

Norbert Becker

# Automatisierungs- technik



**Vogel** Buchverlag

**elektro  
technik**

Norbert Becker

Automatisierungstechnik

Professor Dr.-Ing. Norbert Becker

# **Automatisierungstechnik**

**2., völlig neu bearbeitete Auflage**

Vogel Buchverlag

### **Prof. Dr.-Ing. Norbert Becker**

studierte bis zum Vordiplom Elektrotechnik an der TH Darmstadt und anschließend Elektrotechnik mit Spezialisierung auf Regelungstechnik an der TU Karlsruhe. Danach arbeitete er an der Universität Duisburg als wissenschaftlicher Mitarbeiter und promovierte dort in Regelungstechnik. Weiterhin war er Gastprofessor an der Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg. Bei der Bayer AG arbeitete er viele Jahre als leitender Mitarbeiter in der Prozessleittechnik. Anschließend war er für kurze Zeit Professor für Prozessleittechnik an der FH Düsseldorf, bevor er seine jetzige Stelle als Professor für Automatisierungstechnik an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg antrat.

Prof. Becker ist Autor von drei Büchern und Mitautor eines weiteren Buches.

*Eine «SIMATIC STEP 7 Professional V12, Trial License» im Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) ist 21 Tage nutzbar und steht als Download zur Verfügung:*

<http://support.automation.siemens.com/WW/view/de/77317911>

*Weitere Informationen zum TIA Portal finden Sie unter:*

<http://support.automation.siemens.com/WW/view/de/65601780>

*Weitere Informationen erhalten Sie im Internet unter*

<https://www.siemens.de/sce/promotoren>

<https://www.siemens.de/sce/module>

<https://www.siemens.de/sce/tp>

ISBN 978-3-8343-3301-8

2. Auflage. 2014

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hier- von sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genann- ten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2014 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Fotolia-Titelgrafik: © Anatoly Maslennikov

## Vorwort zur zweiten Auflage

Dieses Buch ist die zweite Auflage des bereits in der Kamprath-Reihe erschienenen Buches *Automatisierungstechnik*. Diese Auflage ist in vielen Bereichen völlig überarbeitet und teilweise deutlich erweitert worden. Eine zweisemestrige Vorlesung (inkl. Übungen) über Automatisierungstechnik in der Bachelorausbildung deckt der Inhalt des Buches gut ab. Der Inhalt ist subjektiv ausgewählt und entspricht den wesentlichen industrienahen Vorstellungen des Autors. Deutlich überarbeitet wurden die Kapitel über Steuerungstechnik, Automatisierungskomponenten, praktische Regelungstechnik, Explosionsschutz und Projektierung. Die neuen Kapitel über Maschinensicherheit und Sicherheit in verfahrenstechnischen Anlagen erweitern das Buch erheblich und müssen nach Meinung des Autors heutzutage in die automatisierungstechnische Ausbildung einfließen.

Zu jedem Kapitel gibt es Verständnisfragen und Übungsaufgaben, deren Lösungen im Anhang enthalten sind.

Das Buch verfügt wieder über Programmierpraktika, die aber nicht in gedruckter Form vorliegen, sondern aus dem InfoClick-Bereich inkl. Lösungen downloadbar sind (Informationen siehe Buchanfang). Einfache Einstellhilfen für PID-Regler sind ebenfalls in diesem Bereich enthalten.

Nicht behandelt werden die objektorientierte Programmierung von Steuerungen und Motion Control. Bzgl. der objektorientierten Programmierung von Steuerungen möchte der Autor belastbare Industrieerfahrungen abwarten.

Der Verfasser hat immer Wert darauf gelegt, dass die Darstellung anwendungsnahe ist. Praktisch überall (abgesehen von zwei Anhängen) ist dies auch so erfolgt.

Die Zielgruppen des Buches sind Bachelor-Studierende der Automatisierungstechnik und Industriemitarbeiter, die sich auf den neuesten Stand bringen möchten.

Der Verfasser möchte sich insbesondere bei den folgenden Personen bzw. Firmen bedanken:

Dr. M. HUELKE (IFA) für die Anregung des DGUV-Förderprojektes über programmierbare Sicherheitsfunktionen [7.19] und für zahlreiche sehr fundierte und sehr bereichernde fachliche Diskussionen, ohne die das Kapitel über Maschinensicherheit so nicht entstanden wäre.

Dipl.-Ing. M. EGGELING (HS BRS) für die Bearbeitung des DGUV-Förderprojektes über programmierbare Sicherheitsfunktionen und für das Korrekturlesen einiger Kapitel.

Dipl.-Ing. B. SELMEIER (VDMA) für die Unterstützung in VDMA-Diskussionsforen.

Dipl.-Ing. J. KRÄMER (TÜV-Rheinland) für unterstützende Diskussionen zum Kapitel Maschinensicherheit.

Dipl.-Ing. U. HUG für kritische Anmerkungen zum Kapitel Maschinensicherheit.

Fa. Siemens (Dipl.-Inge. U. JACOBY, N. PUETZ) für die sehr hilfreiche Unterstützung bei der Durchführung des DGUV-Förderprojektes.

Fa. Pilz (Dipl.-Ing. M. WÖHNER) für die systemtechnische Unterstützung bei der Durchführung des Projektes.

Den Maschinenbauunternehmen Kautex-Maschinenbau (Dipl.-Inge. U. THIELE, Q. SAUERMAN, C. VOIGT), Hennecke GmbH (Dipl.-Ing. SIEBEN), SMS SIEMAG (Dipl.-Ing. R. INKMANN) für sehr praxisnahe und offene Diskussionen im DGUV-Förderprojekt und für die Unterstützung bei Beispielen.



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur zweiten Auflage . . . . .	5
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1 Begriffsdefinitionen . . . . .	11
1.2 Beteiligte Fachgebiete der Automatisierungstechnik . . . . .	12
1.3 Einsatzgebiete für Automatisierungssysteme . . . . .	15
1.4 Marktzahlen für die Automatisierungstechnik . . . . .	16
1.5 Lernziele des Buches . . . . .	17
<b>2 Sensoren . . . . .</b>	<b>19</b>
2.1 Analoge Sensoren . . . . .	19
2.2 Binäre Sensoren . . . . .	22
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>24</i>
<b>3 Aktoren . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1 Ventile . . . . .	25
3.2 Elektromotor . . . . .	29
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>33</i>
<b>4 Steuerungen . . . . .</b>	<b>35</b>
4.1 Einleitung . . . . .	35
4.2 Grundsätzliches zu Steuerungen . . . . .	37
4.3 Grundsätzliches zur Funktionsweise eines Automatisierungsrechners . . . . .	39
4.4 Die Programmiernorm EN 61 131-3 . . . . .	41
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>49</i>
4.5 Verknüpfungsfunktionen . . . . .	49
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>59</i>
4.6 Verknüpfungssteuerungen . . . . .	60
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>68</i>
4.7 Ablaufsteuerungen . . . . .	71
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>85</i>
4.8 Zusammenhänge zwischen Ablaufsteuerungen, Petrinetzen und Automaten . . . . .	91
<i>Verständnisfragen . . . . .</i>	<i>97</i>
4.9 Rezeptsteuerungen . . . . .	97
<b>5 Automatisierungskomponenten . . . . .</b>	<b>107</b>
5.1 CPU . . . . .	107
<i>Verständnisfragen . . . . .</i>	<i>110</i>
5.2 Analoge Ausgangskarten . . . . .	110
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>116</i>
5.3 Analoge Eingangskarten . . . . .	116
<i>Verständnisfragen und Aufgaben . . . . .</i>	<i>119</i>
5.4 Binäre Ausgangskarten . . . . .	120

