert wird, arbeitet eine diskrete Steuerung nur zu den Zeitpunkten, an denen eine Messgröße das Erreichen eines vorgegebenen Grenzwertes signalisiert. Zwischen diesen Zeitpunkten sind die Stellgrößen konstant. Nichtsdestotrotz wirkt auch eine diskrete Steuerung im geschlossenen Wirkungskreis. Wenn dieser Aspekt hervorgehoben werden soll, wird auch bei diskreten Systemen von einer Regelung gesprochen.

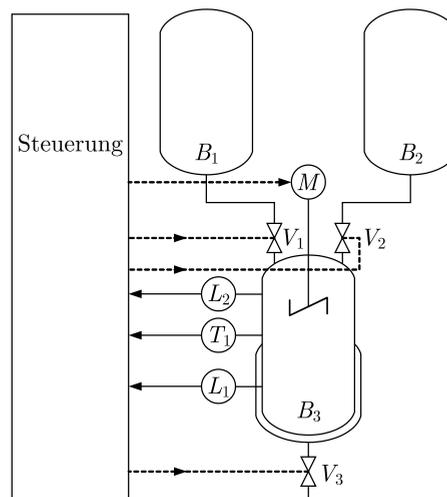


Abb. 1.2: Batchprozess

Beispiel 1.3 Steuerung eines Batchprozesses

Abbildung 1.2 zeigt das R&I-Fließbild (Rohrleitungs- & Instrumentenfließbild) für einen Batchprozess, der aus drei Behältern besteht, die durch zwei Rohrleitungen verbunden sind. V_1 , V_2 und V_3 bezeichnen drei Ventile und M den Motor, der einen Rührer antreibt. Ein verfahrenstechnisches Rezept sieht folgende Schritte vor:

1. Es wird Flüssigkeit aus dem Behälter B_1 in den leeren Behälter B_3 bis zu der vom Sensor L_1 überwachten Füllhöhe gefüllt.
2. Es wird Flüssigkeit aus dem Behälter B_2 in den Behälter B_3 bis zur Füllhöhe L_2 zugeführt.
3. Der Rührer wird angeschaltet.
4. Das Gemisch wird auf eine vorgegebene Temperatur T_{Soll} erhitzt.
5. Der Rührer wird abgeschaltet.
6. Das Produkt wird durch Öffnen des Ventils V_3 abgezogen.

Es ist offensichtlich, dass zur Durchführung dieses Rezepts nur diskrete Grenzwerte für die Füllstände bzw. die Temperatur überwacht werden müssen und dass nur diskrete Stellgrößen (Ventil auf/zu; Heizung an/aus; Rührermotor an/aus) durch die Steuereinrichtung vorzugeben sind. Insofern unterscheidet sich die hier betrachtete Regelung von den im Beispiel 1.2 behandelten Regelungen, bei denen alle Größen wertkontinuierlich waren.

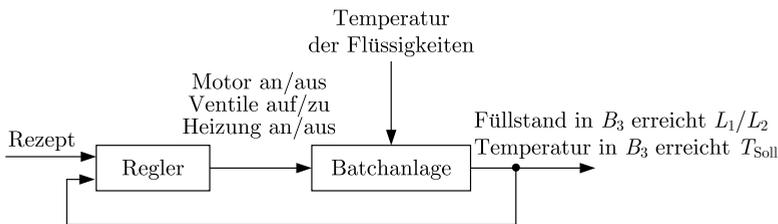


Abb. 1.3: Blockschaltbild des gesteuerten Batchprozesses

Strukturell sind diskrete Steuerungsaufgaben jedoch den vorher betrachteten Regelungsaufgaben sehr ähnlich (Abb. 1.3). Auch hier werden die gemessenen Größen durch einen Regler verarbeitet, um die Eingangsgrößen des Prozesses geeignet festzulegen. Das Steuerungsziel ist durch das Rezept als eine Folge von Prozessschritten vorgegeben. Der Vorgang wird durch Störgrößen beeinflusst, z. B. durch veränderte Temperaturen der in den Behältern B_1 und B_2 vorgelegten Flüssigkeiten. Im Unterschied zur kontinuierlichen Temperaturregelung reagiert die hier betrachtete Regelung aber nur zu den Zeitpunkten, zu denen die Messgrößen das Erreichen vorgegebener Grenzwerte für die Temperatur und den Füllstand anzeigen. □

Kontinuierliche Prozesse und Batchprozesse gehören zu den beiden sich in ihrem Verhalten grundlegend unterscheidenden Klassen der wertkontinuierlichen bzw. der ereignisdiskreten Systeme. Diesen beiden Klassen ist jeweils etwa die Hälfte dieses Buches gewidmet.

Schutzeinrichtungen. Die bisher behandelten Steuerungen und Regelungen werden zusammen mit Komponenten für die Informationsbereitstellung in der Warte zur MSR-Betriebseinrichtung zusammengefasst (MSR – Messen, Steuern, Regeln). Getrennt davon verfügen verfahrenstechnische Anlagen über eine MSR-Schutzeinrichtung, die unzulässige Anlagenzustände verhindert und die Anlage im Gefahrenfall abschaltet.

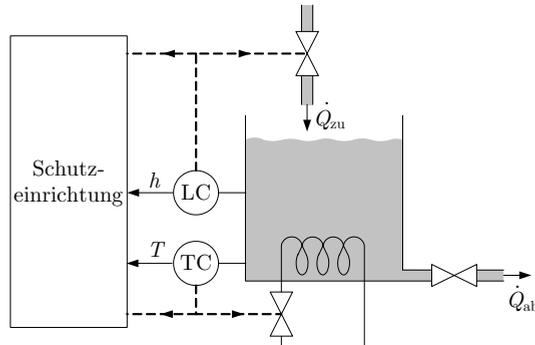


Abb. 1.4: Steuerung und Aggregateschutz eines Batchprozesses

Die aus Sicherheitsgründen vorgenommene Trennung von Betriebs- und Schutzeinrichtungen ist in Abb. 1.4 zu sehen, in der die Reaktorregelung aus Abb. 1.1 um eine Schutzeinrichtung erweitert wurde. Die Schutzeinrichtung überwacht den Füllstand h und die Temperatur T und verändert im Fehlerfalle die von den beiden Regelungen an die Ventile gesendeten Stellinformationen. So wird beispielsweise beim Überschreiten eines oberen Grenzwertes für die Temperatur das Ventil der Heizung durch die Schutzeinrichtung geschlossen.

Prozessleittechnik. Neben der Realisierung von Steuerungen und Regelungen hat die Automatisierungseinrichtung auch die Aufgabe, die für die Überwachung des bestimmungsgemäßen Betriebs der Anlage durch das Bedienpersonal notwendigen Informationen in die Warte zu übertragen, auszuwerten und darzustellen. Außerdem müssen die Stellbefehle auf dem entgegengesetzten Weg von der Warte zu den Stellgliedern der Anlage übermittelt werden. Damit stellt die Automatisierungseinrichtung auch die Schnittstelle zwischen der Anlage und dem Bedienpersonal dar und schafft die Voraussetzung dafür, dass der Mensch die Anlage führen kann. Die dafür erforderliche Gerätetechnik wird als Prozessleittechnik oder Prozessleitsystem bezeichnet. Diese Begriffe sind abgeleitet vom Begriff leiten, der die Gesamtheit aller Maßnahmen bezeichnet, die einen erwünschten Ablauf eines Prozesses bewirken.

Die Prozessleittechnik schließt das weite Feld der Mensch-Maschine-Kommunikation ein, das sich mit der zweckmäßigen Darstellung der Informationen auf Bildschirmen sowie mit Geräten für die Eingabe manueller Steuerungsbefehle befasst.

Die hier genannten Begriffe wurden zunächst für die Automatisierung von Prozessen der Verfahrenstechnik und Energietechnik eingeführt. Sie sind jetzt jedoch auch in vielen der im Weiteren behandelten Anwendungsbereiche gebräuchlich.

1.2.2 Fertigungsautomatisierung

Die Automatisierung ist ein unverzichtbares Element moderner Fertigungssysteme. Sie überwacht und steuert die Bewegung von Werkzeugmaschinen und Robotern.

Als eigenständiges Gebiet hat sich die Fertigungsautomatisierung wesentlich später als die Prozessautomatisierung herausgebildet. Der Grund dafür war vor allem die Tatsache, dass die Rechentechnik erst zwischen 1970 und 1980 einen solchen Stand erreichte, dass sie die zahlreichen Mess- und Stellgrößen fertigungstechnischer Anlagen in Echtzeit verarbeiten konnte. Deshalb sind noch heute viele Begriffe der Automatisierungstechnik stärker durch die Prozessautomatisierung geprägt als durch die Fertigungsautomatisierung.

Neben einer Qualitätserhöhung und der Verkürzung der Fertigungszeiten führt die Automatisierung von Fertigungsprozessen auch zu einer Erhöhung der Flexibilität. Unterschiedliche Produkte lassen sich auf denselben Werkzeugmaschinen fertigen, weil lediglich die Steuerungsalgorithmen ausgetauscht werden müssen.

Auch die Einsatzplanung der Werkzeugmaschinen ist eine Automatisierungsaufgabe. Sie betrifft den Werkstückfluss von Maschine zu Maschine, der so geplant wird, dass die Maschinen gut ausgelastet sind. Das Ergebnis der Einsatzplanung passt dann die Steuerungen der einzelnen Werkzeugmaschinen an die geplanten Aufträge an. Da alle Elemente der Fertigung mit einer durchgängigen Datenverwaltung arbeiten, spricht man von einer rechnerintegrierten Fertigung (CIM – *computer-integrated manufacturing*).

Materialflusssysteme. Die Fertigungstechnik umfasst vielfältige Systeme zur Lagerung, zum Transport, zur Kommissionierung und zur Verpackung von Gütern. Zu diesen Systemen gehören Hochregallager, fahrerlose Transportsysteme und automatisch arbeitende Förder- und Lagereinrichtungen. Hier kommt es bei der Automatisierung vor allem auf Steuerungsstrategien an, die eine kurze Durchlaufzeit, Termintreue und geringe Lagerbestände sichern. Die Anforderungen an die Steuerung dieser Systeme gehen deshalb aus einer detaillierten Planung hervor, bei der die einzelnen Transportschritte in eine zeitliche Reihenfolge gebracht werden, wobei die beschränkte Kapazität der Transport- und Lagertechnik ebenso zu beachten ist wie der Fertigungsplan.

Beispiel 1.4 *Transportsysteme in der Schaltkreisfertigung*

Bei der Schaltkreisfertigung durchlaufen die Wafer eine Vielzahl von Bearbeitungsschritten, bei denen sie mehrfach hintereinander maskiert, dotiert und schließlich zerschnitten, geprüft und gebondet werden. Den wiederholten gleichartigen Bearbeitungsschritten entsprechend durchlaufen die Wafer bestimmte Maschinen mehrfach, wofür ein Transportsystem alle Maschinen untereinander verbindet. Eine wichtige Automatisierungsaufgabe besteht in der Steuerung und Überwachung dieses Transportsystems.

Da der Transport nicht zeitkritisch ist, kann man diese Automatisierungsaufgabe mit diskreten Modellvorstellungen lösen. Die Position und der Inhalt eines Transportbehälters werden zur Beschreibung des aktuellen Zustands des Transportsystems herangezogen. Eine Zustandsänderung beschreibt die Bewegung der Behälter zwischen den Abzweigen der Transportbahn und den Maschinen. Beim Entwurf des Transportsystems und bei der Überwachung und Steuerung sind u. a. die folgenden Aufgaben zu lösen:

- Analyse der mit dem Transportsystem realisierbaren Quelle-Ziel-Beziehungen: Sind alle erforderlichen Transportwege durch eine geeignete Steuerung realisierbar?
- Belastungsanalyse: Gibt es Zweige, die unter normalen Fertigungsbedingungen überlastet sind?
- Steuerung: Wie müssen die Transportbehälter gesteuert werden, damit alle Bereiche der Fertigung gleichmäßig ausgelastet sind?
- Fehlerdiagnose: Ist im Transportsystem ein Fehler aufgetreten, so dass Transportbehälter nicht die gewünschten Ziele erreichen?
- Rekonfiguration: Wie kann das Transportsystem unter Umgehung eines durch Fehler blockierten Bereiches so gesteuert werden, dass die Fertigung weitergeht? □

1.2.3 Gebäudeautomatisierung

Der Betrieb von Gebäuden stellt für die Automatisierungstechnik vielfältige Aufgaben. Um das Klima in großen Räumen angenehm zu gestalten, muss die Raumtemperatur auf einem konstanten Wert gehalten, eine angemessene Luftfeuchtigkeit erzeugt und für genügend Frischluft gesorgt werden, ohne dass durch den Luftaustausch eine unangenehme Luftbewegung entsteht. Ferner müssen Fahrstühle gesteuert, die Beleuchtung der Räume und Treppenhäuser überwacht und der Zugang zu Gebäuden kontrolliert werden.

Beispiel 1.5 Raumtemperaturregelung

Die Aufgaben der Gebäudeautomatisierung beziehen sich nicht nur auf große Gebäude, sondern treten auch im Haushalt auf. Abbildung 1.5 zeigt das technologische Schema der Temperaturregelung eines Raumes. Die Raumtemperatur wird durch den mit TC (*temperature control*) bezeichneten Regler gemessen und mit dem vorgegebenen Sollwert verglichen. In Abhängigkeit von der Differenz zwischen Soll- und Isttemperatur wird der Brenner für eine längere oder kürzere Zeitdauer angeschaltet.

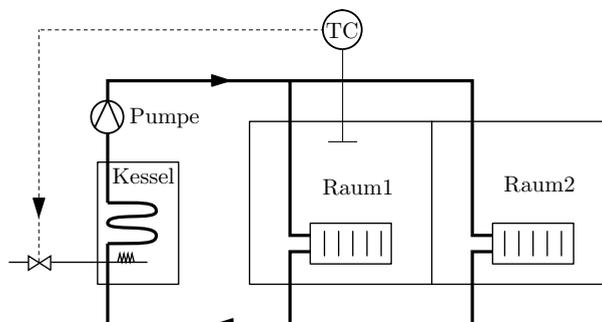


Abb. 1.5: Raumtemperaturregelung

Man braucht eine solche Regelung, weil sich die Raumtemperatur auf Grund von Sonneneinstrahlung, Frischluftzufuhr oder der Anwesenheit einer unterschiedlichen Zahl von Personen verändert, was zusammen als Störung bezeichnet wird. Durch die Regelung kann die Temperatur annähernd konstant auf dem vorgegebenen Sollwert gehalten werden.

Für die spätere Behandlung kontinuierlicher und diskreter Systeme ist es interessant zu sehen, dass bei einer Raumtemperaturregelung beide Signalarten gleichzeitig auftreten. Die Raumtemperatur verändert sich kontinuierlich, aber der Brenner kann nur diskret geschaltet werden. Man kann jedoch eine einheitlich kontinuierliche Betrachtung dadurch einführen, dass man die Brennerleistung über einen bestimmten Zeitraum mittelt, wodurch sie einen kontinuierlichen Verlauf erhält.

