

WISSEN AUSFÜHRLICH

rexroth
A Bosch Company

Mechatronik

in Theorie und Praxis



Wissen ausführlich

Mechatronik in Theorie und Praxis

Impressum

Wissen ausführlich

Mechatronik in Theorie und Praxis

Herausgeber

Bosch Rexroth AG
Bosch Rexroth Academy
Unterdürnbacher Straße 10
97080 Würzburg, Deutschland

Autoren:

Dr.-Ing. Hans-Joachim Koriath
Dipl.-Ing. Matthias Römer

Wir übernehmen keine Haftung für die Übereinstimmung des Inhalts mit den jeweils geltenden gesetzlichen Vorschriften.
Änderungen vorbehalten.

Version 5.0
5. Auflage (2022)
Materialnummer: R901560710
ISBN: 978-3-9820731-1-8

Die angegebenen Daten dienen allein der Produktbeschreibung.
Aufgrund stetiger Weiterentwicklung unserer Produkte kann eine Aussage über eine bestimmte Beschaffenheit oder eine Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Die Angaben entbinden den Verwender nicht von eigenen Beurteilungen und Prüfungen. Es ist zu beachten, dass unsere Produkte einem natürlichen Verschleiß- und Alterungsprozess unterliegen. Abbildungen sind beispielhaft und können vom Originalprodukt abweichen.

Vorwort

„Mechatronik“ ist ein übergreifendes technisches Wissensgebiet, das sich mit komplexen Systemen beschäftigt, die aus der Verschmelzung von

- ▶ Maschinenbau,
- ▶ Elektrik/Elektronik und
- ▶ Informatik

entstanden sind.

Zur optimalen Projektierung, Gestaltung und Wartung eines komplexen Systems ist ganzheitliches Denken und Handeln erforderlich. Dazu gehören auch die Aspekte Sicherheit, Umweltschutz sowie EU-Richtlinien.

Das Buch „Mechatronik in Theorie und Praxis“ vermittelt das erforderliche Breitenwissen zur Projektierung, Inbetriebnahme und Diagnose mechatronischer Systeme und enthält folgende Schwerpunkte:

- ▶ Komponenten mechatronischer Systeme
- ▶ Energieerzeugung und -transport
- ▶ Pneumatische, hydraulische und elektrische Antriebstechnik
- ▶ Sensorik und Steuerungstechnik
- ▶ Programmierung und Dokumentation
- ▶ Sicherheitstechnik und Richtlinien
- ▶ Systematische Inbetriebnahme und Fehlerdiagnose
- ▶ Industrie 4.0

Ergänzend zu diesem Buch bietet die Bosch Rexroth AG maßgeschneiderte Trainings und Trainingssysteme an.

Bosch Rexroth Academy

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	
1 Arbeitsgebiet Mechatronik	11
1.1 Berufliche Anforderungen.....	11
1.2 Was ist Mechatronik?	12
1.3 Grundstruktur mechatronischer Systeme	13
1.3.1 Prinzipieller Aufbau.....	13
1.3.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme	15
1.3.3 Funktionsbegriff in der Mechatronik.....	16
1.4 Grundlagen der Elektrotechnik.....	17
1.4.1 Elektrizität.....	17
1.4.2 Magnetismus	18
1.4.3 Physikalische und technische Begriffe.....	19
1.4.4 Elektrische Grundgrößen: Stromstärke, Spannung und Widerstand	21
1.4.5 Ohmsches Gesetz	21
1.5 Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik.....	24
1.5.1 Gleichstrommotor	24
1.5.2 Wechselstrom-/Drehstrommotor	24
1.5.3 Elektroschaltplan	25
1.5.4 Vor- und Nachteile der Elektrotechnik	28
1.6 Grundlagen der Pneumatik.....	29
1.6.1 Pneumatikzylinder.....	29
1.6.2 Drehzahl- und Drehmomentbereiche von Pneumatikmotoren	30
1.6.3 Pneumatischer Wirkschaltplan	30
1.6.4 Vor- und Nachteile der Pneumatik	32
1.7 Grundlagen der Hydraulik	33
1.7.1 Hydrozylinder	33
1.7.2 Hydromotoren	34
1.7.3 Elektrohydraulischer Wirkschaltplan	35
1.7.4 Vor- und Nachteile der Hydraulik.....	36
1.8 Vergleich der Stellglieder (elektrisch, pneumatisch, hydraulisch)	38
1.9 Energieversorgung und -umwandlung.....	41
1.9.1 Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie.....	41
1.9.2 Erzeugung und Übertragung pneumatischer Energie	42
1.9.3 Erzeugung und Übertragung hydraulischer Energie	43
1.10 Energiespeicherung und -transport	44
1.10.1 Energiespeicherung.....	44
1.10.2 Energietransport	45
1.10.3 Eigenschaften und Anforderungen an Medien der Energieübertragung	47
1.10.4 Vergleich der Antriebstechniken (elektrisch, pneumatisch, hydraulisch)	48
2 Überblick zur Steuerungstechnik	49
2.1 Grundlagen der Steuerungstechnik	49
2.1.1 Aufbau einer Steuerung.....	49
2.2 Grundlagen der Regelungstechnik.....	50
2.2.1 Aufbau eines Regelkreises.....	50
2.2.2 Unstetige Regler	51
2.2.3 Stetige Regler.....	51