5.5	Binäre Eingangskarten . . . . .	121
5.6	Feldbusse und Netzwerke . . . . .	121
5.6.1	Grundsätzliches zu Feldbussen und Netzwerken . . . . .	122
	<i>Verständnisfragen</i> . . . . .	133
5.6.2	PROFIBUS-DP . . . . .	133
	<i>Verständnisfragen</i> . . . . .	140
5.6.3	PROFIBUS-PA . . . . .	140
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	144
5.6.4	Aktor-Sensor-Interface (AS-i) . . . . .	144
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	150
5.6.5	CANopen . . . . .	152
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	161
5.6.6	Ethernet mit TCP/IP . . . . .	162
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	176
5.6.7	Ethernet-basierte Feldbusse . . . . .	177
5.6.7.1	PROFINET . . . . .	179
	<i>Verständnisfragen</i> . . . . .	185
5.6.7.2	SERCOS III . . . . .	186
	<i>Verständnisfragen</i> . . . . .	189
5.6.7.3	EtherCAT . . . . .	189
	<i>Verständnisfragen</i> . . . . .	192
5.6.8	OPC . . . . .	192
	<i>Verständnisfragen</i> . . . . .	194
<b>6</b>	<b>Praktische Regelungstechnik</b> . . . . .	<b>195</b>
6.1	PID-Regelalgorithmus . . . . .	195
6.2	Programmtechnische Realisierung des PID-Algorithmus . . . . .	203
6.3	Experimentelle PID-Reglereinstellung . . . . .	212
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	221
<b>7</b>	<b>Beispiele für übergeordnete Anforderungen an die</b> <b>Automatisierungskomponenten</b> . . . . .	<b>225</b>
7.1	Maschinensicherheit . . . . .	227
7.1.1	Grundlegende Normen und Begriffe . . . . .	227
7.1.2	Grundsätzliche Anwendung der EN ISO 13 849-1 . . . . .	239
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben zu den</i> <i>Abschnitten 7.1.1 und 7.1.2</i> . . . . .	259
7.1.3	Anwendung programmierbarer Logik und von Bussystemen in der funktionalen Sicherheit . . . . .	262
7.1.4	Sichere Maschinensoftware gemäß EN ISO 13 849-1 entwickeln und dokumentieren . . . . .	265
7.2	Sicherheit in verfahrenstechnischen Anlagen . . . . .	304
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	318
7.3	Explosionsschutz . . . . .	319
	<i>Verständnisfragen und Aufgaben</i> . . . . .	333
7.4	IP-Schutzarten . . . . .	334



8	Projektierung	335
8.1	Projektdurchführung	335
	<i>Verständnisfragen</i>	343
8.2	Darstellung von Automatisierungsinformationen in R&I-Fließbildern nach EN 62 424	343
8.3	Betriebsmittelkennzeichnung nach EN 81 346	353
	<b>Anhang</b>	357
A1	Vergleich von Anti-Reset-Windup-Maßnahmen für industrielle PID-Regler	357
A1.1	Einleitung	357
A1.2	Anforderungen an ARW-Maßnahmen	357
A1.3	Betrachtete ARW-Maßnahmen	359
A1.4	Vergleich der ARW-Maßnahmen	364
A1.5	Zusammenfassung	370
A2	Die verwendeten Einstellregeln	372
A3	Lösungen	377
A4	(abrufbar über <b>InfoClick</b> unter: <a href="http://www.vogel-buchverlag.de">www.vogel-buchverlag.de</a> ) Programmierpraktika nach DIN EN 61 131-3	
A4.1	Programmierversuch 1: Einfache Steuerungsanwendungen (Verknüpfungsfunktionen, Verknüpfungssteuerungen)	
A4.2	Programmierversuch 2: Steuerungsprobleme aus der Praxis (Verknüpfungssteuerungen)	
A4.3	Programmierversuch 3: Steuerung einer Stanzmaschine durch eine Ablaufsteuerung	
A4.4	Programmierversuch 4: Verfeinerung der Ablaufsteuerung der Stanzmaschine	
A4.5	Programmierversuch 5: Steuerung eines Regalbediengerätes durch eine Ablaufsteuerung	
A4.6	Programmierversuch 6: Praktische Regelungstechnik	
	<b>Literaturverzeichnis</b>	407
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	415

---

Der Onlineservice InfoClick bietet unter [www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de) nach Codeeingabe eventuell zusätzliche Informationen und Aktualisierungen. Fordern Sie für Ihr E-Book den Code unter [buch@vogel-buchverlag.de](mailto:buch@vogel-buchverlag.de) an!

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Begriffsdefinitionen

Der Begriff «Automatisierungstechnik» ist populär. Was versteht man nun tatsächlich darunter? Im Folgenden werden zunächst einige Begriffe aufgeführt, die Normen entnommen sind. Naturgemäß sind diese Begriffsdefinitionen daher sehr allgemein gehalten.

DIN 19 222 definiert:

---

### Definition



**Prozess:** Die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder auch Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird.

**Leiten:** Gesamtheit aller Maßnahmen, die einen im Sinne festgelegter Ziele erwünschten Ablauf eines Prozesses bewirken. Die Maßnahmen werden vorwiegend unter Mitwirkung des Menschen aufgrund der aus dem Prozess oder aus der Umgebung erhaltenen Daten mit Hilfe der Leiteinrichtung getroffen.

**Leiteinrichtung:** Umfasst alle für die Aufgabe des Leitens verwendeten Geräte und Programme sowie auch Anweisungen und Vorschriften.

In DIN 19 233 findet man:

---

### Definition



**Automatisierung:** Das Ausrüsten einer Einrichtung, so dass sie ganz oder teilweise ohne Mitwirkung des Menschen bestimmungsgemäß arbeitet.

Die für den Autor aktuellste und konkreteste Beschreibung der Automatisierungstechnik ist [1.1] entnommen:

---

### Definition



Eine der Kerndisziplinen der **Automatisierungstechnik** ist die **Regelungstechnik**, die in den 40er-Jahren des 20. Jahrhunderts entstanden ist. Bis heute hat sich zu dieser Kerndisziplin ein breites Spektrum artverwandter Disziplinen gesellt. Heutzutage ist die Automatisierungstechnik ein Sammelbegriff für die Verbindung moderner **Steuerungs-** und **Regelungstechnik** mit einschlägigen Bereichen der **industriellen Informationstechnik** sowie der **technischen Informatik** und speziellen Elementen **relevanter Anwendungsgebiete**. Automatisierungstechnik ist im Wesentlichen ein **interdisziplinäres Fachgebiet**, das quer über die ingenieurtechnischen Fachbereiche Elektrotechnik, Maschinenbau und Chemieingenieurwesen angesiedelt ist. Die Methoden und die technischen Ausprägungen der Automatisierungstechnik sind daher breit gefächert und unterliegen teilweise einem rasanten Wandel.

Automatisierungstechnik ist also heutzutage ein interdisziplinäres Fachgebiet, dessen relevante Teildisziplinen Abschnitt 1.2 noch präzisiert.

1980 wurde in der Bayer AG von LIPPERT und POLKE der Begriff «Prozessleittechnik» geprägt. Damit sollte die Zusammenführung der mit der Anlagenautomatisierung der verfahrenstechnischen Industrie befassten MSR- und elektrotechnischen Gruppen charakterisiert werden.



### Definition

MSR = **M**essen, **S**teuern, **R**egeln

PLT = **P**rozessleittechnik

Insbesondere sollte damit auch die ganzheitliche Ausrichtung der mit Automatisierung von verfahrenstechnischen Anlagen befassten Gruppen zum Ausdruck gebracht werden. Auch außerhalb der Bayer AG steht dieser Begriff heute für die ganzheitliche Betrachtung von sämtlichen Automatisierungsaspekten industrieller Produktionsprozesse. Weiterhin gibt es noch den Begriff der «Prozessautomatisierung» [1.2]. Erfahrungsgemäß wird dieser Begriff für die Automatisierung von verfahrenstechnischen Anwendungen verwendet.

In diesem Buch verwenden wir ausschließlich den Begriff «Automatisierungstechnik», um die Aufmerksamkeit auf das Wesentliche zu lenken. Ist die zu automatisierende Anlage eine fertigungstechnische Anlage, so wird die Automatisierung normalerweise nur mit wenigen Eingriffen des Bedienpersonals auskommen, da der Prozess sehr gut bekannt ist und in viele überschaubare Schritte gegliedert werden kann. Ist die Anlage jedoch eine verfahrenstechnische (chemische) Anlage, so kann diese sehr komplex sein, so dass letztlich viele Bedieneingriffe nötig sind. Der Automatisierungsgrad hängt also von der Anwendung ab.

## 1.2 Beteiligte Fachgebiete der Automatisierungstechnik

Bild 1.1 zeigt das Zusammenspiel eines Automatisierungssystems mit der zu automatisierenden Anlage. Ein Automatisierungssystem ist die Vernetzung zwischen Bedienstation(en) (z.B. PCs, Touch Panels usw.), Programmierstation (PC) und Automatisierungsrechner(n) (z.B. SPS (speicherprogrammierbare Steuerung), Controller), wie es in Bild 1.2 angedeutet ist.