Dieser Temperaturregelung übergeordnet ist die Festlegung des Sollwertes der Raumtemperatur. Aus Gründen der Energieeinsparung arbeitet man nicht mit konstanten Sollwerten, sondern legt in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Räume einen Tagesgang fest, demzufolge die Solltemperatur in den Nachtstunden tiefer als am Tag liegt.

Bei großen Gebäuden werden die wichtigsten Daten in eine Warte übertragen, so dass das Gebäude dort manuell oder automatisch überwacht werden kann. □

1.2.4 Überwachung und Steuerung von Energiesystemen

Energiesysteme versorgen eine große Anzahl von Abnehmern mit elektrischem Strom, Gas oder Wärme. Sie sind vernetzte Systeme, in denen mehrere Automatisierungsaufgaben gleichzeitig durch eine Vielzahl dezentraler und zentraler Automatisierungseinrichtungen zu lösen sind. Die elektrische Spannung und Frequenz, Gasdrücke und Durchflüsse, Vorlauftemperaturen von Wärmeversorgungssystemen und viele weitere Größen sind durch Regelungen von der Energieentnahme und von Störungen unabhängig konstant zu halten. Der Einsatz von Energieerzeugern ist zu planen und die Netze mit einer der voraussichtlichen Belastung angepassten Struktur zu betreiben. Um diese Steuerungsentscheidungen treffen zu können, muss das Bedienpersonal mit umfangreichen Informationen versorgt werden.

Energieversorgungssysteme sind ein anschauliches Beispiel für kooperierende Systeme. Eine sichere Stromversorgung kann nur durch das Zusammenwirken vieler Erzeuger erreicht werden, so dass bei unvorhersehbaren Verbrauchsänderungen bzw. Erzeugungsausfällen das kurzzeitige Energiedefizit auf viele Teilsysteme verteilt und durch diese ausgeglichen werden kann.

Beispiel 1.6 Überwachung und Steuerung von Elektroenergienetzen

Das in Abb. 1.6 dargestellte Elektroenergienetz zeigt mit den in der Energietechnik üblichen Symbolen ein Netz mit vier Generatoren G_i , die in unterschiedlichen Knoten Energie in das Verteilungsnetz einspeisen. Diese Energie wird durch das Netz über die dargestellten Leitungen zu fünf Verbrauchern L_i transportiert. Auf Grund der geografischen Lage der Energieerzeuger und der Verbraucher erfolgt in dem gezeigten Netz vorrangig ein Energiefluss von links nach rechts.

Energienetze müssen eine sichere und ausreichende Versorgung der Abnehmer mit Elektroenergie gewährleisten. Trotz wechselnder Belastung muss die Energie für den Verbraucher mit konstanter Spannung (230 V) und konstanter Frequenz (50 Hz) zur Verfügung stehen. Diese Zielstellung kann nur dann erreicht werden, wenn eine Regelung dafür sorgt, dass die erzeugte Leistung ständig der verbrauchten Leistung angepasst wird.

Diese Regelung realisiert jedoch nur die unterste Ebene einer hierarchisch gegliederten Automatisierungseinrichtung. Durch die höheren Ebenen muss erreicht werden, dass die Energie in der richtigen Menge am richtigen Ort erzeugt wird, um über das Verteilungsnetz zu den Verbrauchern geleitet zu werden. Die Planungskomponente liefert dafür eine Lastvorhersage (Tagesgang), die den zeitlichen Verlauf des Leistungsbedarfs für einen oder mehrere Tage im Voraus beschreibt. Dies ist die Grundlage für

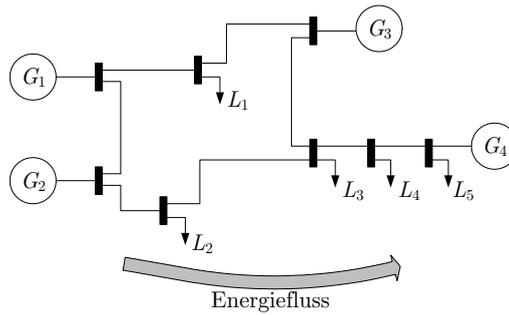


Abb. 1.6: Energiefluss in einem Elektroenergieverteilungsnetz

die Einsatzplanung, die den Bedarf für die Energieerzeugung und den Verlauf der Einspeisespannungen so festlegt, dass keine Übertragungsleitung überlastet wird und dass das Gesamtsystem in einem wirtschaftlich günstigen Arbeitspunkt arbeitet. Mit der Liberalisierung des Energiemarktes muss außerdem erreicht werden, dass die Energieflüsse im Netz die vertraglich gebundenen und sich zeitlich stark ändernden Energietransporte realisieren. Als Ergebnis entstehen die Sollwerte für die unterlagerten Spannungsregelkreise. □

1.2.5 Automatisierungstechnik in Fahrzeugen

Moderne Fahrzeuge sind mit einer Vielzahl von Mikrorechnern ausgestattet, deren wichtigste Funktionen die Überwachung und Steuerung der Fahrzeugkomponenten betreffen. Mess- und Stellinformationen werden über umfangreiche Kabelbäume bzw. durch Bussysteme zwischen den Fahrzeugkomponenten und den Steuergeräten übertragen. Dabei ersetzen elektrische Signale frühere mechanische Kopplungen, so dass man von „Brake-by-wire“- oder „Steer-by-wire“-Systemen spricht.

Beispiel 1.7 Aufgaben der Motorsteuerung

Welche große Bedeutung die Automatisierungstechnik für den technologischen Wandel besitzt, soll am Beispiel der Motorsteuerung erläutert werden. Moderne Motoren sind mit einer Vielzahl von Sensoren und Aktoren ausgerüstet. Der vom Fahrer vorgegebene Gaspedalwinkel gibt das gewünschte Drehmoment an, das im Steuergerät des Motors unter Berücksichtigung von Emission, Komfort und Verbrauch in die erforderliche Einspritzmenge des Kraftstoffes umgerechnet wird (Aufg. 2.2 auf S. 59).

Der Fortschritt, der durch eine Direkteinspritzung von Kraftstoff in Verbindung mit einer automatischen Steuerung gegenüber der früher eingesetzten mechanischen Steuerung erreicht werden kann, wird aus folgender Überlegung offensichtlich. Bei alten Fahrzeugen wurde das Ansaugventil des Zylinders über Hebel mechanisch durch die Kurbelwelle geöffnet und geschlossen. Dadurch öffneten und schlossen sich die Ventile bei jeder Drehzahl an demselben Kurbelwellenwinkel. Da sich bei Dieselmotoren das Luft-Kraftstoffgemisch selbstständig mit einem näherungsweise konstanten Zündverzug entzündet, die Kurbelwelle aber in Abhängigkeit von der Drehzahl in dieser Zeitspanne eine unterschiedliche Winkeländerung ausführt, beginnt die Verbrennung bei der mechanischen Steuerung je nach Drehzahl bei unterschiedlichen Kurbelwellenwinkeln und man kann keinen für alle Drehzahlen geltenden optimalen

Zündzeitpunkt einstellen. Im Unterschied dazu kann mit einer elektronischen Steuerung der Beginn und das Ende des Einspritzens von Kraftstoff der Drehzahl, dem gewünschten Drehmoment sowie der Motortemperatur angepasst werden, wodurch ein wesentlich höherer Wirkungsgrad und darüber hinaus eine geringere Schadstoffemission erreicht werden.

Weitere Komponenten der Motorsteuerung legen den Ladedruck, die Abgasrückführung und die Leerlaufdrehzahl fest. □

Sicherheitsfunktionen. Wichtige Sicherheitseinrichtungen in modernen Fahrzeugen sind nur durch eine automatische Steuerung möglich. Zu den bekanntesten Komponenten gehören das Antiblockiersystem (ABS) (siehe Beispiel 7.7 und Aufgabe 11.23), die Antriebsschlupfregelung, die Fahrdynamikregelung, das elektronische Stabilisierungsprogramm (ESP) sowie die aktive Federung. Moderne Autos verfügen darüber hinaus über Geschwindigkeitsregler und überwachen den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Beispiel 1.8 *Bremsassistent und Antiblockiersystem*

Wie kompliziert die Informationsverarbeitung bei sicherheitskritischen Funktionen sein kann, soll am Beispiel des Bremssystems erläutert werden. Elektronisch gesteuerte Bremssysteme sollen einerseits die Wirksamkeit der Bremse verbessern, um in Notsituationen eine größere Sicherheitsreserve zu schaffen, andererseits ein Blockieren der Räder verhindern. Während bei konventionellen Bremsen die Fußkraft auf dem Bremspedal über einen Bremskraftverstärker an die Bremsen übertragen wird, baut ein elektronischer Bremsassistent schon am Beginn des Bremsvorgangs in Sekundenbruchteilen die maximale Bremskraft auf und verkürzt dadurch den Anhalteweg.

Um diese Funktion erfüllen zu können, muss das System den Fahrerwunsch zu bremsen erkennen. Aus der Geschwindigkeit, mit der das Bremspedal heruntergedrückt wird, wird auch die Stärke, mit der der Fahrer bremsen möchte, vorausberechnet. Wenn diese Stärke einen bestimmten Grenzwert überschreitet, wird eine Notbremsung erkannt und die Bremse unabhängig von der Fußkraft auf dem Bremspedal mit maximaler Bremskraft betätigt. Der Bremsassistent unterstützt den Fahrer also dadurch, dass er einen höheren Druck in der Bremsanlage erzeugt, als es der Pedalkraft des Fahrers entspricht.

Die maximal mögliche Bremswirkung ist durch den Kontakt der Reifen und der Fahrbahn begrenzt. Deshalb werden Antiblockiersysteme verwendet, die ein Blockieren der Räder dadurch verhindern, dass sie die vom Fahrer ausgeübte und gegebenenfalls durch einen Bremsassistenten verstärkte Bremskraft auf einen den aktuellen Straßenbedingungen angepassten Maximalwert beschränken. Das schwierigste dabei zu lösende Problem entsteht aus der Tatsache, dass sich die Straßenbedingungen nicht messtechnisch erfassen lassen, denn es gibt weder für das aktuelle Wetter noch für die Beschaffenheit der Straßenoberfläche einen geeigneten Sensor. Deshalb muss von der Reaktion des Rades unter dem Einfluss einer bestimmten Bremskraft auf die Straßenbedingungen geschlossen werden. Trotz ABS kann die Bremskraft die maximal mögliche überschreiten und das Rad blockieren, weil das ABS erst nach einem Blockieren des Rades die aktuellen Straßenverhältnisse erkennt und dann angemessen reagieren kann. □

1.2.6 Überwachung und Steuerung des Flugverkehrs

Bei der Überwachung und Steuerung des Flugverkehrs wirken viele unterschiedliche Komponenten zusammen. Abbildung 1.7 zeigt die hierarchische Struktur, in der die Flugplanung und -sicherung die Bewegung der einzelnen Flugzeuge koordiniert. Durch die Flugplanung werden für einen geografisch großen Bereich Flugkorridore für bestimmte Flüge freigegeben. Die Flugsicherung überwacht die Nutzung dieser Flugkorridore durch die einzelnen Maschinen und koordiniert die Bewegung von Flugzeugen, die sich in demselben Gebiet bewegen. Den Flugzeugen wird in Abhängigkeit von der Position und dem Ziel aller Flugzeuge in diesem Gebiet der Kurs vorgegeben.

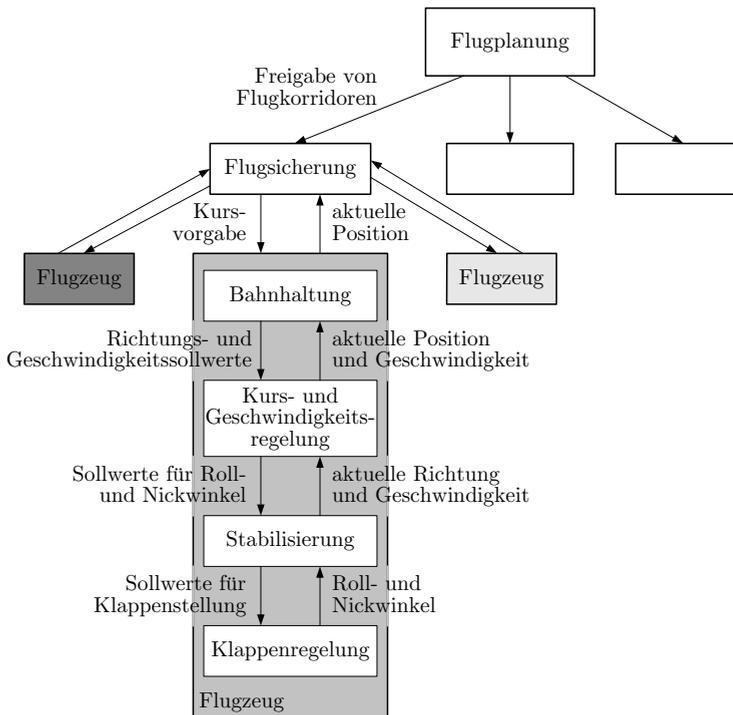


Abb. 1.7: Hierarchischer Aufbau der Überwachung und Steuerung des Flugverkehrs

Der Kurs bestimmt die Flughöhe und die Flugrichtung, die mit Hilfe geeigneter Steuerungseingriffe des Piloten und des Autopiloten eingehalten werden müssen. Dafür sind in der Abbildung Steuerungen auf vier Hierarchieebenen eingezeichnet, bei der die in der Hierarchie jeweils höher angeordnete Steuerung der untergeordneten die Sollwerte vorgibt. Es entstehen Wirkungskreise, die in der Abbildung aus jeweils zwei Blöcken bestehen und untereinander mit den anderen Wirkungskreisen verkoppelt sind. So wirkt die Regelung, die das Flugzeug in der Luft stabilisiert, auf die Klappenregelung ein, indem sie dieser Regelung Sollwerte für die

aktuelle Klappenposition vorgibt. In Gegenrichtung beeinflusst die Klappenregelung durch die mit der Klappenstellung verbundene Bewegung des Flugzeugs im Raum die Regelung für die Stabilisierung.

Die in der Abbildung gezeigten Hierarchieebenen unterscheiden sich bezüglich der auf ihnen zu lösenden Aufgaben. Neben den Unterschieden bezüglich der technischen Hintergründe dieser Aufgaben ist eine auch für andere Anwendungen der Automatisierungstechnik charakteristische Tendenz zu beobachten: Wenn man die Hierarchieebene von unten nach oben durchläuft, werden die Überwachungs- und Steuerungsziele globaler und die Zeithorizonte, in denen die Steuerung reagieren muss, länger. So muss die Klappenregelung im Millisekundentakt die Stellung der Klappen kontrollieren und dem gegebenen Sollwert anpassen. Demgegenüber beschäftigt sich die Flugsicherung mit der Position der Flugzeuge im Minutentakt.

Menschen sind an mehreren Stellen in die Automatisierung des Flugverkehrs eingebunden. Sie haben vor allem Aufgaben zu übernehmen, deren Ziele sich zeitlich stark ändern bzw. von der aktuellen Situation des Flugverkehrs abhängen und sich deshalb nicht ohne Weiteres automatisieren lassen. Beispielsweise fliegen Flugzeuge heute vollautomatisch, nachdem sie ihre endgültige Flughöhe erreicht haben. Der Pilot beschäftigt sich dann nur noch mit der Überwachung des Fluges. Allerdings übernimmt er bei der Landung die Steuerung des Flugzeugs selbst, auch wenn heute große Flugzeuge vollautomatisch landen könnten.