2.3	Signalaufbereitung und Sensorik.....	53
2.3.1	Signalformen.....	53
2.3.2	Signaleingabe.....	53
2.3.3	Optische Meldegeräte	59
2.4	Steuerung und Signalverarbeitung.....	60
2.4.1	Signalglieder	60
2.4.2	Steuerglieder	61
2.5	Komponenten speicherprogrammierbarer Steuerungen.....	64
2.5.1	Aufbau einer SPS	64
2.5.2	Programmierung einer SPS	65
2.5.3	Boolesche Algebra	67
2.5.4	Standard-Steuerungen im Vergleich.....	70
2.6	Komponenten numerischer Steuerungen.....	73
2.7	Komponenten von Robotersteuerungen.....	74
2.7.1	Programmierung von Robotersteuerungen	75
2.8	Kriterien für die Auswahl von Steuerungssystemen	76
3	Darstellung der Funktionen mechatronischer Systeme	77
3.1	Ablaufbeschreibung.....	77
3.1.1	Verbale Ablaufbeschreibung.....	77
3.1.2	Ablaufbeschreibung in der Schaltalgebra.....	77
3.2	Graphische Ablaufbeschreibung.....	78
3.2.1	Programmablaufplan	78
3.2.2	Logikplan	79
3.2.3	Weg-Schritt-Diagramm	80
3.2.4	GRAFCET	80
3.3	Von der Aufgabenstellung zum SPS-Programm in Ablaufsprache.....	85
3.4	Notwendige Dokumentation eines Mechatronik-Systems.....	89
4	Sicherheit komplexer Systeme	93
4.1	Einführung.....	93
4.2	Sicherheit und Zuverlässigkeit.....	96
4.2.1	Begriffsfestlegungen.....	96
4.2.2	Zuverlässigkeit von komplexen Systemen	98
4.3	Sicherheitstechnik.....	99
4.3.1	Sachbereiche	99
4.3.2	Unterscheidung der Sicherheitstechniken nach DIN 31000	99
4.3.3	Technische Lösungsprinzipien	103
4.4	Gesetzliche Vorgaben zu Sicherheit und Zuverlässigkeit	105
4.5	Richtlinie über Druckgeräte.....	106
4.6	Richtlinie über einfache Druckbehälter	109
5	CE-gerechte Maschinensteuerungen, Maschinenrichtlinie	111
5.1	Schutzziele von EU-Richtlinien	111
5.2	Konformitätserklärung (CE-Kennzeichnung) oder Einbauerklärung.....	114
5.3	Der Weg zur CE-Kennzeichnung.....	114
5.4	Leitfaden zur Maschinenrichtlinie	115
5.4.1	Bestimmungsgemäße Verwendung	116
5.5	Sicherheitsfunktionen	117
5.6	Dynamik der Maschinensicherheit.....	119
5.7	Risikoanalyse.....	120
5.7.1	Risikobewertung.....	122