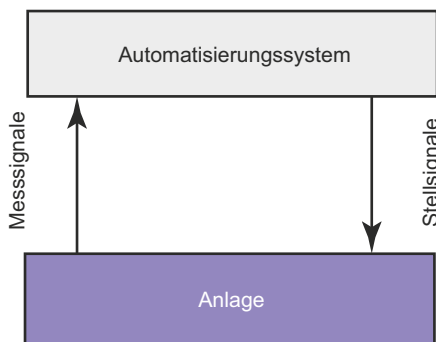


Bild 1.1  
Zusammenwirken zwischen  
Automatisierungssystem und  
Anlage

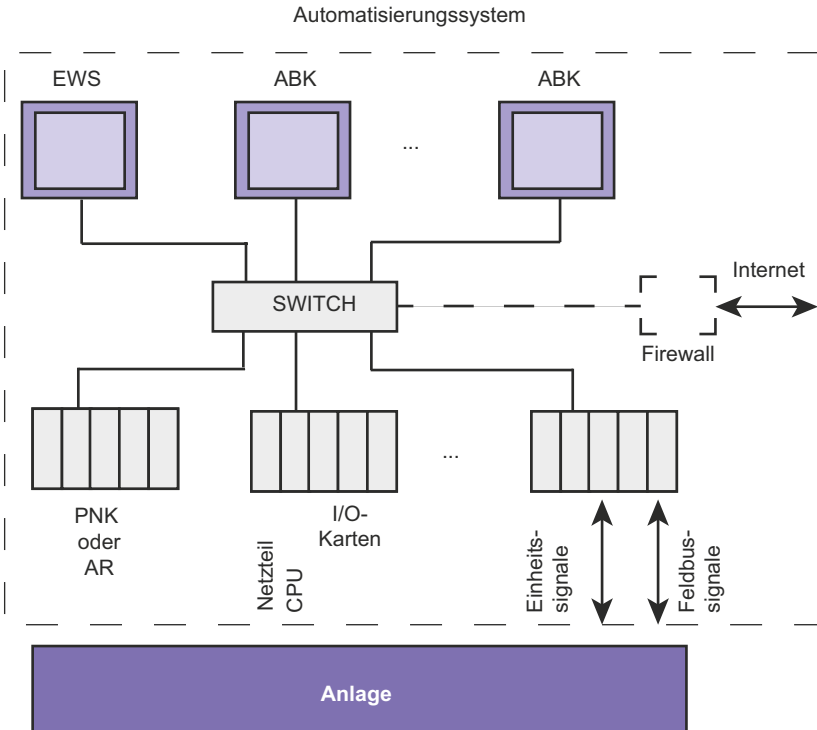


Bild 1.2 Beispielhafter Aufbau eines Automatisierungssystems  
 ABK Anzeige- und Bedienkomponente (Bedien-PC, Touch-Panel)  
 EWS Engineering Workstation (Programmier-PC)  
 PNK Prozessnahe Komponente  
 AR Automatisierungsrechner (SPS = Speicherprogrammierbare Steuerung)

Aus Bild 1.1 lassen sich unmittelbar die Themengebiete

- Messtechnik und
- Stelltechnik

ablesen. Prozessgrößen müssen gemessen werden, um diese gezielt beeinflussen zu können. Das Messen geschieht über Sensoren. Beispiele sind Temperatursensoren, Durchflusssensoren usw. Die Beeinflussung von Prozessgrößen kann wiederum nur über Stellglieder (auch **Aktoren** genannt) erfolgen. Beispiele für Stellglieder sind Ventile, Elektromotoren usw. Mess- und Stelltechnik streifen wir in diesem Buch nur kurz, indem wir lediglich die wesentlichsten Gesichtspunkte erwähnen.

In den Automatisierungsrechnern sind Algorithmen vom Automatisierungsingenieur hinterlegt, die die Anlage aufgabengemäß steuern und regeln. Infolgedessen gehören

- Steuerungen und
- Regelungen

ebenfalls zu den Fachgebieten der Automatisierungstechnik.

Betrachtet man den Aufbau der Automatisierungsrechner und die angedeuteten Verkabelungen und Vernetzungen, so ergeben sich unmittelbar die weiteren Themengebiete (Automatisierungskomponenten):

- CPU der Automatisierungsrechner
- I/O-Karten (binär und analog),
- Feldbusse und Netzwerke,
- Internet.

Der heutige Automatisierungingenieur muss also ein breites Gebiet von Themen beherrschen, wobei hier aus Gründen der Übersichtlichkeit noch nicht alle genannt sind. Der aufmerksame Leser wird wahrscheinlich bemerkt haben, dass die in Abschnitt 1.1 von [1.1] übernommene Beschreibung der Automatisierungstechnik den hier herausgearbeiteten Themen sehr nahe kommt.

Das vorliegende Buch ist wie folgt aufgebaut:

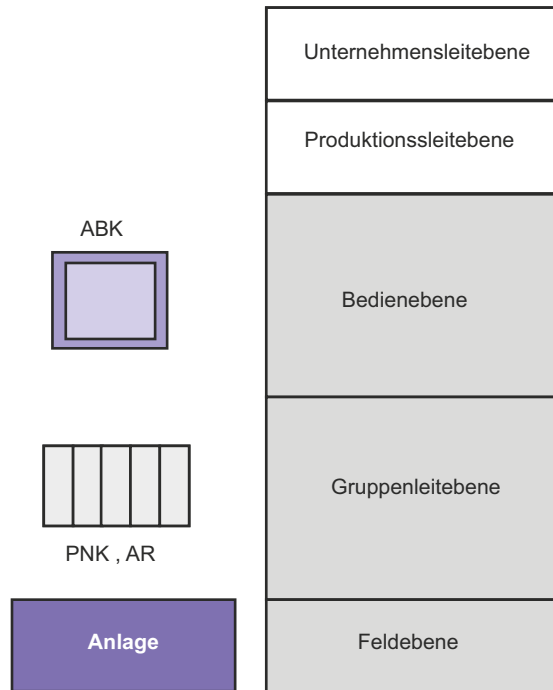
- Kapitel 2: Sensoren (kurz),
- Kapitel 3: Aktoren (kurz),
- Kapitel 4: Steuerungen,
- Kapitel 5: Automatisierungskomponenten,
- Kapitel 6: Praktische Regelungstechnik,
- Kapitel 7: Beispiele für übergeordnete Anforderungen an Automatisierungskomponenten,
- Kapitel 8: Projektierung,
- Anhang A1: Untersuchung mehrerer ARW-Maßnahmen für PID-Regler,
- Anhang A2: Die verwendeten Reglereinstellregeln,
- Anhang A3: Lösungen,
- Anhang A4: Programmierpraktika nach DIN EN 61 131-3.

Die Kapitel 2 bis 6 enthalten, ggf. in Unterkapiteln, die oben motivierten Themengebiete. Das Kapitel 7 enthält Beispiele für wichtige übergeordnete Anforderungen an Automatisierungskomponenten, wie z.B. Maschinensicherheit und Explosionsschutz. Das Kapitel 8 beschäftigt sich beispielhaft mit der Projektierung. Dort werden Themen wie Lasten- und Pflichtenheft, Betriebsmittelkennzeichnung und RI-Fließbild aufgegriffen. Die Anhänge vertiefen im Wesentlichen die Inhalte der Kapitel 2 bis 6. Der Anhang A4 ist nur als downloadbares Dokument im Netz (InfoClick) vorhanden.

Bild 1.3 zeigt die Einordnung der Geräte eines Automatisierungssystems in ein Ebenenmodell. Die dargestellte oder eine ähnliche Strukturierung ist in der Fachliteratur generell üblich. Die hinterlegten dargestellten Ebenen behandelt dieses Buch näher. Beispiele für Inhalte der restlichen Ebenen sind:

- Unternehmensleitebene: SAP,
- Produktionsleitebene: Produktionsleitrechner.

Bild 1.3  
Ein Ebenenmodell



### 1.3 Einsatzgebiete für Automatisierungssysteme

Betrachtet man die Anwendungsgebiete der Automatisierungstechnik, so lassen sich zwei wesentliche Gebiete unterscheiden:

- ❑ Anlagen des Maschinenbaus und der verfahrenstechnischen Industrie,
- ❑ Anlagen, die in großen Stückzahlen verkauft werden und keinen Änderungen unterliegen (z.B. Autos, Küchengeräte usw.).

Bei der ersten Kategorie sind die Anlagen meist sehr groß und unterliegen einem fast täglichen Änderungsbedarf. Weiterhin sind diese fast immer **Unikate**. Für diese Anlagentypen setzt man Automatisierungssysteme ein, da deren Komponenten maßgeschneidert auf die Bedürfnisse sind. Dies gestattet ein sehr effizientes Engineering. Somit kann auch der Änderungsbedarf während des laufenden Betriebs auch sehr effektiv abgewickelt werden.