1.2.7 Automatisierungsaufgaben in der Informations- und Kommunikationstechnik

Die Übertragung von Informationen unterschiedlichen Typs wie Bilder, Sprache und Texte über Kommunikationsnetze mit vielen Sendern und Empfängern und ständig wechselnden Sender-Empfänger-Zuordnungen umfasst viele steuerungstechnische Fragestellungen. In ATM-Netzen (*asynchronous transfer mode net*) wie beispielsweise dem Internet werden Datenpakete fester Größe von Knoten zu Knoten weitergeleitet, wobei sie in jedem Verzweigungsknoten in eine Warteschlange eingereiht werden, aus dem das jeweils erste Paket in Richtung zum Adressaten weitergeleitet wird. Durch eine geeignete Steuerung soll erreicht werden, dass die Netzkapazität möglichst gut ausgenutzt wird. Dafür müssen die Warteschlangen bis in die Nähe ihrer physikalischen Begrenzung genutzt werden, aber es muss gleichzeitig verhindert werden, dass sie überlaufen und Datenpakete verloren gehen. Um dies zu erreichen, muss eine Steuerung die aktuellen Warteschlangenlängen auswerten und die Datenströme an den Quellen gegebenenfalls begrenzen. Das Attribut „asynchron“ in der Bezeichnung ATM-Netz bezieht sich auf die Tatsache, dass die Datenpakete die Leitungen nicht synchronisiert, sondern in einer von den sendenden Rechnern bestimmten Folge nutzen, was für die Steuerung besondere Schwierigkeiten mit sich bringt.

Neben dem mit hoher Priorität vermittelten Datenverkehr, der eine gesicherte Mindestrate besitzt, gibt es einen Datenverkehr, der die restliche verfügbare Kapazität nutzt: *Available bit rate (ABR) service*. Hier hängt die Senderate von der verfügbaren Bandbreite ab. Die ABR-Dienste werden deshalb genutzt, um den Datenverkehr im Netz im Sinne vorgegebener Qualitätskenngrößen (*quality of service (QoS)*) für den maximalen Datenverlust oder die maximale Verzögerungszeit bei der Übertragung zu steuern. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Steuerung ist die Fairness, derzufolge alle Sender in angemessener Weise an der Nutzung der verfügbaren Übertragungskapazität beteiligt werden sollen.

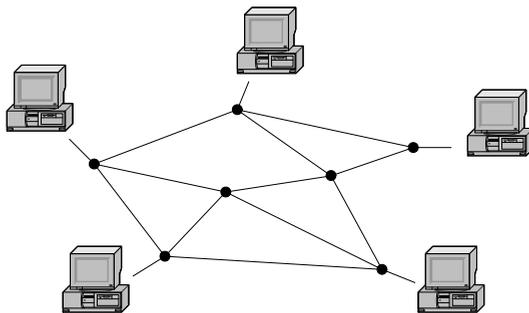


Abb. 1.8: Datenverbindungen über ein ATM-Netz

Die Steuerung nutzt die Tatsache, dass die Datenverbindungen stets bidirektional aufgebaut werden, obwohl die Datenpakete nur in der Richtung vom Sender zum Empfänger zu transportieren sind. Zwischen die Datenpakete eingefügte RM-Zellen (*resource management-Zellen*) laufen vom Sender zum Empfänger und zurück zum Sender. In diese Pakete können Informationen über die maximale Senderate eingeschrieben werden. Knoten, deren Warteschlange die zulässige Größe überschreitet, berechnen maximale Raten, mit denen diejenigen Sender senden dürfen, deren Datenpakete zu diesen Knoten übertragen werden.

Obwohl diese Art der Steuerung in ATM-Netzen standardisiert ist, ist die Erarbeitung geeigneter Steuerungsalgorithmen ein nach wie vor nicht vollständig geklärtes Problem. Diese Algorithmen müssen Komponenten enthalten, durch die der aktuelle Netzzustand aus den an den Knoten verfügbaren Daten geschätzt und eine Bitrate berechnet wird, für die das Netz gut ausgelastet ist, ohne dass die Gefahr des Datenverlustes besteht (Aufg. 3.4).

1.2.8 Zusammenfassung: Notwendigkeit der Automatisierung technischer Systeme

Die Beispiele haben gezeigt, dass die Automatisierungstechnik vielfältige Ziele erfüllen soll, diese jedoch im Wesentlichen den folgenden zwei Gruppen zugeordnet werden können:

- *Der Mensch soll durch eine Automatisierungseinrichtung ersetzt werden.*

Dies soll nicht nur die Sehnsucht der Menschen erfüllen, dass sich Aufgaben „von selbst“ erledigen, sondern den Menschen auch in gefährlichen Situationen, bei schwierigen oder ermüdenden Aufgaben, in nicht erreichbaren oder weit entfernten Orten ersetzen oder Anlagen automatisch steuern, weil der Mensch dazu gar nicht in der Lage wäre. In der zuletzt genannten Situation ist die Automatisierungseinrichtung also *funktionsnotwendig*, denn ein Mensch würde zu langsam oder zu ungenau reagieren. Beispiele sind die Positionierung des Schreibkopfes auf der Festplatte, die Steuerung des Laserstrahls bei der Herstellung integrierter Schaltkreise, die genaue Einstellung des Luftspaltes zwischen dem Fahrzeug und dem Fahrweg beim Transrapid oder die Realisierung mehrerer verkoppelter Regelkreise in verfahrenstechnischen Anlagen mit schnell ablaufenden chemischen Reaktionen, die der Mensch in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht überschauen kann.

Zu dieser Gruppe von Aufgaben gehören viele Regelkreise, durch die wichtige Prozessgrößen auf konstanten Werten gehalten werden, durch die also beispielsweise die Kühlertem-

peratur oder die Zimmertemperatur gegenüber äußeren Störungen unabhängig gemacht wird, der Fahrstuhl ohne Fahrstuhlführer fährt oder Flugzeuge auf Langstreckenflügen selbsttätig auf dem vorgegebenen Kurs gehalten werden. Diese Prozesse könnte ein Mensch steuern, aber dies wäre für den Betreffenden langweilig und ermüdend und würde darüber hinaus den Betrieb der Anlage verteuern. Zu dieser Gruppe gehören Automatisierungsaufgaben, die aus der Forderung abgeleitet sind, dass Geräte oder Anlagen so autonom arbeiten sollen, dass sie auch von Unkundigen benutzt werden können. Die Waschmaschine oder der heimische CD-Spieler sind Beispielsysteme, die weitgehend autonom arbeiten, nachdem ihrer Steuerung durch wenige Handgriffe die Zielvorgaben mitgeteilt wurden.

- *Automatisierungseinrichtungen sollen die Zuverlässigkeit, Sicherheit und Präzision einer Anlage erhöhen und die Produktionskosten senken.*

Die Anlage soll unabhängig von menschlichen Fehlern arbeiten. Diese Automatisierungseinrichtungen sind *güteverbessernd*, auch im Sinne von Sicherheits- oder Umweltvorschriften.

Bei dieser Aufgabengruppe soll die Automatisierungseinrichtung zusätzliche Kriterien erfüllen, die in der heutigen Zeit vor allem aus Sicherheits- oder Umweltschutzvorschriften resultieren oder die Genauigkeit gegenüber einer manuell geführten Produktion erhöhen und die Kosten senken. Hierzu gehören viele Sicherheitsvorkehrungen. Ein Auto kann ohne Antiblockiersystem gefahren werden, aber mit einem solchen System ist es sicherer. Die Verbesserung der Anlage durch eine Automatisierungseinrichtung kann auch bedeuten, dass die Flexibilität bezüglich einer Produktumstellung erhöht wird. Eine Umstellung auf neue Aufgaben bedeutet dann nicht einen Umbau der Anlage, sondern im Wesentlichen nur eine Änderung der Steuerungssoftware.

Die große Bedeutung, die die automatische Überwachung und Steuerung für die Funktion technischer Anlagen hat, wird oft übersehen. Wer denkt schon beim Besteigen eines Flugzeugs als erstes an die Servoregelungen der Klappen und nicht an die mechanische Konstruktion? Auch beim Autokauf spielen Aussehen und Motorleistung eine wichtigere Rolle als die Leistungsfähigkeit des Antiblockiersystems, zumal man dessen Wirkung selten spürt. Die Automatisierung wirkt also oft im Verborgenen, was sehr treffend mit dem englischen Begriff *hidden technology* beschrieben wird. Aufgrund dieser Tatsache wird häufig verkannt, dass entscheidende Fortschritte in allen technologischen Bereichen ohne die Automatisierungstechnik unmöglich wären und der Automatisierungsgrad technischer Systeme ständig steigt.

Wirtschaftliche Ziele der Automatisierung. Die genannten Automatisierungsziele wurden aus technischer Sicht formuliert. Es ist offensichtlich, dass diese Ziele unmittelbare betriebswirtschaftliche Wirkungen haben, u. a. die Einsparung von Personalkosten, Material, Energie und Herstellungszeit, die Steigerung der Quantität und Qualität der Produkte sowie die Erhöhung der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Lebensdauer der Anlage. Damit trägt die Automatisierung entscheidend zur Erfüllung globaler Ziele wie der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens, der Steigerung der Energieeffizienz oder der Verbesserung des Umweltschutzes bei. In der industriellen Produktion sind es häufig diese Argumente, die die Automatisierung der Anlagen vorantreiben.

1.3 Grundstruktur automatisierter Systeme

1.3.1 Beziehungen zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem zu automatisierenden Prozess

Die im Abschn. 1.2 aufgeführten Beispiele zeigen, dass bei der Lösung von Automatisierungsaufgaben stets mit derselben Grundstruktur gearbeitet wird. Entsprechend Abb. 1.9 besteht ein automatisiertes System aus zwei Komponenten: dem zu automatisierenden Prozess und der Automatisierungseinrichtung. Das zu automatisierende System wird häufig einfach als Prozess oder auch als System bezeichnet oder, wenn es sich um Regelungs- oder Steuerungsaufgaben handelt, als Regelstrecke bzw. Steuerstrecke. Die Automatisierungseinrichtung heißt auch Automatisierungssystem, bei Regelungs- oder Steuerungsaufgaben auch Regeleinrichtung oder Regler bzw. Steuereinrichtung, Steuerung oder, wenn die technische Realisierung betont werden soll, Steuergerät. Andererseits gebraucht man die Begriffe der Regelung und Steuerung nicht nur für den Teil der Automatisierungseinrichtung, der aus den Messgrößen die Steuerbefehle erzeugt, sondern auch für die Vorgänge des Regelns und des Steuerns, bei denen sowohl die Regelstrecke bzw. Steuerstrecke und der Regler bzw. die Steuereinrichtung beteiligt sind. Die zusammengehörigen Begriffe werden im Folgenden synonym gebraucht, wobei aber bei Beispielen die in den betrachteten Anwendungsgebieten geläufigen Begriffe bevorzugt verwendet werden.

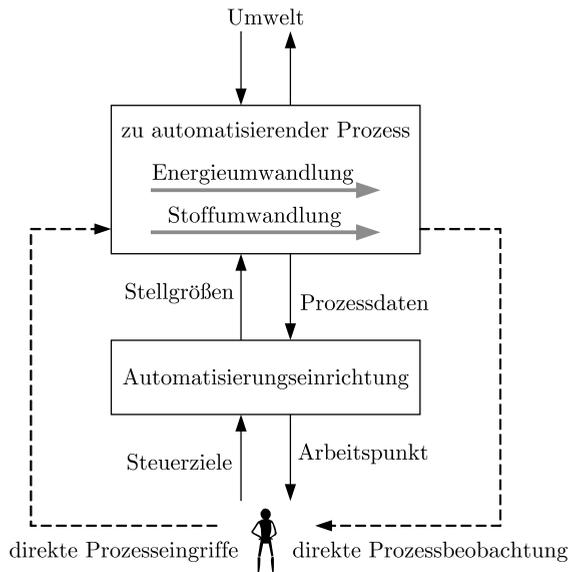


Abb. 1.9: Grundstruktur automatisierter Systeme

In dem zu automatisierenden Prozess wird Energie oder Materie umgewandelt, was man sich leicht an einem Kraftwerksblock oder einer Werkzeugmaschine vorstellen kann. Für die

Automatisierungseinrichtung sind nicht diese Prozesse im Einzelnen, sondern nur die Informationen interessant, die diese Prozesse beschreiben. Einerseits werden Prozessdaten, also insbesondere *Messwerte* von wichtigen Prozessgrößen, an die Automatisierungseinrichtung übertragen. In anderer Richtung wirkt die Automatisierungseinrichtung auf den Prozess durch *Stellgrößen* ein, die beispielsweise eine Ventilstellung verändern oder einen Motor schalten.

Eine wichtige Charakteristik der Automatisierungstechnik wird aus dieser Grundstruktur offensichtlich:

Mit den Methoden der Automatisierungstechnik werden nicht nur gegebene technische Systeme analysiert, sondern es wird eine neue Komponente geschaffen, die das System überwacht und steuert.

Da sich in der gezeigten Grundstruktur das gesteuerte System und das steuernde System gegenseitig beeinflussen, können Systemeigenschaften entstehen, die die beiden Teilsysteme allein nicht besitzen. Die wichtigste Grundlage dafür ist die *Informationsrückkopplung*, die zwischen beiden Komponenten besteht. Dieser Informationskreislauf bringt neue Systemeigenschaften hervor, ohne dass die im gesteuerten System ablaufenden Wirkungsmechanismen verändert werden. Das Automatisierungsobjekt wird also nicht „umkonstruiert“, sondern von außen so beeinflusst, dass es ein vorgegebenes Verhalten zeigt. So kann durch einen Regler ein instabiles System stabilisiert werden und es können die dynamischen Eigenschaften einer Anlage wesentlich verändert werden.

Diese Tatsache weist auch darauf hin, dass man das Verhalten eines automatisierten Systems nicht allein aus den Eigenschaften der gesteuerten Anlage und der Automatisierungseinrichtung erklären kann, sondern sich die Analyse stets auf das Gesamtsystem beziehen muss.

1.3.2 Das Rückkopplungsprinzip

Das wichtigste Grundprinzip der Automatisierungstechnik besteht in der Schaffung von Rückkopplungen (Abb. 1.10). In der Grundstruktur automatisierter Systeme gibt es zwei Rückkopplungen, die das zu automatisierende System mit der Automatisierungseinrichtung bzw. die Automatisierungseinrichtung mit dem menschlichen Operator verbindet.

Durch den oberen Kreis werden Informationen, die im Prozess durch Sensoren erfasst werden, über die Automatisierungseinrichtung an den Prozess zurückgekoppelt. Die Stellgrößen beeinflussen das Prozessverhalten und damit auch die Prozessdaten, mit deren Hilfe die nächsten Stellgrößen berechnet werden. Diese Rückkopplung läuft vollautomatisch ab. Sie ist im kontinuierlichen Regelkreis fortwährend wirksam, während sie im diskreten Regelkreis nur zu den Zeitpunkten aktiv ist, an denen die Prozessdaten eine Änderung der diskreten Ausgangsgröße anzeigen.

Der untere Kreis entsteht durch die Eingriffe des Menschen, der das Prozessverhalten bewertet und daraus Steuerungsentscheidungen ableitet. Diese Rückkopplung wirkt nur zu den unregelmäßigen Zeitpunkten, an denen der Mensch in den Prozess eingreift.

Beide Rückkopplungen unterscheiden sich vor allem bezüglich der Informationen, auf die sie sich beziehen, und bezüglich der Geschwindigkeit, mit der beide Kreise wirksam sind. Der automatisch wirkende Kreis arbeitet vor allem mit den numerischen oder binären Mess- und

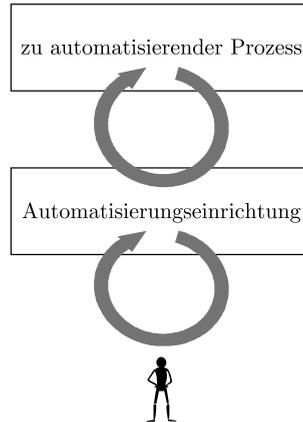


Abb. 1.10: Zwei Arten von Rückkopplungen in automatisierten Systemen

Stellgrößen im Millisekunden bis Minutentakt, während die Rückkopplung über das Bedienpersonal auf einer höheren Abstraktionsebene und in größeren Zeitabständen erfolgt. Dort spielen vor allem eine globale Beschreibung des aktuellen Betriebszustands und globale Steuerungsziele eine wichtige Rolle.

Viele Methoden der Automatisierungstechnik beruhen auf dem Verständnis von Rückkopplungsstrukturen. Derartige Strukturen werden in vielfältiger Form in den folgenden Kapiteln behandelt.

Beispiel 1.9 Aktive Federung

Ein bekanntes Beispiel aus der Fahrzeugtechnik, das wichtige Eigenschaften automatisierter Systeme illustriert, ist die aktive Federung. Während man bei einer mechanischen Federung die Fahreigenschaften des Fahrzeugs nur durch eine konstruktive Veränderung beeinflussen kann, lassen sich die Fahreigenschaften bei einer aktiven Federung durch die Veränderung von Parametern der elektronischen Steuerung der aktuellen Fahrsituation anpassen.

Bei der aktiven Federung wird der Öldruck, der die Federwirkung beeinflusst, über ein Ventil gesteuert. Durch Messung des Abstandes des Fahrzeugaufbaus von der Straßenoberfläche kennt man das aktuelle Fahrverhalten und kann durch geeignete Verstellung des Ventils die Fahrzeugbewegung innerhalb der durch die Konstruktion vorgegebenen Randbedingungen stark verändern. Statt das Fahrzeug umzukonstruieren, wird das Fahrverhalten durch eine Rückführsteuerung beeinflusst. Fahrzeuge, bei denen man während der Fahrt zwischen einem sportlichen und einem komfortablen Fahrwerk wählen kann, verändern ihre Eigenschaften auf diese Weise. □

1.3.3 Die Rolle des Menschen in automatisierten Systemen

Nur in seltenen Fällen übernimmt die Automatisierungseinrichtung die Steuerung einer Anlage vollständig und der Mensch wird für den Betrieb der Anlage nicht mehr gebraucht. Viel häufiger läuft die Automatisierung auf eine Arbeitsteilung hinaus, bei der wichtige Teilprozesse automatisch ablaufen und der Mensch den Gesamtprozess nach übergeordneten Gesichtspunkten

wie Effektivität oder Sicherheit führt. Beispielsweise wird die Automatisierung des Kraftfahrzeugs auch auf lange Sicht den Fahrer nicht ersetzen, jedoch das Steuerungsobjekt „Fahrzeug“ in seinen Eigenschaften verbessern. In der verfahrenstechnischen Industrie gibt es hunderte von Regelkreisen, aber die Gesamtanlage wird von menschlichen Operateuren gesteuert, die in einer Warte mit allen notwendigen Informationen versorgt werden und die die Anlage überwachen und entsprechend der aktuellen Produktionsziele beeinflussen.

Um diesen Unterschied zwischen der Tätigkeit des Menschen und der Automatisierungseinrichtung hervorzuheben, macht man (vor allem in der Prozessautomatisierung) auch begriffliche Unterschiede:

- Tätigkeiten der Automatisierungseinrichtung werden als überwachen, alarmieren, melden, steuern, regeln oder optimieren bezeichnet,
- Tätigkeiten des menschlichen Operators als leiten, führen oder bedienen.

Außer den bisher betrachteten Informationskopplungen kann es in einzelnen Anlagen direkte Verbindungen zwischen der Anlage und dem Operator geben, beispielsweise, wenn sich der Anlagenfahrer vor Ort ein Bild von der Anlage verschafft und dabei über die durch Prozessdaten vermittelten Informationen hinausgehende Informationen „sieht, riecht oder hört“. Auch kann er vor Ort an Stellhebeln oder Ventilen direkt auf den Prozess einwirken. Diese Möglichkeiten sind zwar stets vorhanden; sie werden jedoch i. Allg. nur in Havariesituationen genutzt und sollen im Weiteren nicht betrachtet werden.

1.3.4 Spezielle Klassen automatisierter Systeme

Reaktive und eingebettete Systeme. Die angegebene Grundstruktur automatisierter Systeme findet man auch in angrenzenden Fachgebieten, in denen jedoch meist mit anderen Begriffen gearbeitet wird. Der in der Informatik gebräuchliche Begriff des *reaktiven Systems* (rückwirkendes System) beschreibt eine Automatisierungseinrichtung, denn man versteht darunter einen Rechner, der auf die von einem physikalischen Prozess erzeugten Ereignisse reagiert und auf diesen Prozess zurückwirkt. An Stelle von Prozessdaten spricht man bei reaktiven Systemen von Ereignissen, an Stelle von Stellgrößen von Aktionen.

Eng damit verwandt ist der Begriff der *eingebetteten Systeme*, mit dem man Rechner bezeichnet, die auf ihre Umgebung reagieren, also die durch die Umgebung vorgegebenen Aufgaben lösen und die Ergebnisse an die Umgebung übermitteln. Automatisierungseinrichtungen sind eingebettete Systeme, wie man aus den entsprechenden Blockschaltbildern erkennt. Sie müssen unter Echtzeitbedingungen arbeiten und Störungen wie z. B. Messrauschen berücksichtigen.

Für die Vernetzung physikalischer Prozesse mit Automatisierungseinrichtungen, durch die beispielsweise Sensordaten oder Stellgrößen übertragen werden, werden seit langer Zeit Bussysteme eingesetzt. Die technologische Entwicklung erlaubt gegenwärtig auch die Verwendung von Funknetzen, mit Hilfe derer neue Automatisierungsaufgaben realisiert werden können. So kann die Überwachung des Autobahnverkehrs mit Hilfe von Einzelfahrzeugdaten, die von Fahrzeugen über Funkverbindungen zur Verkehrsleitzentrale übertragen werden, zu wesentlich besseren Ergebnissen führen als die alleinige Verwendung der Daten ortsfester Sensoren. Das

Gebiet der *vernetzten Regelungssysteme* beschäftigt sich mit Fragen, die die Echtzeitfähigkeit dieser Informationsverbindungen bzw. die aufgabenabhängige Nutzung von Kommunikationsnetzen für Automatisierungsaufgaben betreffen.

Zukünftig wird die digitale Vernetzung weiter zunehmen und zu sogenannten *Cyber-physical systems* führen. Der Cyber-Teil besteht aus den eingebetteten Systemen, die durch globale Netze verbunden sind, der physikalische Teil aus den zu steuernden und zu überwachenden Prozessen.

Mechatronische Systeme. Das Gebiet der *Mechatronik* hat eng mit der hier beschriebenen Grundstruktur automatisierter Systeme zu tun, denn in diesem Gebiet werden mechanische Systeme mit elektronischen Systemen so weit verknüpft, dass sie nicht nur gemeinsam entworfen, sondern auch gemeinsam technisch realisiert werden. Die elektronischen Systeme übernehmen dabei auch die Steuerungsfunktionen.

Viele Beispiele findet man in der Fahrzeugtechnik, wo Regelkreise durch direkte Verbindungen von Sensoren und Aktoren „vor Ort“ (und nicht in externen Steuergeräten) realisiert werden. Bei intelligenten Einzelantrieben müssen Drehmomente bzw. Kräfte für Einzelbewegungen unter Nutzung elektromagnetischer Prinzipien aufgebaut werden, wofür die Steuerung bestimmte Ströme bzw. Spannungen vorschreibt und diese Größen beim Einwirken von Störungen so verändert, dass die gewünschten Drehmoment- oder Positionswerte eingehalten werden.

Mechatronische Systeme bestehen deshalb aus mechanischen Komponenten, die mit elektronischen Einheiten funktionell und konstruktiv integriert sind. Der Begriff der Mechatronik fasst die Verknüpfung der drei beteiligten Disziplinen zusammen: die Mechanik für den konstruktiven Aufbau des Systems, die Automatisierungstechnik für die Festlegung der zu realisierenden Steuerungsmethode und die Elektronik für die Realisierung von Steuerungen.

Aufgabe 1.2* *Automatisierungstechnik im täglichen Leben*

Überlegen Sie sich, welche Funktionen die Steuergeräte in den folgenden Geräten oder Anlagen haben und welche Funktionen manuell ausgeführt werden müssten, wenn es diese Steuergeräte nicht gäbe. Wäre ein Betrieb ohne automatischer Steuerung überhaupt möglich?

1. Verkaufsautomat für Fahrkarten, Bankautomat
2. Videorekorder, Digitalkamera
3. Waschmaschine
4. Heizungsanlage
5. Kopiergerät
6. Spielautomat.

Welche Funktionen, die heute noch nicht automatisiert sind, sollte oder könnte man in Zukunft automatisieren? Welche Voraussetzungen fehlen heute, um diese Funktionen zu automatisieren? □

Aufgabe 1.3* *Automatikoaster und andere automatische Geräte*

Inwiefern arbeitet ein Automatikoaster „automatisch“? Was haben eine automatische Schranke der Eisenbahn, der Kaffeeautomat, das Automatikgetriebe im Fahrzeug und eine automatische Klimaanlage mit Automatisierungstechnik zu tun? □

Aufgabe 1.4 *Rezeptsteuerung in der Bäckerei*

Schreiben Sie in Form eines Programmablaufplanes auf, welche Prozesse der Steuerungsalgorithmus eines Backautomaten einleiten muss, um Kuchen herzustellen. Welche Informationen (Messwerte) muss die Steuerung auswerten, um den Zeitpunkt erkennen zu können, an dem der nächste Prozessschritt eingeleitet werden muss? □

1.4 Automatisierungsaufgaben

Die Vielfalt der Anwendungsgebiete der Automatisierungstechnik lässt zunächst vermuten, dass für jedes dieser Gebiete spezielle Steuerungs- und Überwachungsmethoden entwickelt worden sind und ein Automatisierungstechniker alle diese Methoden erlernen muss. Diese Vermutung ist (glücklicherweise) falsch. Da es möglich ist, die grundlegenden automatisierungstechnischen Fragestellungen weitgehend losgelöst von der konkreten technischen Anwendung aus einer systemtheoretischen Sicht zu formulieren, kann man für sie Methoden entwickeln, die nicht nur in einem, sondern in mehreren Anwendungsgebieten gleichzeitig anwendbar sind. NORBERT WIENER¹ hat deshalb für die Steuerungstheorie den Begriff *Kybernetik* geprägt, der im Griechischen soviel wie die „Kunst des Steuerns“ heißt. WIENER hat auch darauf hingewiesen, dass diese Methoden nicht nur für technische, sondern auch für biologische Systeme gelten und dass man Steuerungsprinzipien der Biologie in die Technik übertragen kann. Für die Automatisierung technischer Prozesse gebraucht man deshalb auch den Begriff *Technische Kybernetik*.

Grundlage für diese allgemeine Theorie ist die systemtheoretische Betrachtung, die in den nachfolgenden Kapiteln eingeführt und erläutert wird. Bei dieser Betrachtung wird von den Stoff- und Energieflüssen abstrahiert und der Prozess einheitlich durch die das Prozessgeschehen beschreibenden Informationsflüsse dargestellt. Die Prozesskomponenten werden deshalb als Blöcke und die Signale durch Pfeile symbolisiert. Dabei entstehen die in der Automatisierungstechnik weit verbreiteten Blockschaltbilder (Kap. 2).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Grundaufgaben der Automatisierungstechnik anhand einfacher Blockschaltbilder erläutert, in denen wie in Abb. 1.9 das zu steuernde System stets oben und die zum Automatisierungssystem gehörenden Komponenten unten angeordnet sind. Die einzelnen Aufgaben unterscheiden sich in der Art der verwendeten Informationen, in der Richtung des Informationsflusses sowie in der Art und Weise, wie Modelle des zu steuernden Prozesses genutzt werden.

1.4.1 Modellbildung dynamischer Systeme

Grundlage für die Lösung von Automatisierungsaufgaben ist ein dynamisches Modell des zu automatisierenden Prozesses. Dieses Modell soll das Prozessverhalten unter der Wirkung aller Einflussgrößen beschreiben (Abb. 1.11):

Man unterscheidet folgende Signaltypen:

¹ NORBERT WIENER (1894 – 1964), amerikanischer Mathematiker

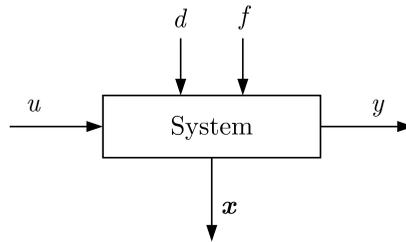


Abb. 1.11: Definition der an einem Prozess wirkenden Signale

- **Stellgrößen** $u(t)$ sind diejenigen Eingangssignale, deren Verlauf durch das Automatisierungssystem oder den menschlichen Operator festgelegt werden kann, um das Prozessverhalten zielgerichtet zu beeinflussen.
- **Störgrößen** $d(t)$ sind Eingangssignale, über die die Umwelt den Prozess beeinflusst. Sie können möglicherweise gemessen, aber nicht vom Automatisierungssystem beeinflusst werden.
- **Fehler** $f(t)$ sind innere Veränderungen, die als Eingangssignale interpretiert werden. Sie bewirken unzulässige Abweichungen des Prozessverhaltens vom Nominalverhalten. Im Unterschied zu den gleichfalls nicht beeinflussbaren Störsignalen haben Fehler typischerweise größere, bleibende Wirkungen, die nicht durch eine Regelung ausgeglichen werden können.
- **Zustandsgrößen** $x_i(t)$ kennzeichnen diejenigen inneren Prozesssignale, die für eine eindeutige Vorhersage des zukünftigen Verhaltens bekannt sein müssen. Der Systemzustand ist i . Allg. nicht messbar, obwohl mehrere oder alle Zustandsgrößen die messbare Ausgangsgröße y beeinflussen. Der Zustand eines dynamischen Systems ist ein Vektor x , der alle Zustandsgrößen x_i enthält.
- **Ausgangsgrößen** $y(t)$ sind die (häufig messbaren) Signale, über die der Prozess von außen beobachtet werden kann und über die der Prozess seine Umgebung beeinflusst.