Die «Anlagen» der zweiten Kategorie sind meist von sehr begrenzter Größe bzw. klein. Weiterhin gibt es erfahrungsgemäß keinen Änderungsbedarf. Hier setzt man Mikrocontroller (*embedded systems*) ein. Diese sind preisgünstig und platzsparend. Das Änderungsengineering entfällt hier.

Wir behandeln in diesem Buch die Anwendung von Automatisierungssystemen, also der ersten Kategorien der oben dargestellten Anwendungsgebiete. Man spricht hier auch salopp von **Anlagenautomatisierung**.

## 1.4 Marktzahlen für die Automatisierungstechnik

Bild 1.4 zeigt die Umsätze der Elektroindustrie in Deutschland [1.4].

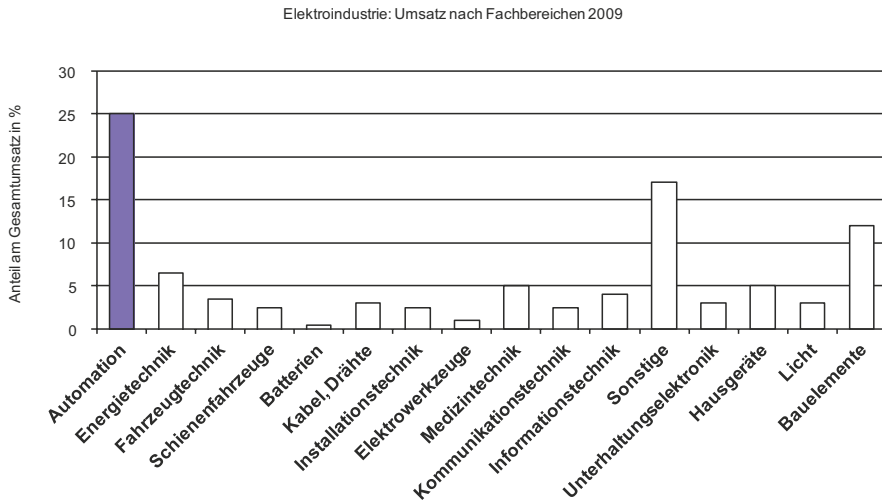


Bild 1.4 Die Umsätze der deutschen Elektroindustrie in 2009 [1.4]

Demnach sind ca. 25% der Umsätze Güter der Automatisierungstechnik. Die Automatisierungstechnik besitzt also mit Abstand den höchsten Anteil am Gesamtumsatz!

Die Elektroindustrie beschäftigt in Deutschland ca. 800 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Überschlägt man grob die davon auf die Automatisierungstechnik entfallene Zahl mit 25% (s.o.), so erhält man ca. 200 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Dies deckt sich ungefähr mit der in der Mercer-Studie [1.5] angegebenen Zahl 221 000. Die Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) des VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker) gibt die Anzahl der Beschäftigten mit 234 000 an [1.3]. Der Anteil der deutschen Automatisierungsindustrie am weltweiten Umsatz beträgt 12%!

Zum Schluss dieses Kapitels noch ein Zitat aus den GMA-Mitteilungen [1.3]:

«Die obigen Fakten zeigen, dass die Automation als Branche schon für sich stark genug ist und eine wichtige Rolle für den Industriestandort Deutschland einnimmt. Die Hersteller der Automation beweisen mit ihren Produkten, dass Automation «Made in Germany» ein Exportschlager ist.

Das ist aber nicht alles: Mit ihrer Hebelwirkung trägt die Automation entscheidend dazu bei, dass auch andere Industriezweige im weltweiten Vergleich am Standort Deutschland sehr erfolgreich sind. Automation sorgt dafür, dass die Produktion effizient ist, daher in Deutschland verbleiben kann und nicht ins Ausland verlagert wird. Nach Analysen des ZVEI (Zentralverband der elektrotechnischen Industrie) profitieren davon weitere drei Millionen Arbeitsplätze und werden Hochlohnländern wie Deutschland gesichert und geschaffen. Wichtig ist nicht nur der Quotient «Euro pro Stunde» – wichtig ist «Ergebnis pro eingesetzter Ressource».»



Diese Bemerkungen unterstreichen deutlich, dass die Automation absolut notwendig ist, um weltweit konkurrenzfähig zu bleiben. Automation ist aber kein einseitiger Arbeitsplatzvernichter, sondern trägt im Gegenteil deutlich dazu bei, dass viele Arbeitsplätze hier verbleiben. Das hohe Niveau der deutschen Automatisierungstechnik sollte nicht zu dem Schluss verleiten, dass wir konkurrenzlos sind. Die Konkurrenz ist groß! Um dieses Niveau und auch den Marktanteil zu halten, bedarf es laufender großer Anstrengungen innerhalb der technischen Berufsausbildung und der technisch orientierten Fachhochschulen und Universitäten.

## 1.5 Lernziele des Buches

Dieses Buch verfolgt die Ziele:

- ❑ Behandlung von Themen der Automatisierungstechnik aus der Sicht des **Anwenders** und nicht aus der Sicht des Entwicklers von Automatisierungssystemen,
- ❑ beispielorientierte Motivation und Vermittlung der Themen,
- ❑ Vertiefung der Themen in Beispielen und in Fragen und Übungsaufgaben nach jedem Kapitel (die Lösungen enthält Anhang A3),
- ❑ Vermittlung der praxisrelevanten und interdisziplinären Grundlagen der wesentlichen Themen der Automatisierungstechnik,
- ❑ beispielorientierte Vermittlung der programmtechnischen Umsetzung von Automatisierungsproblemen in Programmierpraktika (im downloadbaren Anhang A4 enthalten).

Hier noch ein Hinweis zur Kennzeichnung von Normen. Um den Schreib- und Leseaufwand zu minimieren, werden vorzugsweise Normen nicht mit DIN EN ... bezeichnet, sondern nur mit EN ...



## 2 Sensoren

Um eine Anlage automatisieren zu können, müssen die relevanten Größen (z.B. Temperaturen, Durchflüsse, Drücke, Positionen) durch Sensoren gemessen werden. Deshalb müssen wir uns mit der Thematik «elektrisches Messen nicht-elektrischer Größen» beschäftigen.

Dieses Kapitel beschränkt die Thematik auf die wesentlichsten Aspekte. Eine erschöpfende Behandlung ist nur in einer separaten Vorlesung möglich. Vertiefungen kann der Leser z.B. in [2.1, 2.2 und 2.3] finden.

### 2.1 Analoge Sensoren

Analoge Sensoren messen eine physikalische Aufgabengröße  $x$  (z.B. einen Druck) stetig innerhalb eines Messbereichs. Innerhalb dieses Messbereichs bildet der Sensor den Wert von  $x$  stetig auf ein elektrisches Einheitssignal  $e$  ab. Bild 2.1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Sensors im Wirkungsplan.

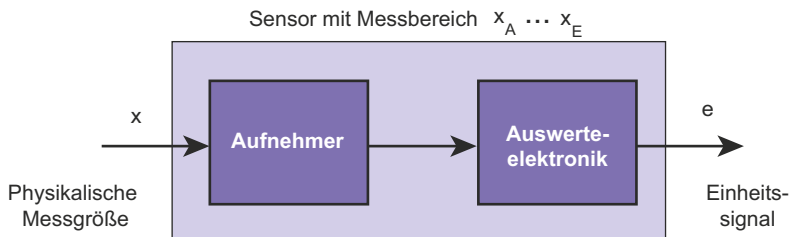


Bild 2.1 Grundsätzlicher Aufbau eines analogen Sensors

Der Sensor besitzt einen Messbereich:

- Messbereichsanfang  $x_A$  (z.B.  $x_A = 0$  mbar bei einem Drucksensor),
- Messbereichsende  $x_E$  (z.B.  $x_E = 1000$  mbar bei einem Drucksensor).

Innerhalb dieses Messbereichs bildet die Auswertelektronik die physikalische Messgröße  $x$  linear auf ein elektrisches Einheitssignal  $e$  ab. Das elektrische Einheitssignal  $e$  besitzt ebenfalls einen Einheitssignalanfang  $e_A$  und ein Einheitssignalsende  $e_E$ . Beispiele für Einheitssignale sind (DIN IEC 60 381-1,2):

- $e_A = 0$  V,  $e_E = 10$  V,
- $e_A = 0$  mA,  $e_E = 20$  mA,
- $e_A = 4$  mA,  $e_E = 20$  mA.