Obwohl bei den meisten Automatisierungsaufgaben jeweils mehrere Signale desselben Typs auftreten, können die grundlegenden Fragestellungen und Methoden anhand von Systemen erläutert werden, bei denen nur wenige Signale vorhanden sind. Es werden häufig Eingrößensysteme betrachtet, die lediglich eine Stellgröße $u(t)$ und eine Ausgangsgröße $y(t)$ besitzen. Bei größeren Systemen können alle Stellsignale zu einem Vektor $u(t)$ und alle Ausgangssignale zum Vektor $y(t)$ zusammengefasst werden. Der Zustand $x(t)$ ist auch bei „kleinen“ Systemen i . Allg. ein Vektor.

Die hier für die Signale eingeführten Symbole sind diejenigen, die später für wertkontinuierliche Größen gebraucht werden. Für wertdiskrete Signale werden andere Symbole verwendet, nämlich für den Eingang v , den Ausgang w , den Zustand z , den Fehler e und die Störung p . Die nachfolgenden Betrachtungen gelten jedoch für beide Systemklassen gleichermaßen, auch

wenn der Übersichtlichkeit wegen nur die für kontinuierliche Systeme eingeführten Symbole benutzt werden.

Modellbildung. Als Modellbildung (oder Modellierung) bezeichnet man die Schritte, durch die man für ein technisches System ein dynamisches Modell aufstellt. Für die meisten Automatisierungsaufgaben ist dies der erste Lösungsschritt, weshalb das Thema Modellbildung im Gebiet der Automatisierungstechnik eine sehr große Bedeutung hat. Prinzipiell unterscheidet man zwei Wege: die theoretische Prozessanalyse und die experimentelle Prozessanalyse (oder Identifikation).

Bei der *theoretischen Prozessanalyse* wird das Modell durch das Aufschreiben der physikalischen Beziehungen erhalten, die in dem betrachteten System gelten. Bei kontinuierlichen Systemen entsteht dabei eine Menge von algebraischen Gleichungen und Differentialgleichungen, die man zu einer Differentialgleichung mit den Größen $u(t)$ und $y(t)$ oder zu einem Zustandsraummodell zusammenfassen kann. Die dafür notwendigen Modellbildungsschritte werden ausführlich im Kap. 3 behandelt.

Bei diskreten Systemen führt die Modellbildung auf Automaten oder Petrinetze. Dabei geben die in dem System wirkenden physikalischen Gesetze ebenfalls Hinweise darauf, aus welchen Komponenten das Modell aufgebaut ist, aber es gibt für die meisten Systeme keinen direkten Zusammenhang zwischen den physikalischen Gesetzen und den diskreten Zustandsübergängen des Automaten bzw. des Petrinetzes. Die Modellbildung diskreter Systeme wird im Kap. 11 erläutert.

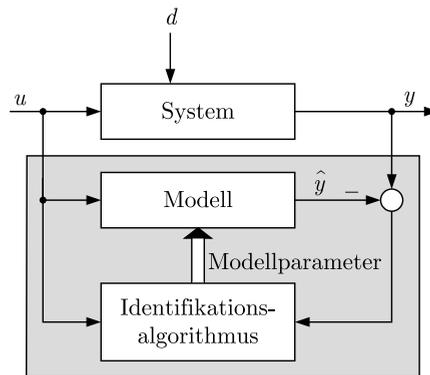


Abb. 1.12: Identifikation dynamischer Systeme

Bei der *Identifikation* macht man für das Modell einen Ansatz, bei dem man beispielsweise annimmt, dass das betrachtete System durch eine Differentialgleichung vierter Ordnung beschrieben wird. Die Koeffizienten der Differentialgleichung werden dann aus Messreihen für $u(t)$ und $y(t)$ ermittelt. Voraussetzung dafür ist, dass man mit dem System Experimente durchführen kann. Das prinzipielle Vorgehen bei der Identifikation kann man sich so vorstellen, dass ein Identifikationsalgorithmus die Modellparameter solange verändert, bis die Dif-

ferenz $y(t) - \hat{y}(t)$ zwischen dem gemessenen Systemausgang y und dem Modellausgang \hat{y} (näherungsweise) verschwindet (Abb. 1.12).

Die Identifikation ist für kontinuierliche Systeme ein sehr gut ausgearbeitetes Gebiet der Automatisierungstechnik, auf das hier nicht eingegangen werden kann. Es wird lediglich im Abschn. 4.4 auf die Methode der Kennwertermittlung hingewiesen, mit der aus Experimentdaten die Parameter eines sehr einfachen Modells ermittelt werden.

Bei beiden Arten der Modellbildung kommt es darauf an, die physikalischen Vorgänge in dem zu automatisierenden System systemtheoretisch zu beschreiben. Das heißt, dass von den physikalischen Vorgängen abstrahiert und der Informationsfluss durch das System mathematisch erfasst wird. Dabei ist eine theoretische Prozessanalyse bereits bei der Planung einer Anlage möglich, die experimentelle Prozessanalyse jedoch erst nach der Inbetriebnahme, wobei sie vor allem für die Verbesserung der Modellgenauigkeit bzw. für die Anpassung der Modelle an veränderte Anlagenparameter eine besondere Bedeutung hat.

1.4.2 Vorhersage des Systemverhaltens

Grundlage vieler Automatisierungsfunktionen ist die Vorhersage (Prädiktion) des zukünftigen Systemverhaltens. Für den über ein Zeitintervall $[0, t_e]$ gegebenen Verlauf der Eingangsgröße u , der mit $u_{[0, t_e]}$ bezeichnet wird, soll der Verlauf $y_{[0, t_e]}$ der Ausgangsgröße über dasselbe Zeitintervall bestimmt werden. Wie Abb. 1.13 zeigt, ist dafür auch die Kenntnis des Systemzustands x zu Beginn des Vorhersageintervalls ($t = 0$) erforderlich. Es ist außerdem aus dem Blockschaltbild erkennbar, dass die Vorhersage nur dann zutreffen kann, wenn die Störung d hinreichend klein ist, denn diese nicht messbare Einflussgröße des Systems kann bei der Vorhersage nicht berücksichtigt werden.

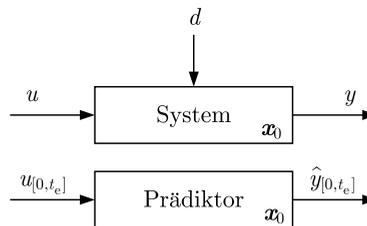


Abb. 1.13: Vorhersage des Systemverhaltens

Vorhersageaufgaben werden einerseits beim Entwurf einer Steuerung gelöst, um die Wirkung des ausgewählten Steuerungsalgorithmus auf den Prozess zu bewerten. Dabei wird die Vorhersageaufgabe vor der Inbetriebnahme der Steuerung (offline) für den Zeithorizont $[0, t_e]$ betrachtet. Es besteht keine Informationskopplung zwischen dem Prozess und dem Prädiktor. Auf diese Situation der Vorhersage konzentrieren sich die Kap. 4 und 12.

Andererseits spielt die Vorhersage des Systemverhaltens bei operativen Steuerungsaufgaben eine große Rolle, bei denen das Bedienpersonal während des Betriebs einer Anlage die Steuerungsentscheidung in Abhängigkeit von der aktuellen Arbeitsweise fällen muss und vorher mit

einem dynamischen Modell testen will, ob der zur Zeit t ausgewählte Steuereingriff $u_{[t, t+t_e]}$ das zukünftige Systemverhalten in der beabsichtigten Weise verändert. Diese Vorhersageaufgabe muss während des Betriebs der Anlage (online) gelöst werden, wobei eine Informationskopplung den aktuellen Systemzustand $\boldsymbol{x}(t)$ an den Prädiktor übermittelt. Die Vorhersageaufgabe beginnt bei diesem Zustand und wird für ein zukünftiges Zeitintervall $[t, t + t_e]$ gelöst.

1.4.3 Planung von Steuereingriffen

In vielen technischen Anwendungen will man ein System so steuern, dass es vorgegebene Güteanforderungen in bestmöglicher Weise erfüllt. So soll eine Fertigung in möglichst kurzer Zeit beendet sein, ein Raumflugkörper mit möglichst wenig Energie sein Ziel erreichen, ein Fahrstuhl in möglichst kurzer Zeit alle Fahrtwünsche erfüllen, ein Kraftwerksblock in möglichst kurzer Zeit angefahren werden usw. Vorgegeben sind bei diesen Aufgaben ein gewünschter Verlauf $y_{[0, t_e]}$ der Ausgangsgröße oder ein gewünschter Endzustand $\boldsymbol{x}(t_e) = \boldsymbol{x}_e$ sowie Güteforderungen, die durch eine geeignet gewählte Steuerung bestmöglich erfüllt werden sollen. Diese Aufgabe beinhaltet, im Prinzip, eine Invertierung des Systems, denn der Ausgang $y_{[0, t_e]}$ ist vorgegeben und die Steuerung $u_{[0, t_e]}$ ist gesucht (Abb. 1.14).

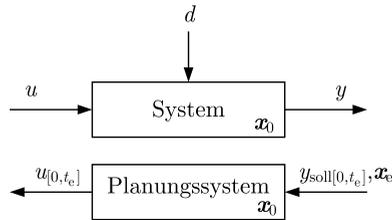


Abb. 1.14: Planung eines Steuereingriffs

Planungsaufgaben werden häufig in Optimierungsprobleme überführt, wobei das Gütefunktional den Abstand des Verlaufs der Ausgangsgröße y vom vorgegebenen Verlauf y_{Soll} , die Differenz des erreichten vom vorgegebenen Endzustand sowie den Verlauf der Stellgröße $u_{[0, t_e]}$ bewertet. Um diese Optimierungsprobleme lösen zu können, muss man den Anfangszustand \boldsymbol{x}_0 kennen und ein dynamisches Modell des zu steuernden Systems haben. Die erhaltene Lösung erzeugt jedoch nur dann den gewünschten Ausgang bzw. Endzustand, wenn die Störung $d_{[0, t_e]}$, die bei der Planung nicht berücksichtigt werden kann, einen hinreichend kleinen Einfluss auf das Systemverhalten hat.

Bei der Planungsaufgabe besteht keine Informationskopplung zwischen dem Prozess und der Automatisierungseinrichtung, denn die Planungsaufgabe wird vor der Durchführung des betreffenden Prozesses gelöst. Es muss allerdings der Anfangszustand \boldsymbol{x}_0 bekannt sein.

1.4.4 Zustandsbeobachtung

Alle Automatisierungsaufgaben sind umso besser zu lösen, je mehr man über den inneren Zustand x des Prozesses weiß. Der Zustand $x(t)$ kann jedoch nicht aus dem zu einem Zeitpunkt t erhaltenen Messwert $y(t)$ ermittelt werden, was allein aus der Tatsache folgt, dass der Zustand x stets ein Vektor mit mehreren Signalwerten, die Messgröße bei den hier untersuchten Beispielen jedoch nur ein Skalar ist. Es ist jedoch möglich, aus dem Verlauf $u_{[0,t_e]}$ der Eingangsgröße und dem Verlauf $y_{[0,t_e]}$ der Ausgangsgröße unter Verwendung eines Prozessmodells den inneren Zustand zu rekonstruieren. Dieses Vorgehen nennt man Zustandsbeobachtung.

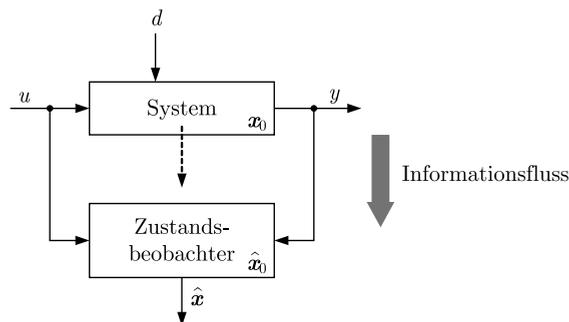


Abb. 1.15: Zustandsbeobachtung

Wie Abb. 1.15 zeigt, verwendet der Zustandsbeobachter einen Schätzwert \hat{x}_0 für den unbekanntem Anfangszustand x_0 des Prozesses und verbessert diesen Schätzwert durch Auswertung des Verlaufs der Eingangs- und der Ausgangsgröße, so dass der Fehler $\|x(t) - \hat{x}(t)\|$ immer kleiner wird und für $t \rightarrow \infty$ verschwindet. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Störung d klein genug ist, denn die Störung ist eine für den Zustandsbeobachter unbekannte Größe.

Bei der hier behandelten Beobachtungsaufgabe wird davon ausgegangen, dass die Störung d deterministisch ist. Wenn d ein stochastisches Signal ist, spricht man von einer *Zustandsschätzung*. Ein bekannter Zustandsschätzer ist der Kalmanfilter, der hier nur erwähnt wird, um auf die Ähnlichkeit der Aufgabenstellungen bei deterministischer und stochastischer Störung hinzuweisen.

Die Zustandsbeobachtung ist eine wichtige Teilaufgabe der Prozessüberwachung. Mit dem berechneten Zustand kann beispielsweise überprüft werden, ob einzelne Zustandsvariablen vorgegebene Grenzwerte unter- bzw. überschreiten. Der Informationsfluss führt vom Prozess zum Zustandsbeobachter, aber es gibt keine Rückwirkung vom Beobachter auf den Prozess. Methoden der Zustandsbeobachtung werden für kontinuierliche Systeme im Kap. 9 und für ereignisdiskrete Systeme im Kap. 15 behandelt.

1.4.5 Prozessdiagnose

Durch eine Fehlerdiagnose wird ermittelt, ob ein gegebener technischer Prozess fehlerfrei arbeitet bzw. welche Fehler aufgetreten sind, um gegebenenfalls Instandhaltungsmaßnahmen einzu-

leiten. Für die Lösung der Diagnoseaufgabe ist wichtig, dass Fehler zu einer Veränderung des Eingangs-Ausgangsverhaltens (E/A-Verhaltens) des betreffenden Systems führen. Man kann die Diagnoseaufgabe deshalb dadurch lösen, dass man das aktuelle E/A-Verhalten, das sich in den Messwerten des Eingangs u und des Ausgangs y äußert, mit dem E/A-Verhalten vergleicht, das die fehlerfreie technische Anlage besitzt und das durch ein Modell beschrieben wird. Stimmt das aktuelle Verhalten nicht mit dem Modellverhalten überein, so wird darauf geschlossen, dass ein Fehler das Prozessverhalten verändert haben muss (Abb. 1.16).

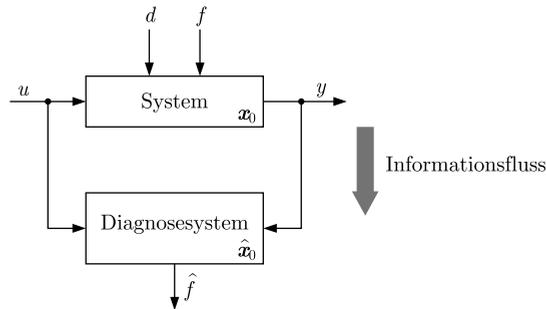


Abb. 1.16: Prozessdiagnose

Wenn man diese Vorgehensweise mit einem Modell wiederholt, das das Prozessverhalten unter der Wirkung eines Fehlers f beschreibt, so kann man erkennen, ob möglicherweise der Fehler f eingetreten ist.

Aus der Abbildung erkennt man, dass dieses Vorgehen zwei Schwierigkeiten aufweist. Erstens braucht man für die Diagnose den Anfangszustand x_0 , der i. Allg. nicht messbar und daher unbekannt ist. Jede Diagnoseaufgabe enthält deshalb implizit eine Zustandsbeobachtungsaufgabe. Dieser Umstand schlägt sich in der Tatsache nieder, dass in den Kap. 10 und 16 die Fehlerdiagnoseaufgabe für kontinuierliche bzw. ereignisdiskrete Systeme mit Methoden der Zustandsbeobachtung gelöst wird.

Zweitens sieht man, dass die auf den Prozess wirkende Störung d die Ursache für die Abweichung des gemessenen vom berechneten Ausgang sein kann. Bei der Bewertung der festgestellten Abweichung im Hinblick auf die Existenz eines Fehlers muss man diese Störung in Betracht ziehen und deshalb möglicherweise eine bestimmte Toleranz akzeptieren, bevor man einen Fehler signalisiert.

1.4.6 Regelung und Steuerung

Da bei den bisher betrachteten Automatisierungsaufgaben das Verhalten einer Anlage vorhergesagt bzw. analysiert werden sollte, war der Informationsfluss stets vom Prozess zur Automatisierungseinrichtung gerichtet. Bei den in diesem Abschnitt behandelten Steuerungen ist dies anders: Der Informationsfluss führt von der Automatisierungseinrichtung zum technischen Prozess bzw. verkoppelt die Automatisierungseinrichtung mit dem Prozess zu einem Kreis.

Den Erläuterungen der dabei verwendeten Strukturen muss eine allgemeine Bemerkung zu den Begriffen Regelung und Steuerung vorangestellt werden.

„Regeln“ und „Steuern“ in der deutschen Fachsprache. Wie bereits hervorgehoben wurde, wird der Begriff Steuern in diesem Buch in der sehr allgemeinen Bedeutung verwendet, ein dynamisches System zielgerichtet zu beeinflussen. Die Stellgröße kann dabei sowohl reellwertig als auch wertdiskret sein. Dies sei hier noch einmal betont, weil traditionell nach anderen Kriterien zwischen Regeln und Steuern unterschieden wurde.

Bei kontinuierlichen Systemen setzt man beide Begriffe in Abhängigkeit von der Struktur ein, in der der Prozess und die Automatisierungseinrichtung verkoppelt ist, und spricht von einer Regelung, wenn die Steuerung im geschlossenen Wirkungskreis erfolgt, und von einer Steuerung (oder Vorsteuerung), wenn es sich um eine offene Wirkungskette handelt. Bei diskreten Systemen verwendete man in der Vergangenheit ausschließlich den Begriff der Steuerung, weil man von einem geschlossenen Wirkungskreis forderte, dass der Informationsfluss kontinuierlich (oder zeitdiskret mit vergleichsweise hoher Abtastrate) rückgekoppelt ist und dabei „die zu regelnde Größe ... fortlaufend erfaßt, mit ... der Führungsgröße verglichen und im Sinne einer Angleichung beeinflusst wird“ [20]. Weil die kontinuierliche Arbeitsweise fehlt, betrachtete man diskrete Steuerungen als Steuerungen in der offenen Kette. Entsprechend dieser Definition sagt man auch, dass die Automatisierungstechnik mit der Regelungstechnik und der Steuerungstechnik zwei bisher weitgehend getrennt voneinander entwickelte Bereiche umfasst, wobei der Begriff Regelung den kontinuierlichen und der Begriff Steuerung den diskreten Systemen zugeordnet wird.

Diese Unterteilung ist nicht mehr zeitgemäß, weil auch die meisten diskreten Steuerungen im geschlossenen Wirkungskreis arbeiten, wie Kap. 13 noch ausführlich erläutern wird. Der einzige Unterschied zwischen einem kontinuierlichen und einem diskreten Regelkreis besteht in der Art der verwendeten Signale, die im ersten Fall reell und im zweiten Fall wertdiskret sind. Auch wenn bei diskreten Systemen der Informationskreis nur zu den Zeitpunkten geschlossen wird, an denen ein neues Ereignis auftritt, so hat die Rückkopplungsstruktur bei diskreten Systemen dieselben Charakteristika wie Regelkreise mit kontinuierlich arbeitenden Komponenten und es ist zweckmäßig, für beide Systemklassen dieselben Begriffe zu verwenden. Dementsprechend findet man in der neueren Literatur für diskrete Steuerungen im geschlossenen Kreis auch die Begriffe ereignisbasierte Regelung oder diskrete Regelung.

Dieses Lehrbuch schließt sich diesem Trend an und verwendet „Steuerung“ als übergeordneten Begriff, der kontinuierlich und diskret wirkende Stelleingriffe in der offenen Wirkungskette und im geschlossenen Wirkungskreis gleichermaßen bezeichnet. Untergeordnet ist der Begriff Regelung, der sich auf Steuerungen im geschlossenen Wirkungskreis bezieht und zwar unabhängig davon, ob die Signale kontinuierlich oder diskret sind. Der geschlossene Wirkungskreis wird in beiden Fällen als Regelkreis und die im geschlossenen Kreis arbeitende Steuereinrichtung als Regler bezeichnet. Wenn betont werden soll, dass die betrachtete Steuerung mit diskreten Stellgrößen arbeitet, wird von einer *diskreten Steuerung* oder einer diskreten Regelung gesprochen.

Diese Begriffsbestimmung entspricht übrigens auch den Gepflogenheiten in der englischsprachigen Literatur, in der man nur den Begriff *control* für beide Steuerungsarten kennt. Eine Steuerung im geschlossenen Wirkungskreis heißt dort *feedback control* und eine in der offenen Wirkungskette *feedforward control*.

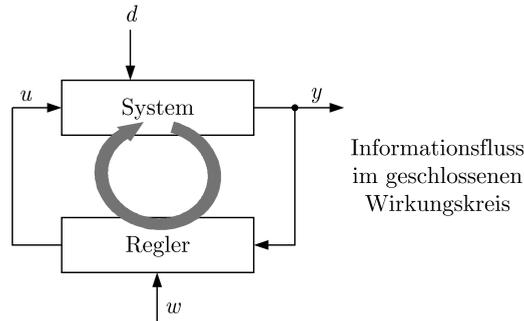


Abb. 1.17: Steuerung im geschlossenen Wirkungskreis (Regelung)

Steuerung im geschlossenen Wirkungskreis (Regelung). Bei der in Abb. 1.17 dargestellten Regelung bildet die Automatisierungseinrichtung mit dem zu steuernden System einen geschlossenen Kreis. Der zum Zeitpunkt t auf den Prozess einwirkende Stelleingriff $u(t)$ wird in Abhängigkeit von der zur selben Zeit gemessenen Ausgangsgröße $y(t)$ gewählt. Die Art und Weise, nach der die Stellgröße $u(t)$ aus der Messgröße $y(t)$ und der Sollgröße $w(t)$ bestimmt wird, wird *Reglergesetz* genannt. Dieselben Bezeichnungen verwendet man bei diskreten Systemen, wenn die Stellgröße zum k -ten Ereigniszeitpunkt von den zur selben oder zu früheren Ereigniszeitpunkten gemessenen Ausgangssymbolen abhängt.

Diese Rückführstruktur hat wesentliche Konsequenzen in Bezug auf die Wirkung, die die Automatisierungseinrichtung auf den Prozess haben kann (Abschn. 2.5). So kann ein Regler im Unterschied zu der als nächstes behandelten Steuerung in der offenen Wirkungskette die Wirkung einer Störung d aus der gemessenen Ausgangsgröße y erkennen und auf diese Störung reagieren. Verfahren zur Festlegung des Reglergesetzes werden für kontinuierliche Systeme in den Kap. 7 und 8 und für diskrete Systeme in den Kap. 13 und 14 behandelt.

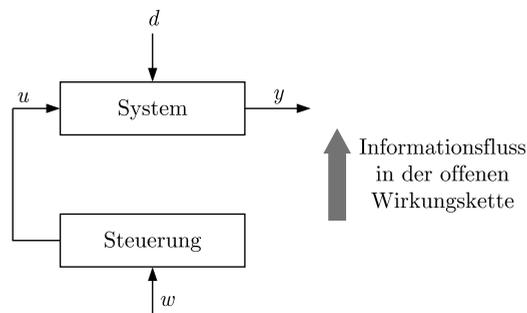


Abb. 1.18: Steuerung in der offenen Wirkungskette

Steuerung in der offenen Wirkungskette. Die in der Abb. 1.18 dargestellte Steuerung muss genauer als eine Steuerung in der offenen Wirkungskette bezeichnet werden. Bei ihr ergibt sich

kein geschlossener Wirkungskreis, so dass sie nicht auf Störungen reagieren kann. Die Steuereinrichtung kann lediglich aus der gegebenen Führungsgröße w mit Hilfe eines Prozessmodells vorausberechnen, welchen Verlauf $u(t)$ die Eingangsgröße haben muss, damit die Regelgröße $y(t)$ den vorgegebenen Verlauf $w(t)$ bekommt. Die Art und Weise, wie $u(t)$ aus $w(t)$ ermittelt wird, wird *Steuerungsgesetz* genannt. Störungen machen sich stets in Abweichungen der Ausgangsgröße y von der Führungsgröße w bemerkbar.

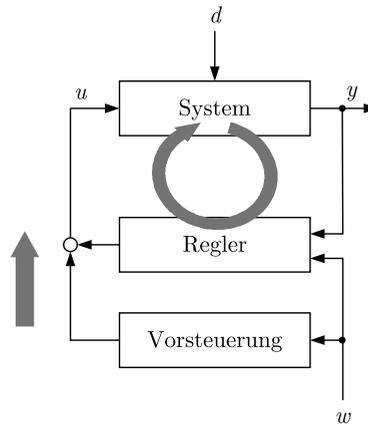


Abb. 1.19: Kombination beider Steuerungsarten

Kombination von Steuerungen in der offenen Wirkungskette und im Regelkreis. Die beiden Steuerungsarten treten häufig in Kombination auf (Abb. 1.19). Bei kontinuierlichen Systemen wird dabei der in der offenen Wirkungskette arbeitende Anteil der Steuerung als Vorsteuerung bezeichnet. Durch diesen Teil der Steuerung soll eine schnelle Reaktion des Systems auf Änderungen des Steuerungsziels w erreicht werden, während der Regler Störungen d und Modellunbestimmtheiten kompensieren soll. Bei diskreten Systemen beinhaltet die in der offenen Kette wirkende Steuerungskomponente insbesondere Zeitplansteuerungen, bei denen die Steuereinrichtung den nächsten Stelleingriff nicht in Abhängigkeit vom Prozessausgang y , sondern nach dem Ablauf einer bestimmten Zeitspanne erzeugt (siehe Beispiel 2.11 auf S. 73).

Abschnitt 2.5 enthält einen detaillierten Vergleich beider Steuerungsarten für beide Systemklassen.

1.4.7 Kombination von Automatisierungsfunktionen

Die bisher betrachteten Automatisierungsfunktionen können kombiniert werden, worauf hier anhand von zwei Beispielen hingewiesen wird. Abbildung 1.20 zeigt, wie die Vorhersage des zukünftigen Verhaltens eines Prozesses verbessert werden kann, wenn der in Abb. 1.13 gezeigte Prädiktor mit dem in Abb. 1.15 dargestellten Zustandsbeobachter kombiniert wird.

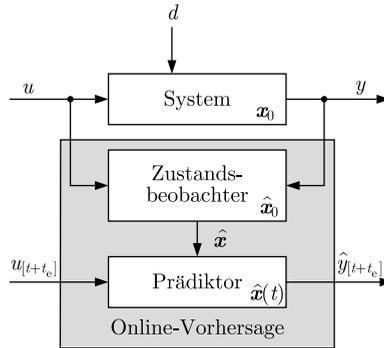


Abb. 1.20: Online-Vorhersage des Systemverhaltens

Der Vorteil dieser Kombination liegt darin, dass die Zustandsbeobachtung den aktuellen Prozesszustand $\hat{x}(t)$ liefert, in dem die Prädiktion beginnt. Dadurch werden Prädiktionsfehler vermieden, die durch einen falsch angenommenen Anfangszustand $\hat{x}_0 \neq x_0$ entstehen. Andererseits berücksichtigt die Zustandsbeobachtung Störungen, weil sich diese in der Ausgangsgröße bemerkbar machen und damit über die Zustandsbeobachtung in die Vorhersage einbezogen werden können.

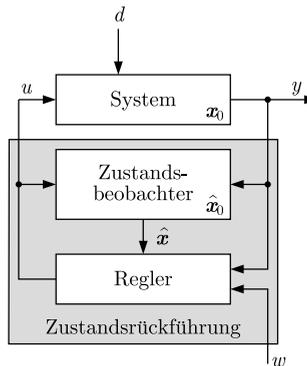


Abb. 1.21: Zustandsrückführung

Das zweite Beispiel ist die Kombination von Zustandsbeobachtung und Regelung. Wie in Abb. 1.21 zu sehen ist, kennt der Regler jetzt nicht nur die aktuelle Ausgangsgröße $y(t)$, sondern den gesamten Zustandsvektor $x(t)$. Er hat damit mehr Informationen zur Verfügung, was sich in einer wesentlich höheren Regelgüte äußert.

1.4.8 Automatisierungshierarchie

Die genannten Automatisierungsfunktionen kommen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen vor. Wie die Beispiele im Abschn. 1.2 gezeigt haben, übernimmt ein Automatisierungssystem Aufgaben, die sich bezüglich des Zeithorizonts der zu treffenden Entscheidungen, der verwendeten Informationen sowie der Zielstellungen unterscheiden. Für ein Elektroenergieversorgungsnetz wurden mit der Lastvorhersage, der Einsatzplanung für die Kraftwerke und der Regelung der Kraftwerksblöcke drei Ebenen der Automatisierung beschrieben. Eine ähnliche hierarchische Gliederung wurde auch bei der Flugüberwachung und -regelung behandelt (Abb. 1.7 auf S. 14).