Bild 2.2 veranschaulicht den linearen Zusammenhang zwischen physikalischer Messgröße  $x$  und dem Einheitssignal  $e$ .

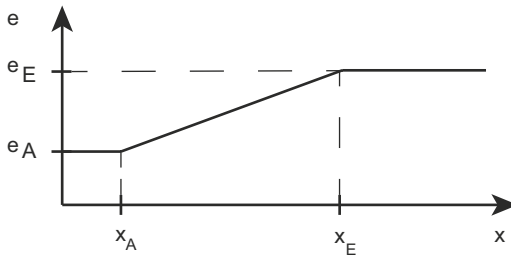


Bild 2.2  
Zusammenhang zwischen  
physikalischer Messgröße  $x$  und  
Einheitssignal  $e$

Aus Bild 2.2 lassen sich die folgenden Zusammenhänge (Gln. 2.1,2.2) zwischen  $x$  und  $e$  unmittelbar ableiten. Diese Zusammenhänge gelten natürlich nur innerhalb des linearen Bereichs.

$$x = x_A + (x_E - x_A) \frac{e - e_A}{e_E - e_A} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

$$e = e_A + (e_E - e_A) \frac{x - x_A}{x_E - x_A} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Zur Weiterverarbeitung auf einem Automatisierungsrechner verdrahtet man das elektrische Einheitssignal  $e$  auf einen Eingang einer analogen I/O-Karte. Der dort integrierte Analog-Digital-Wandler liest das Signal in den Automatisierungsrechner ein. Über Gl. 2.1 kann man innerhalb des Automatisierungsrechners wieder auf physikalische Einheiten umrechnen. Diese Umrechnung wird z.B. für die Anzeige des physikalischen Wertes von  $x$  auf einem Bedienbildschirm benötigt.

Für den Anwender hat die Verwendung von Einheitssignalen den großen Vorteil, dass eine genormte Schnittstelle vorliegt. Daher kann ohne Probleme ein Sensor eines anderen Herstellers zum Einsatz kommen, der den identischen Messbereich und das gleiche Einheitssignal besitzt. Der Anwender ist damit herstellerunabhängig. Aus diesem Grund sind die Einheitssignale vor langer Zeit eingeführt worden.

Die Einheitssignale, die einen von 0 V bzw. 0 mA verschiedenen Anfangswert besitzen (man spricht auch von einem live-zero), haben die Vorteile der

- Drahtbruchererkennung,
- Spannungsversorgung des Sensors über die beiden Signalleitungen.

Der letzte Punkt hat zur Folge, dass der Sensor nur mit zwei Anschlüssen verdrahtet werden muss. Damit können die ansonsten notwendigen zusätzlichen zwei Versorgungsleitungen eingespart werden. Bild 2.3 veranschaulicht diesen Aspekt für das Einheitssignal 4...20 mA.

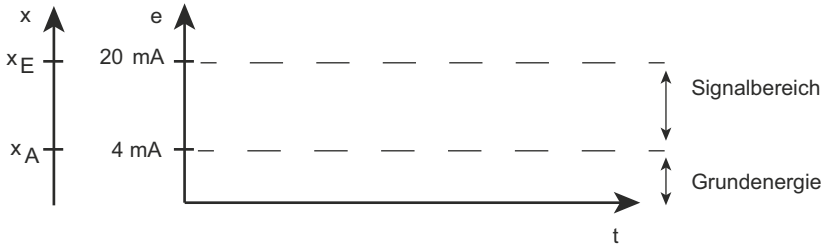


Bild 2.3 Bedeutung des Einheitssignalsbereichs 4...20 mA

Neben der hier dargestellten klassischen Einheitssignaltechnik werden heutzutage oft Sensoren mit Busanschluss eingesetzt (z.B. PROFIBUS-PA, FOUNDATION FIELDBUS). Der im Bustelegramm enthaltene Zahlenwert der Messgröße liegt dann z.B. direkt in physikalischen Einheiten vor.

Bild 2.4 zeigt den Aufbau eines analogen Sensors am Beispiel eines Temperatursensors. Der Temperatursensor ist als Widerstandsthermometer aufgeführt.

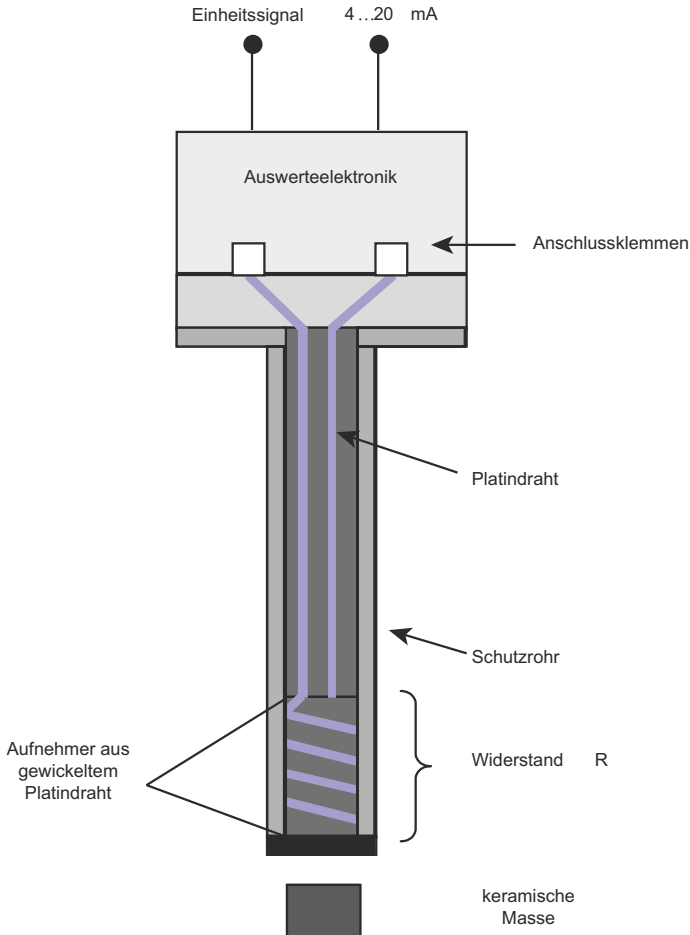


Bild 2.4 Prinzipieller Aufbau eines Widerstandsthermometers

Der Aufnehmer ist der temperaturabhängige Widerstand  $R(T)$  einer Platinwicklung. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes ist bei Platin sehr gut reproduzierbar und wird durch die Beziehung

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$$

$$\alpha = \frac{3,91 \cdot 10^{-3}}{^{\circ}\text{C}}, \beta = \frac{5,78 \cdot 10^{-7}}{^{\circ}\text{C}^2} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

beschrieben.  $R_0$  ist der Wert des Widerstandes bei  $0^{\circ}\text{C}$ . Am häufigsten trifft man den Wert  $R_0 = 100 \Omega$  an. Man spricht dann auch von einem Pt-100-Temperatursensor. Die Auswertelektronik misst den Widerstand  $R$  und errechnet über Gl. 2.3 die Temperatur  $T$ . Entsprechend des vorgegebenen Messbereichs wird von der Auswertelektronik gemäß Gl. 2.2 das Einheitssignal  $e$  ausgegeben, das hier beispielhaft 4...20 mA ist.

## 2.2 Binäre Sensoren

Binäre Sensoren messen die Aufgabengröße (z.B. Position, Füllstand usw.) binär, d.h. zweiwertig. Ein binärer Füllstandssensor gibt z.B. 24 V Gleichspannung ab, wenn der Füllstand den Sensor bedeckt, ansonsten gibt er 0 V ab. Für die binäre Messung von Positionen zeigen die Bilder 2.5 bis 2.7 Beispiele.

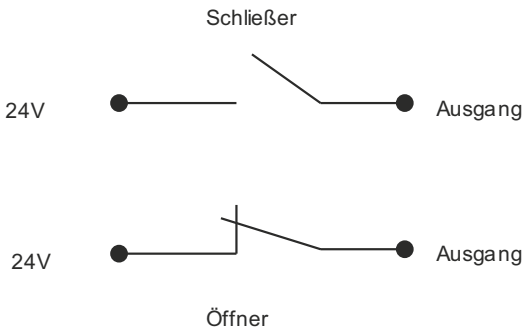


Bild 2.5  
Endschalter



### Merksatz

Endschalter mit den Ausführungsformen «Schließer» bzw. «Öffner» arbeiten nicht berührungslos. Beide werden im nicht betätigten Zustand dargestellt. Schließer kennzeichnet man auch durch die Abkürzung NO (*normally open*) und Öffner durch NC (*normally closed*).