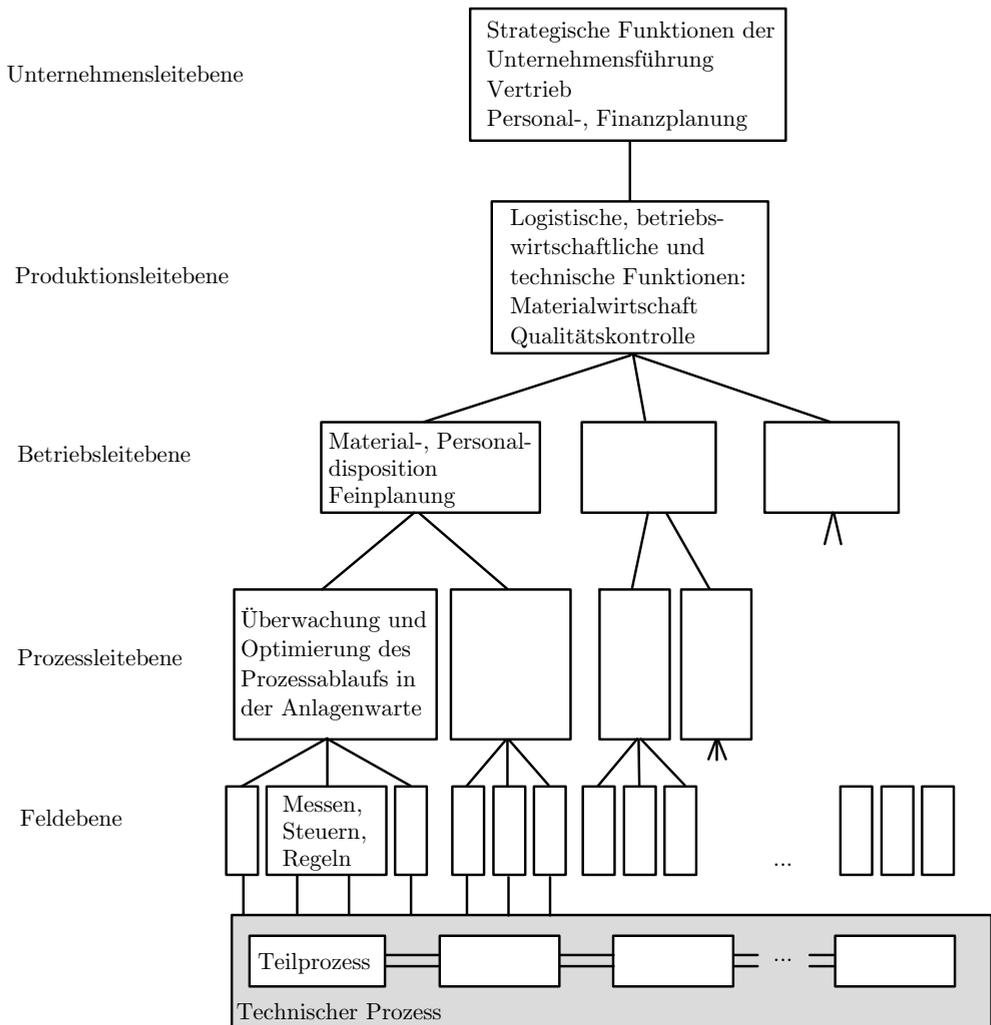


Abb. 1.22: Hierarchische Gliederung eines Automatisierungssystems

Abbildung 1.22 zeigt eine geläufige Gliederung der Automatisierungsaufgaben. Automatisch gelöste Aufgaben findet man vor allem auf den unteren beiden Ebenen, der Feldebene und der Prozessleitebene. Zu den wichtigsten Aufgaben dieser Ebene gehören die folgenden:

- **Feldebene:** Messen und Datenerfassung, Anzeigen (vor Ort), Stellen, Realisierung von Bedienhandlungen vor Ort.
- **Prozessleitebene:** Realisierung von Regelungen und Steuerungen, Datenaufzeichnung und Protokollierung wichtiger Signale, Datenaufbereitung und -archivierung, Optimierung des Prozessablaufs, Realisierung von Rezeptursteuerungen bei Chargenprozessen, Mensch-Maschine-Kommunikation.

Mit der Weiterentwicklung der Automatisierungsgeräte werden Regelungs- und Steuerungsfunktionen zunehmend von der Prozessleitebene in die Feldebene verlagert. Der Datenaustausch zwischen beiden Ebenen betrifft vor allem die Übertragung von Mess- und Stellinformationen.

Darüber sind die Leitungsebenen eines Unternehmens angeordnet, die sich mit der Führung von Betrieben bzw. des gesamten Unternehmens befassen. Zu den wichtigsten Aufgaben dieser Ebene gehören die folgenden:

- **Betriebsleitebene:** Kurzfristige Produktionsplanung einschließlich der Einsatzplanung von Maschinen und Anlagen, Bilanzierungsrechnungen, Qualitätskontrolle, Langzeitarchivierung von Daten, Rezepturverwaltung, Planung des Personaleinsatzes.
- **Produktionsleitebene:** Verwaltung und Bearbeitung von Lieferaufträgen, Produktionsplanung und Terminüberwachung, Kostenanalyse.
- **Unternehmensleitebene:** Unternehmensführung, Marktanalyse, strategische Produktionsplanung, Investitionsplanung, Personalplanung und Personaleinsatz.

Diese Managementaufgaben beziehen sich nicht nur auf technische Daten wie die beiden darunter liegenden Ebenen, sondern auch auf eine Vielzahl organisatorischer Daten. Sie werden heute durch umfangreiche Informationssysteme unterstützt, aber die meisten dieser Aufgaben sind nicht vollständig automatisiert und werden unter wesentlicher Mitwirkung des Personals der entsprechenden Ebene gelöst. Die Automatisierung dieser *Geschäftsprozesse* ist ein Gebiet, das auf Grund der Vielfalt und Menge der zu verarbeitenden Daten ein eigenes Gebiet der Informatik geworden ist. Automatisierungstechnische Methoden werden beispielsweise bei der Optimierung der Einsatzplanung von Maschinen angewendet.

Diese hierarchische Gliederung der Automatisierungsaufgaben führt auf eine entsprechende Strukturierung des Automatisierungs- und Informationssystems auf der Grundlage von Rechnernetzen.

Beispiel 1.10 *Hierarchische Steuerung einer Fertigungszelle*

Bei der in Abb. 1.23 dargestellten Fertigungszelle werden Werkstücke nacheinander durch die Maschinen M_1 und M_2 bearbeitet. Ein Greifer befördert ein Werkstück vom Band zur Werkzeugmaschine M_1 und nach der dortigen Bearbeitung zur Werkzeugmaschine M_2 . Die Maschine M_2 kann das fertige Werkstück ohne Hilfe des Greifers selbst in die Ablage schieben.

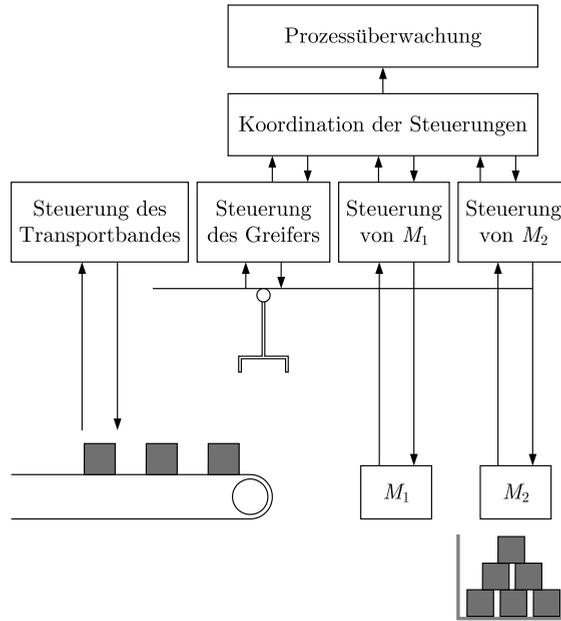


Abb. 1.23: Schematische Darstellung der Fertigungszelle

Die Steuerung ist hierarchisch gegliedert. Die Komponenten „Transportband“, „Werkzeugmaschine M_1 “, „Werkzeugmaschine M_2 “ und „Greifer“ besitzen Steuereinrichtungen, die z. B. bewirken, dass das Transportband nach der Entnahme eines Werkstücks das nächste Werkstück in den Arbeitsbereich des Greifers fährt, dass der Greifer die Werkstücke vom Transportband bzw. der linken Werkzeugmaschine abholt und zur Maschine M_1 bzw. M_2 bringt und dass die beiden Werkzeugmaschinen die vorgesehenen Bearbeitungsschritte ausführen. Da diese Vorgänge an jeder Komponente weitgehend unabhängig von den Vorgängen an anderen Komponenten ablaufen, werden sie durch lokale Steuereinrichtungen realisiert, die direkt an den Komponenten installiert sind. Allerdings ist zu ausgewählten Zeitpunkten eine Koordination der Steuerungen notwendig, um beispielsweise nach der Bearbeitung eines Werkstücks durch die Maschine M_1 den Greifer zu „rufen“ und den Weitertransport des Werkstücks zur Maschine M_2 zu veranlassen. Diese Koordination erfolgt durch die Komponente „Koordination der Steuerungen“ auf der nächsthöheren Automatisierungsebene. Ob diese Komponente bereits der zentral installierten Prozessleitebene oder noch der direkt an den Maschinen realisierten Feldebene zuzuordnen ist, hängt von der Implementierung ab.

In der Abbildung wurde angegeben, dass sich die Koordination nicht auf das Transportband erstreckt. Wenn man annehmen kann, dass stets genügend viele Werkstücke zur Bearbeitung bereit liegen und das Transportband das nächste Werkstück weit genug vorfährt, ist keine Koordination mit dem Greifer und den Werkzeugmaschinen notwendig. Generell ist man daran interessiert, die Koordination

nur dort vorzusehen, wo sie notwendig ist, und möglichst viele Komponenten der Automatisierungseinrichtung dezentral und mit wenigen Informationskopplungen arbeiten zu lassen.

Die in der Automatisierungshierarchie darüber angeordnete Komponente der Prozessüberwachung gehört zur Prozessleitebene und ist typischerweise auf einem zentralen Rechner realisiert. Sie erhält ausgewählte Informationen von den dezentralen Steuereinrichtungen und überprüft die Fehlerfreiheit der Arbeit aller Komponenten. Bei der Fehlerdiagnose tritt nur ein Informationsfluss von den dezentralen Steuerungen zur Überwachungskomponente auf. □

Aufgabe 1.5* *Autofahren als Problem der Mehrebenensteuerung*

Beim Autofahren werden Steuerungsaufgaben auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen gelöst, beginnend auf der unteren Ebene bei einfachen Temperaturregelkreisen im Motor bis zur Festlegung der Fahrtroute auf der obersten Ebene.

1. Ordnen Sie die Ihnen bekannten Regelungs- und Steuerungsaufgaben in einer hierarchischen Struktur an. Beachten Sie, dass Steuerungsaufgaben der höheren Ebene Zielvorgaben für die Steuerungsaufgaben der unteren Ebene machen.
2. Welche Steuerungsaufgaben werden heute automatisch, welche durch den Fahrer gelöst? Begründen Sie, warum die von Ihnen als automatisch gekennzeichneten Steuerungen automatisiert wurden.
3. Beim Einsatz von Krankenwagen und der Feuerwehr wird die Fahrtroute für mehrere Fahrzeuge durch eine Leitzentrale vorgegeben. Wo findet sich diese Steuerungsaufgabe in Ihrer hierarchischen Gliederung wieder? □

1.5 Realisierung von Automatisierungseinrichtungen

1.5.1 Methoden und Geräte

Bei der Lösung von Automatisierungsaufgaben bedient man sich einerseits der Methoden der Automatisierungstechnik, um die Überwachungs- und Steuerungsalgorithmen zu entwickeln und zu testen, und andererseits der Automatisierungsgeräte, um die Algorithmen zu implementieren und mit dem technischen System zu verknüpfen. Die Automatisierungstechnik beruht deshalb auf zwei Säulen:

- **Methoden der Automatisierungstechnik:** Es gibt eine gut entwickelte Theorie, mit der dynamische Systeme beschrieben, analysiert, gesteuert und überwacht werden können. Obwohl sich diese Methoden nicht nur auf die Steuerung beziehen, sondern die ganze Palette der im Abschn. 1.4 genannten Automatisierungsaufgaben betreffen, fasst man sie zur *Theorie der automatischen Steuerung* oder *Steuerungstheorie* und – wenn es sich um kontinuierliche Systeme handelt – zur *Regelungstheorie* zusammen.
- **Automatisierungsgeräte:** Für die Realisierung von Automatisierungssystemen steht eine umfassende Gerätetechnik zur Verfügung, die auf die physikalischen Gegebenheiten der einzelnen Anwendungsgebiete zugeschnitten ist. Dazu gehören programmierbare Geräte für

die Realisierung einzelner oder mehrerer Automatisierungsfunktionen wie beispielsweise speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), Prozessleitsysteme oder Industrie-PCs. Auf diesen Geräten werden die Automatisierungsfunktionen durch Anwenderprogramme realisiert, die meist mitgeliefert werden und nur entsprechend der konkreten Situation zu konfigurieren sind. Außerdem gehören Sensoren und Aktoren zu den Automatisierungsgeräten. Sie stellen die Schnittstelle zwischen dem Automatisierungssystem und dem zu steuernden System her. Automatisierungsgeräte werden heute mit rechnergestützten Werkzeugen für die Projektierung, Inbetriebnahme und Instandhaltung geliefert (CAD – *computer-aided design*; CAE – *computer-aided engineering*).

Beide Gebiete hängen eng zusammen, denn man wird eine Methode zur Überwachung oder zur Steuerung eines Systems nur dann auch praktisch einsetzen, wenn die für die Realisierung dieser Methode notwendigen Automatisierungsgeräte zur Verfügung stehen.

Die folgenden Kapitel konzentrieren sich auf die Methoden der Automatisierungstechnik und gehen nur in dem für das Verständnis der praktischen Anwendungsbeispiele notwendigen Maße auf gerätetechnische Aspekte ein. Sie betrachten also die Automatisierungstechnik als eine Methodenwissenschaft, deren wichtigstes Ziel es ist, systematische Ansätze für die Lösung der genannten Automatisierungsaufgaben in unterschiedlichen Anwendungsgebieten und weitgehend unabhängig von der verwendeten Gerätetechnik zu entwickeln und für die praktische Anwendung bereitzustellen.

Dabei steht nicht die verwendete technische Einrichtung, sondern deren Funktion im Mittelpunkt. Die Automatisierungsfunktionen sind von ihrer technischen Realisierung weitgehend unabhängig, so dass trotz der sich rasant entwickelnden Gerätetechnik die Grundprinzipien und viele Methoden der Automatisierungstechnik unverändert geblieben sind oder nur wenig modifiziert werden mussten.

In dieser die Methoden in den Mittelpunkt stellenden Betrachtungsweise wird der Begriff Automatisierungstechnik synonym mit den Begriffen Systemtechnik und Technische Kybernetik gebraucht. Im Unterschied dazu verwendet man Begriffe wie Industrielle Informationstechnik oder Steuerungstechnik mit stärkerem Bezug zur gerätetechnischen Realisierung von (häufig diskreten) Steuerungen.

1.5.2 Lösungsweg für Automatisierungsaufgaben

Um eine Automatisierungsaufgabe zu lösen, geht man i. Allg. in folgenden fünf Schritten vor:

Algorithmus 1.1 *Lösung von Automatisierungsaufgaben*

1. **Prozessanalyse:** Die für die Automatisierung wichtigen Informationen über das Verhalten des zu automatisierenden Systems werden durch ein Modell dargestellt.
 2. **Analyse des Systemverhaltens:** Die für die Automatisierung wichtigen Eigenschaften des zu automatisierenden Systems werden mit Hilfe des Modells ermittelt.
 3. **Entwurf:** Für die zu lösende Automatisierungsaufgabe werden Lösungsalgorithmen entwickelt. Das Ergebnis ist beispielsweise ein Regler, ein Zustandsschätzer, ein Diagnosealgorithmus oder eine Kombination derartiger Elemente. Diese Algorithmen beschreiben die Funktion der gesuchten Automatisierungseinrichtung.
 4. **Erprobung am Modell:** Die Automatisierungseinrichtung wird am Modell des zu steuernden Systems erprobt. Dies geschieht i. Allg. durch Simulationsuntersuchungen, bei denen getestet wird, ob sich das gesamte System in entscheidenden Situationen wie vorgeschrieben verhält.
 5. **Implementierung und Inbetriebnahme:** Die Automatisierungseinrichtung wird gerätetechnisch realisiert, an den gegebenen Prozess angeschlossen und in Betrieb genommen.
-

Im ersten Schritt muss ein Modell des zu steuernden Systems auf einem für die Automatisierung geeigneten Abstraktionsniveau und mit einer geeigneten Genauigkeit aufgestellt werden. Mit diesem Modell wird die Verbindung zwischen der technischen Funktion des zu steuernden Systems und den Methoden der Automatisierungstechnik hergestellt. Die Schritte 2 bis 4 nutzen Methoden, die in den folgenden Kapiteln behandelt werden. Wenn sich im vierten Schritt herausstellt, dass die gefundene Lösung nicht vollständig oder nicht zufriedenstellend ist, wird zum dritten Schritt zurückgegangen und ein neuer Entwurf durchgeführt. Dieses iterative Vorgehen ist keine Seltenheit, sondern charakteristisch für automatisierungstechnische Entwurfsaufgaben. Im fünften Schritt werden die erhaltenen Algorithmen mit Hilfe von Automatisierungsgeräten realisiert.

Diesen Schritten schließen sich die Inbetriebnahme und während des Betriebs gegebenenfalls die Wartung und Verbesserung der Überwachungs- und Steuerungskomponenten an, wobei sich der letzte Schritt sowohl auf die verwendeten Methoden als auch auf die eingesetzte Hardware und Software beziehen kann.

1.5.3 Beziehungen zwischen der Automatisierungstechnik und angrenzenden Fachdisziplinen

Interdisziplinärer Charakter der Automatisierungstechnik. Für die Lösung einer Automatisierungsaufgabe reicht es nicht aus, die Methoden und die Geräte der Automatisierungstechnik zu kennen. Jede Automatisierungsaufgabe beschäftigt sich mit einem konkreten technischen Prozess, dessen wichtigste Eigenschaften erkannt und bei der Lösung der Automatisierungsaufgabe ausgenutzt werden müssen. Dies erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Fachleuten, die die Wirkungsweise des zu automatisierenden Objekts und die Ziele der Automatisierung kennen, also mit Anlagentechnikern bei der Automatisierung von Fertigungs- und Materialflussprozessen, mit Verfahrenstechnikern für die Lösung von Aufgaben der Prozessautomatisierung oder mit Konstrukteuren für die Fahrzeugautomatisierung. Diese Zusammenarbeit ist für den Erfolg jeder Automatisierungsaufgabe von großer Bedeutung.

Das erste Ziel dieser Zusammenarbeit besteht in der Darstellung der Automatisierungsaufgabe auf einer systemtheoretischen Abstraktionsebene. Dabei liegt der schwierigste Schritt in der Abstraktion von den physikalischen Gegebenheiten, so dass nur noch mit den für die betrachtete Aufgabenstellung wichtigen Informationen gerechnet wird, also insbesondere Material- und Energieflüsse durch Informationsflüsse ersetzt sind. Auf diesen Schritt wird ausführlicher in den Kap. 2, 3 und 11 eingegangen. Wenn dieser Schritt vollzogen und ein dynamisches Modell des Automatisierungsobjekts aufgestellt ist, kann man mit den Methoden der Automatisierungstechnik, die in diesem Lehrbuch behandelt werden, die Aufgabe lösen.

Automatisierungstechnik und Informatik. Es gibt zwei Gebiete, mit denen sich sowohl die Automatisierungstechnik als auch die Informatik beschäftigen: Methoden für die Modellierung und Analyse diskreter Systeme sowie Hardware- und Softwareprobleme der Echtzeitdatenverarbeitung.

Das erste Gebiet betrifft die im dritten Teil des Buches behandelten ereignisdiskreten Systeme. Wichtige Modellformen wie Automaten oder Petrinetze werden in vielen Ingenieurwissenschaften und in der Informatik gleichermaßen eingesetzt, wobei vor allem Analysemethoden aus der Informatik in die Automatisierungstechnik übernommen wurden. Ein Schwerpunkt ist dabei die Beherrschung bzw. Vermeidung der kombinatorischen Komplexität von Modellierungs- und Analyseaufgaben. In Erweiterung dessen wurden in der Automatisierungstechnik Methoden zum Steuerungsentwurf für diese Systemklasse entwickelt.

Die Zusammenarbeit beider Fachgebiete für die Entwicklung der Automatisierungsgeräte und die Realisierung von Automatisierungssystemen kann man folgendermaßen charakterisieren: Aufgabe der Automatisierungstechnik ist es festzulegen, *was* informationsverarbeitende Systeme zur Lösung einer Automatisierungsaufgabe zu tun haben, während die Informatik Antworten auf die Frage nach dem *Wie* der technischen Realisierung dieser Informationsverarbeitung geben soll. Zu den wichtigsten gerätetechnischen Problemen, bei denen die Automatisierungstechnik Methoden der Informatik einsetzt, gehören die folgenden:

- **Echtzeitprogrammierung:** Wie können Algorithmen strukturiert und implementiert werden, so dass sie unter den in der Automatisierungstechnik vorherrschenden Echtzeitbedingungen ablaufen?

- **Datenbanken:** Wie können die umfangreichen Mengen an Prozessdaten gespeichert, aufbereitet, strukturiert und ausgewertet werden?
- **Vernetzte Rechnersysteme:** Welche Kommunikationsformen zwischen den zu einem Automatisierungssystem gehörenden Rechner sind zweckmäßig und notwendig?
- **Fernautomatisierung:** Wie können Automatisierungsfunktionen über Datennetze von weit entfernt gelegenen Automatisierungseinrichtungen aus realisiert werden?

Diese Aufzählung zeigt die sehr enge Verflechtung von Automatisierungstechnik und Informatik, auf Grund derer im Zusammenhang mit der Realisierung von Steuerungs- und Überwachungsfunktionen durch Rechner auch der Begriff der *Prozessinformatik* gebraucht wird.

Automatisierungstechnik und Nachrichtentechnik. Die Automatisierungstechnik beruht auf der Verarbeitung von Informationen. Insofern enthalten Automatisierungsaufgaben stets auch eine Reihe von Aufgaben der Informationsübertragung und der Signalverarbeitung.

Grundlage für die Zusammenarbeit von Automatisierungstechnik und Nachrichtentechnik ist die gleichartige systemtheoretische Betrachtungsweise von Signalen und Systemen. Viele grundlegende Methoden werden in beiden Fachgebieten in gleicher oder ähnlicher Weise eingesetzt.

Typische Aufgaben der Signalverarbeitung wie das Herausfiltern des Nutzsignals aus einer verrauschten Messwertfolge oder die Übertragung von Signalen sind mit allen in diesem Buch behandelten automatisierungstechnischen Fragestellungen verbunden, ohne dass darauf im Einzelnen eingegangen wird. Da die Nachrichtentechnik das notwendige Handwerkzeug für die Lösung dieser Aufgaben geschaffen hat, kann im Folgenden idealisierender Weise angenommen werden, dass Messgrößen wenig gestört, Signale sicher und schnell übertragen und unter Echtzeitbedingungen fehlerfrei verarbeitet werden können.

Kommunikationssysteme sind jedoch selbst auch Objekte der Automatisierungstechnik. So ist die Steuerung der Senderaten und des Datenflusses in Kommunikationsnetzen eine wichtige Aufgabe, von deren Lösung die Qualität der Datenübertragung entscheidend abhängt (vgl. Abschn. 1.2.7 und Aufg. 3.4).

Literaturhinweise

Für Themen, die eng mit den hier behandelten Methoden der Automatisierungstechnik zusammenhängen, aber nicht im Einzelnen erläutert werden, wird auf die folgende Spezialliteratur verwiesen. Die *Prozessoptimierung*, die sich mit der Wahl optimaler Arbeitspunkte beschäftigt, basiert auf Methoden für die statische und dynamische Optimierung. Eine leicht verständlich Einführung gibt [24], eine breitere Übersicht [78].

Die *Prozessleittechnik* für verfahrenstechnische Anlagen wird in [30] in Übersichten behandelt. Die Methoden der *Prozessführung* sind in [91] zusammengefasst. Eine umfangreiche Darstellung der Prozessinformatik, also der mit dem Einsatz von Rechnern zur Steuerung technischer Systeme verbundenen Probleme und Lösungswege, findet sich in [36]. In [70] werden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Leitsystemen in kontinuierlichen und diskreten Produktionsprozessen behandelt.

Einführungen in die experimentelle Prozessanalyse werden beispielsweise in [40] und [103] gegeben.

Als Literatur für spezielle Automatisierungsaufgaben sei auf [47] für die Steuerung von Materialflusssystemen und auf [41] und [42] für Regelungsaufgaben in großen Kommunikationsnetzen verwiesen. In [50] werden die automatisierungstechnischen Aufgaben und Lösungen im Kraftfahrzeug ausführlich dargestellt. Dieses Buch enthält viele im Einzelnen nachvollziehbare Modelle und beschreibt Regelungs- und Steuerungsmethoden in ihrem praktischen Einsatz, z. B. die Steuerung eines Antiblockiersystems oder eine Motorsteuerung. Der Band [92] beschreibt die Aufgaben und Lösungswege der Prozessregelung mit vielen verfahrenstechnischen Beispielen, wobei einfache, gut nachvollziehbare dynamische Modelle und einfache Regelungsstrukturen behandelt werden. Der Beitrag [35] weist auf neue Anwendungsgebiete der Automatisierungstechnik im Gesundheitsbereich, in der Mikrosystemtechnik und Nanotechnik sowie im Bereich der mobilen Systeme hin. [102] zeigt, dass medizintechnische Geräte ohne Automatisierungstechnik undenkbar wären.

Automatisierungsgeräte (Sensoren, Aktoren sowie Geräte für die Realisierung unterschiedlicher Automatisierungsfunktionen) werden ausführlich in dem dreibändigen Werk [31] behandelt.

Der im Beispiel 1.8 beschriebene Bremsassistent ist [51] entnommen. Für Beispiele mechatronischer Systeme wird auf [90] verwiesen.

2

Grundlegende Eigenschaften dynamischer Systeme

Bei der Lösung von Automatisierungsaufgaben werden viele grundlegende Entscheidungen anhand der Struktur des zu steuernden Systems getroffen. In diesem Kapitel werden mit dem Blockschaltbild und dem Signalflussgrafen zwei strukturelle Beschreibungsformen eingeführt und für die Kopplungsanalyse eingesetzt. Anschließend werden die Eigenschaften von Steuerungen in der offenen Wirkungskette und von Steuerungen im geschlossenen Wirkungskreis miteinander verglichen.

2.1 Grundbegriffe der Systemtheorie

2.1.1 Signal, Prozess, System

Die Automatisierungstechnik beschäftigt sich mit dynamischen Vorgängen in technischen oder nichttechnischen Systemen. Zur Beschreibung dieser Vorgänge wurden im Kap. 1 die Begriffe Signal, Prozess und System gebraucht, allerdings ohne sie genau zu erläutern. Diese Definitionen werden hier nachgeholt.

Unter einem dynamischen System versteht man eine Einrichtung, die unter dem Einfluss von einem oder von mehreren Eingangssignalen steht und dessen zeitliches Verhalten in einem oder mehreren Ausgangssignalen sichtbar wird (Abb. 2.1). Um diesen abstrakten Begriff zu verstehen, muss zunächst erklärt werden, was Signale sind, die am Eingang und Ausgang des Systems und darüber hinaus im Inneren eines Systems auftreten.

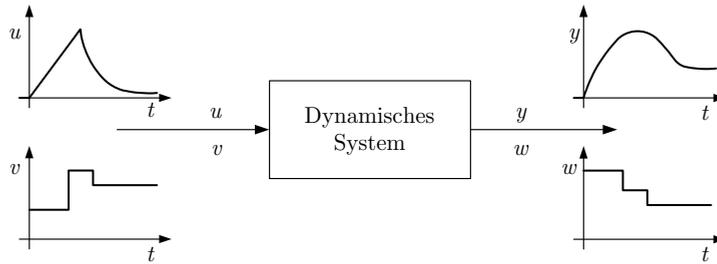


Abb. 2.1: Dynamisches System

Ein *Signal* beschreibt eine sich zeitlich ändernde Größe, durch die eine Information ausgedrückt wird.

Ein Signal s wird als eine Funktion der Zeit dargestellt

$$s : \mathcal{T} \rightarrow \mathcal{S},$$

wobei \mathcal{T} eine Menge von Zeitpunkten und \mathcal{S} die Menge der möglichen Signalwerte ist. Beispiele sind die Spannung an einem ohmschen Widerstand, der Füllstand in einem Behälter, die Temperatur eines Werkstücks oder die Konzentration eines Stoffes in einer Flüssigkeit. Diese Signale beschreiben physikalische Größen. Signale können aber auch abstrakte Größen bezeichnen wie den Wert eines aus mehreren Messgrößen berechneten Qualitätsparameters (Durchsatz, Wirkungsgrad) in der Fertigung.

Unter einem *Prozess* versteht man einen Vorgang, bei dem sich der Wert einer oder mehrerer Kenngrößen zeitlich verändert.

Die sich zeitlich ändernden Größen werden durch Signale beschrieben.

Die in einer zu automatisierenden Anlage ablaufenden Prozesse sind durch die Umformung, die Speicherung oder den Transport von Energie, von Stoffen oder von Informationen gekennzeichnet. Der Begriff des Prozesses ist allerdings nicht an bestimmte physikalische Vorgänge gebunden. Beispielsweise sind das Füllen eines Behälters, das Erwärmen eines Werkstücks, das Bohren eines Loches und das Vermengen von Flüssigkeiten Prozesse mit unterschiedlichem physikalischen Hintergrund. Bei jedem dieser Vorgänge kann man eine oder mehrere Kenngrößen definieren, die sich zeitlich verändern.

Unter einem *dynamischen System* versteht man einen Teil der Welt, in dem sich Prozesse abspielen.

Das Verhalten von Systemen ist durch ein oder mehrere Signale beschrieben, die durch das System in einen Zusammenhang zueinander gebracht werden.

Die gegebenen Definitionen zeigen, dass der Prozess den physikalischen Vorgang und das System die abstrakte technische Vorrichtung beschreibt, in der der Vorgang abläuft. Da man