### Merksatz

Der Initiator misst berührungslos die Position einer beweglichen Metallfahne. Diese bedämpft ein hochfrequentes Magnetfeld und löst somit in der Auswertelektronik einen Schaltvorgang aus.

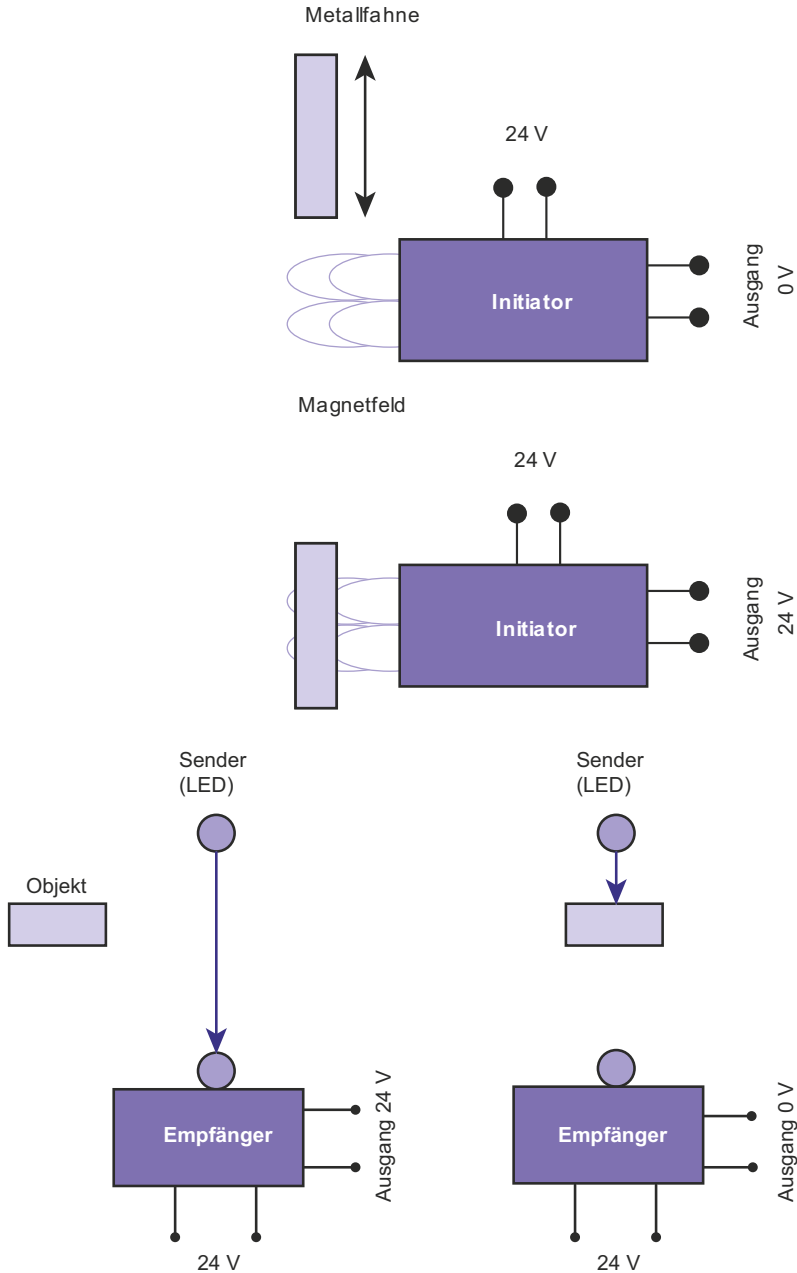
Bild 2.6  
Initiator

Bild 2.7 Lichtschranke

**Merksatz**

Die Lichtschranke arbeitet ebenfalls berührungslos. Sender und Empfänger müssen nicht notwendigerweise nahe beieinander positioniert sein, so dass auch die Position größerer Objekte binär gemessen werden kann, ohne dass diese besonders dafür ausgerüstet sein müssen.



## Verständnisfragen und Aufgaben

Die Lösungen sind im Anhang zu finden.

### Frage 2.1

Bilden analoge Sensoren die Messgröße  $x$  linear auf das Einheitssignal ab?

### Frage 2.2

Warum verwendet man Einheitssignale?

### Frage 2.3

Welche Vorteile bietet das Einheitssignal 4...20 mA?

### Frage 2.4

Ein Durchflusssensor besitzt den Einheitssignalebereich 0...10 V. Die physikalische Messgröße  $x$  beträgt 5 m<sup>3</sup>/h. Können Sie etwas über die Größe des zugehörigen Einheitssignals  $e$  sagen?

### Aufgabe 2.1

Gegeben ist ein Temperatursensor. Der Einheitssignalebereich sei 4...20 mA und der Messbereich 0...200 °C. Am Sensorausgang wird das Einheitssignal 10 mA gemessen. Wie groß ist die physikalische Messgröße  $x$ ?

### Aufgabe 2.2

Gegeben ist ein Temperatursensor. Der Einheitssignalebereich sei 0...20 mA und der Messbereich 0...200 °C. Am Sensorausgang wird das Einheitssignal 10 mA gemessen. Wie groß ist die physikalische Messgröße  $x$ ?

### Aufgabe 2.3

Ein Temperatursensor hat den Messbereich von -20...+80 °C. Der Einheitssignalebereich sei 4...20 mA. Die physikalische Messgröße  $x$  beträgt 10 °C. Wie groß ist das Einheitssignal  $e$ ?



## 3 Aktoren

Dieses Kapitel beschränkt die Thematik «Aktorik» auf die wesentlichsten Aspekte. Eine erschöpfende Darstellung kann nur in zwei separaten Vorlesungen über Pneumatik/Hydraulik und elektrische Antriebe erfolgen. Vertiefungen kann der Leser z.B. in [3.1, 3.2, 2.2, 2.3, 3.3] finden.

Über Aktoren, auch Stellglieder oder Stelleinrichtung genannt, kann das Automatisierungssystem in eine Anlage eingreifen, um dort Aufgabengrößen gezielt zu beeinflussen.

Beispiele für Aktoren sind:

- Auf-Zu-Ventil,
- Ein-Aus-Elektromotor,
- Regelventil,
- Elektromotor mit Frequenzumrichter.

Die ersten beiden Beispiele stehen für unstetige wirkende Aktoren. Die letzten beiden Beispiele stehen für stetig verstellbare Aktoren.

Bei den Aktoren unterscheiden wir grob in

- Ventile,
- Elektromotoren.

### 3.1 Ventile

Zunächst behandeln wir unstetig wirkende Ventile, insbesondere so genannte Wegeventile.

Wegeventile steuern z.B. den Durchgang von Luftströmen, indem die Durchlassrichtung gesperrt oder geöffnet wird. Wir beschränken uns hier auf das Stellen von Luftströmen.

#### Definition

Ein **Wegeventil** wird kurz durch eine Zahlencode charakterisiert, der durch

- die erste Ziffer die Anzahl der pneumatischen Anschlüsse pro Kammer,
- die zweite Ziffer die Anzahl der Schaltstellungen

angibt. Die Anzahl der Schaltstellungen ist wiederum identisch mit der Anzahl der Kammern.

Hier werden die Beispiele kurz anschaulich behandelt:

- 3/2-Wege-Ventil,
- 4/2-Wege-Ventil,



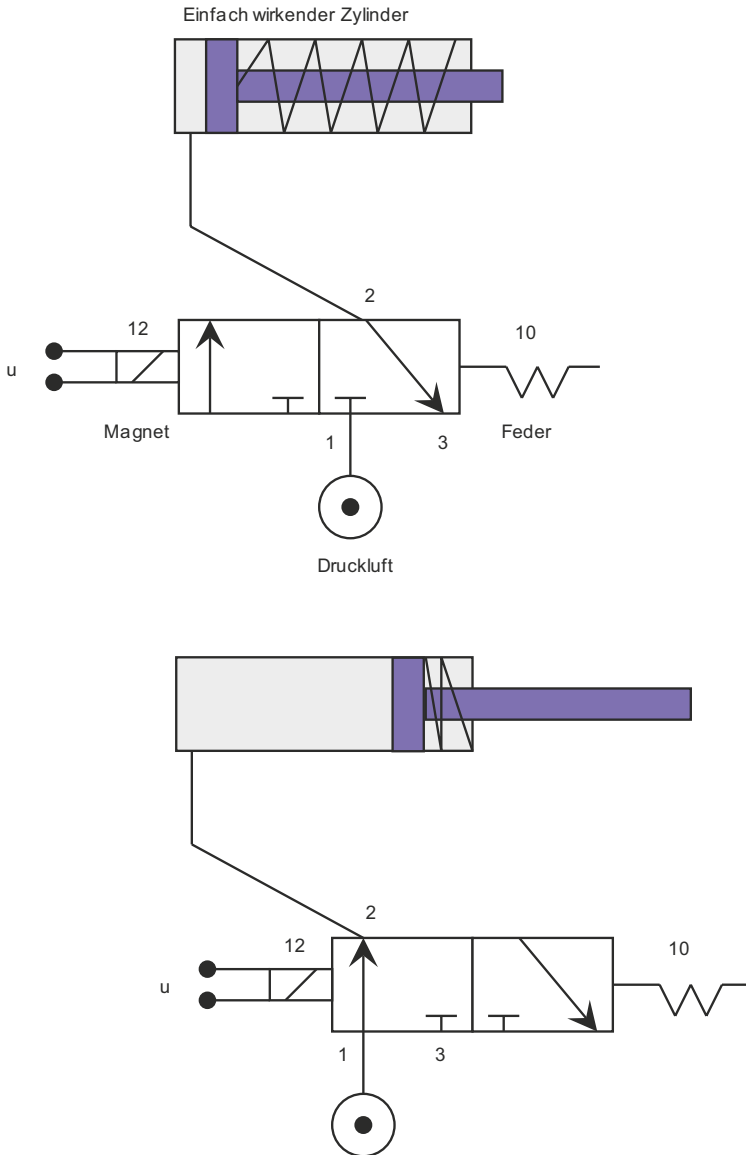


Bild 3.1 3/2-Wege-Ventil mit einem einfach wirkenden Zylinder

Bild 3.1 zeigt das Beispiel eines 3/2-Wege-Ventils mit einfach wirkendem Zylinder. «Einfach wirkend» bedeutet, dass eine Rückstellfeder vorhanden ist und somit nur eine Stellung durch die Steuerung aktiv beeinflusst werden kann.

Das abgebildete 3/2-Wege-Ventil wird elektrisch über einen Magneten angesteuert und besitzt eine Federrückstellung. Weiterhin sind zwei Kammern vorhanden. Die Anzahl der Kammern entspricht der Anzahl der Schaltstellungen. Jede Kammer besitzt drei pneumatische Anschlüsse. Bei der Charakterisierung eines Wegeventils durch einen Zahlencode wird zuerst die Anzahl der pneumatischen Anschlüsse pro Kammer genannt (hier 3) und danach die Anzahl der Schaltstellungen (hier 2). Daraus resultiert die Bezeichnung

3/2-Wege-Ventil. Die Zahl 12 über dem Magneten benennt diejenigen pneumatischen Anschlüsse, die beim Aktivieren des Magneten für die Druckluft verbunden werden. Die Zahl 10 über der Feder bedeutet, dass der pneumatische Anschluss 1 im spannungslosen Zustand gesperrt ist. Die Betätigung des Zylinders erfolgt durch das Aufschalten einer Spannung auf den Magneten, wodurch über die Anschlüsse 1 und 2 Druckluft in den Zylinder strömt. Beim Abschalten der Spannung entweicht die Druckluft über die Anschlüsse 2 und 3. Über die Rückstellfeder nimmt der Zylinder wieder die Ruhelage ein. Das 3/2-Wege-Ventil besitzt kein speicherndes Verhalten, d.h., wenn die Spannung abgeschaltet wird, dann nimmt das Wegeventil wieder die ursprüngliche Stellung ein.

Bild 3.2 zeigt das Beispiel eines 4/2-Wege-Ventils mit elektrischer Ansteuerung über zwei Magnete. Das Wegeventil steuert einen doppelt wirkenden Zylinder an. «Doppelt wirkend» bedeutet, dass die Steuerung beide Stellungen des Zylinders aktiv beeinflussen kann.

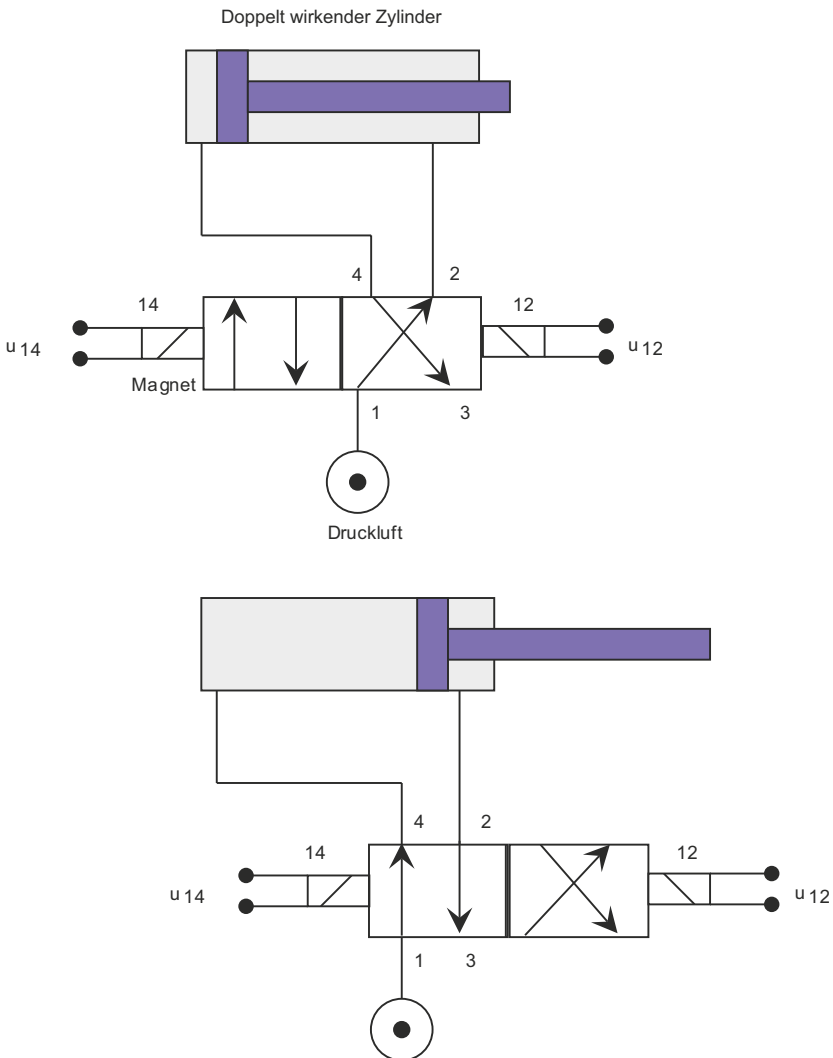


Bild 3.2 4/2-Wege-Ventil mit doppelt wirkendem Zylinder

Die Zahlen über den Magneten kennzeichnen wiederum diejenigen pneumatischen Anschlüsse, die beim Einschalten der Spannung des Magneten für die Druckluft durchgeschaltet werden. Wir schließen hier aus, dass beide Magnete gleichzeitig angesteuert sind. Nach der Beschreibung des 3/2-Wege-Ventils ist die Funktionsweise des 4/2-Wege-Ventils anhand des Bildes 3.2 selbsterklärend. Das 4/2-Wege-Ventil hat im Gegensatz zum 3/2-Wege-Ventil speichernden Charakter, d.h., seine Stellung bleibt beim Abschalten der Spannung erhalten. Ähnliches trifft natürlich auch auf den angeschlossenen Zylinder zu.

Damit sind die wesentlichen «unstetigen» Ventile kurz behandelt worden. Für das weitere Verständnis dieses Buches ist dies ausreichend.

Bild 3.3 zeigt beispielhaft den prinzipiellen Aufbau eines stetig wirkenden Ventils.

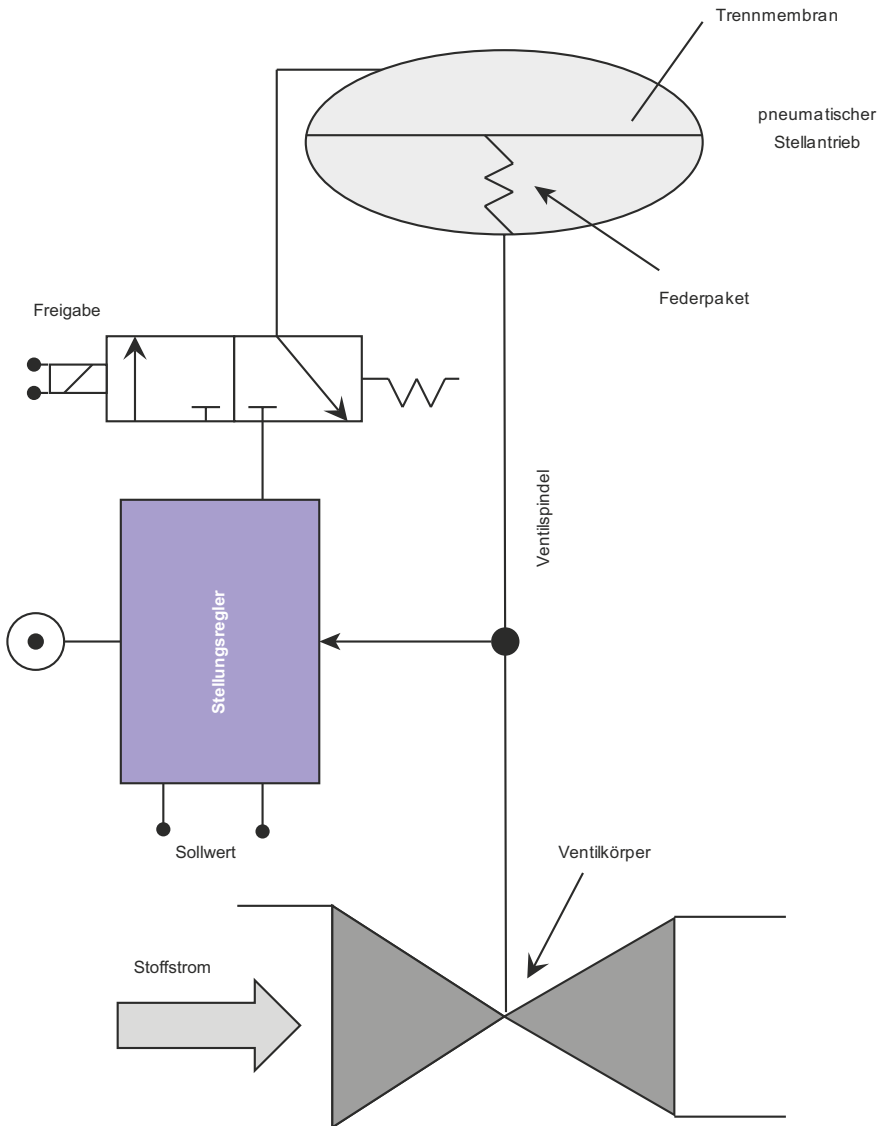


Bild 3.3 Prinzipbild eines stetig wirkenden Ventils

Ein solches Ventil wird auch als Regelventil bezeichnet, da es meistens als Stellglied in Regelkreisen zur stetigen Beeinflussung eines Stoffstroms eingesetzt wird. Das Regelventil besteht im Wesentlichen aus

- ❑ einem **Stellungsregler**,
- ❑ einem 3/2-Wege-Ventil,
- ❑ einem Stellantrieb,
- ❑ einem **Ventilkörper**.

Der Stellungsregler misst über einen Aufnehmer die Istposition der **Ventilspindel** und vergleicht diese mit dem über ein Einheitssignal vorgegebenen Sollwert. Dieser Sollwert kann auch über ein Bussystem vorgegeben werden. Bei Abweichungen von Ist- und Sollwert korrigiert der Stellungsregler automatisch so lange die Position der Spindel, bis keine Abweichung mehr vorhanden ist. Das «Stellglied» des Stellungsreglers ist ein elektropneumatischer Antrieb, der in Bild 3.3 nicht detailliert dargestellt ist.

Der Stellantrieb ist hier als pneumatischer Antrieb ausgeführt, da dieser am häufigsten vorkommt. Es gibt natürlich auch elektrische Stellantriebe. Über das Federpaket wird dem Ventil eindeutig eine energielose Stellung aufgeprägt. Die energielose Stellung nennt man auch «Sicherheitsstellung». In dem abgebildeten Beispiel ist die energielose Stellung «auf», was zum Beispiel für ein Kühlwasserventil sinnvoll wäre. Befindet sich das Federpaket oberhalb der Trennmembran, so ist die energielose Stellung «zu», was z.B. für ein Dampfventil sinnvoll wäre.

Das 3/2-Wege-Ventil dient zur Freigabe des pneumatischen Stellantriebs. Schaltet man die Spannung des Wegeventils ab, so geht das Regelventil in die vorgegebene Sicherheitsstellung.

Die maximale Durchflusskapazität (d.h. bei vollem Hub) eines stetigen Ventils wird durch den so genannten  $K_{VS}$ -Wert charakterisiert, der neben dem Nenndurchmesser DN der Rohrleitung bei der Bestellung angegeben werden muss.

### Definition

Der  $K_{VS}$ -Wert ist derjenige Durchfluss von Wasser in  $\text{m}^3/\text{h}$ , der durch ein voll geöffnetes Ventil fließt, wenn am Ventil eine Druckdifferenz von 1 bar anliegt.

Der Automatisierungingenieur muss den notwendigen  $K_{VS}$ -Wert berechnen, worauf wir hier nicht näher eingehen, sondern z.B. auf [3.3] verweisen.

## 3.2 Elektromotor

In der Industrie werden Drehstrommotoren sehr oft eingesetzt. Am häufigsten trifft man den Drehstrom-Asynchronmotor (kurz Asynchronmotor) an. Bild 3.4 zeigt oben plakativ den prinzipiellen Aufbau eines Asynchronmotors mit Käfigläufer (Rotor) und unten eine aufgeschnittene Darstellung des Motors. Da der Läufer keine Schleifkontakte besitzt, ist dieser Motor sehr robust und wartungsarm.

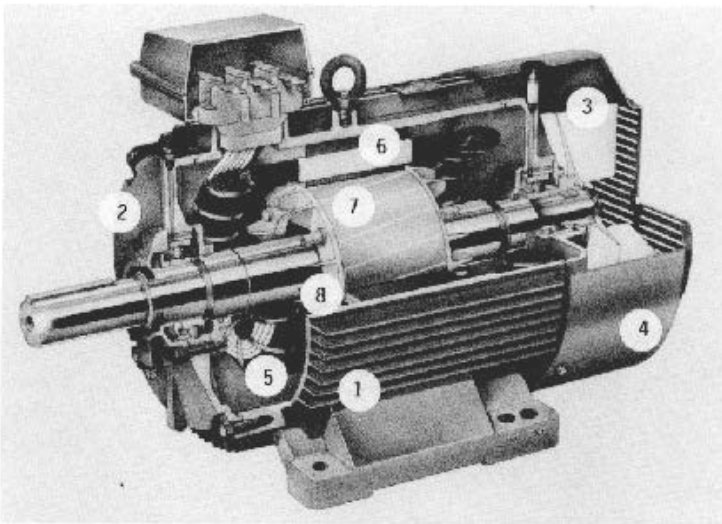
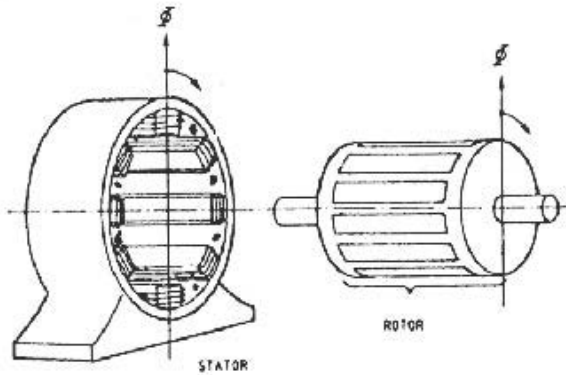


Bild 3.4 Prinzipieller Aufbau eines Asynchronmotors [3.4]

- 1 Gehäuse mit Kühlrippen
- 2 Lagerschilde
- 3 Lüfter
- 4 Lüfterhaube
- 5 Ständerwicklung
- 6 Ständerblechpaket
- 7 Läuferblechpaket
- 8 Ringe des Läuferkäfigs

Das Magnetfeld des Ständers (Stator) induziert im Läufer Ströme, wodurch ein Drehmoment auf den Läufer wirkt. Sofern keine Last und keine Reibung vorhanden sind, beschleunigt der Läufer so lange, bis er die so genannte synchrone Drehzahl  $n_s$  erreicht hat. Diese berechnet sich aus

$$n_s = 60 \frac{f_N}{p} \text{ min}^{-1}$$

wobei  $f_N$  die Netzfrequenz und  $p$  die Polpaarzahl sind. Für  $f_N = 50$  Hz zeigt Tabelle 3.1 beispielhaft synchrone Drehzahlen.