5.8	Sicherheit hydraulischer Anlagen	125
5.8.1	Grundregeln für Entwurf und Auslegung bezüglich Gefährdungen	125
5.8.2	Besondere Anforderungen	126
5.8.3	Absicherung des Hydrauliksystems.....	130
5.8.4	Handsteuerungen	132
5.8.5	Sicherheitsgrundsätze	133
5.9	Hydrospeicher in Hydrauliksystemen	134
5.9.1	Allgemeine Anforderungen	134
5.9.2	Schaltungsbeispiele mit Hydrospeicher	135
5.10	Sicherheit pneumatischer Anlagen	137
5.10.1	Grundregeln für Entwurf und Auslegung bezüglich Gefährdungen	137
5.10.2	Besondere Anforderungen	138
5.10.3	Absicherung des Pneumatiksystems	140
5.10.4	Handsteuerungen	141
5.10.5	Sicherheitstechnische Anforderungen an pneumatische Spannvorrichtungen	142
6	Sicherheit elektrischer Anlagen: Niederspannungsrichtlinie, EMV-Richtlinie	145
6.1	Das 3-Stufen-Konzept: vermeiden – schützen – hinweisen	145
6.2	Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen	145
6.3	Zweihandschaltung	149
6.4	Verriegelungseinrichtungen	152
6.5	Sicherheit elektrischer Anlagen	156
6.5.1	Sicherheitsschaltungen	156
6.5.2	Sicherheitsschaltungen	156
6.5.3	Grundsaltungen zur Verbesserung der Funktionssicherheit	157
6.5.4	Arbeits- und Ruhestromschaltung	161
6.6	Bestimmungen für elektrische Ausrüstungen von Industriemaschinen	163
6.7	Schutz des Elektromotors	164
6.8	Absicherung der Steuerstromkreise	166
6.8.1	Steuerspannung für wechsellspannungsbetätigte Komponenten	166
6.8.2	Steuerspannung für gleichspannungsbetätigte Komponenten	169
6.9	Schaltgerätea Auswahl	170
6.10	Niederspannungsrichtlinie	172
6.11	EMV-Richtlinie	173
6.12	Unfallschutz – Umgang mit elektrischen Anlagen	174
6.12.1	Schutz gegen Unfälle durch elektrischen Schlag	174
6.12.2	Schutz gegen direktes Berühren	176
6.12.3	Schutz gegen indirektes Berühren	176
6.12.4	Die fünf Sicherheitsregeln	179
6.12.5	Erste Hilfe bei elektrischen Unfällen	180
7	Feldbusse	181
7.1	Entwicklung der Feldbusse	181
7.2	Verbreitung und Normung von Feldbussen	182
7.2.1	ISO/OSI-Referenzmodell	182
7.3	Eignung von Feldbussen	183
7.4	Profibus	184
7.4.1	Zugriffverfahren	184
7.5	AS-Interface	185
7.6	Sercos	187
7.6.1	Topologie	188

8	Inbetriebnahme von komplexen Systemen	189
8.1	Allgemeine Richtlinien zur Inbetriebnahme (IBN)	189
8.1.1	Ist-Zustand der Inbetriebnahme	189
8.1.2	Rationalisierung im Vorfeld der Inbetriebnahme	190
8.1.3	Ziele der Standardisierung für die Inbetriebnahme	191
8.2	Inbetriebnahmegerechte Produktstrukturierung	192
8.3	Methodik zur inbetriebnahmegerechten Produktstrukturierung	193
8.4	Geeignete Unterlagen für die Anforderungsanalyse	194
8.4.1	Prinzipskizze	195
8.4.2	Ablaufdiagramm	196
8.4.3	GRAFCET	197
8.5	Allgemeine Hinweise zur Durchführung der Inbetriebnahme an hydraulischen, pneumatischen und elektrischen Anlagen	198
8.5.1	Inbetriebnahme von hydraulischen Anlagen	198
8.5.2	Inbetriebnahme von pneumatischen Anlagen	201
8.5.3	Inbetriebnahme von elektrischen Maschinen	203
8.5.4	Inbetriebnahme von speicherprogrammierbaren Steuerungen	205
9	Fehlersuche bei der Inbetriebnahme von komplexen Systemen	207
9.1	Begriffsbestimmung nach DIN 31051	207
9.2	Schadensklassen	208
9.3	Einteilung der Fehler und Schadensursachen	208
9.3.1	Inbetriebnahmefehler	208
9.3.2	Bauteilfehler	208
9.4	Methodik der Fehlersuche	209
10	Fehlersuche bei der Inbetriebnahme in den Teilsystemen	211
10.1	Inbetriebnahmefehler im Leistungsteil	211
10.1.1	... bei elektrohydraulischen Teilsystemen	211
10.1.2	... bei elektropneumatischen Teilsystemen	215
10.1.3	... bei elektrischen Teilsystemen	218
10.2	Inbetriebnahmefehler im Signalteil	220
10.2.1	... bei Einsatz von Sensoren	220
10.2.2	... bei Einsatz von speicherprogrammierbaren Steuerungen	221
11	Hilfsmittel zur Fehlersuche und Fehlereingrenzung	223
11.1	Fehlersuche mit Plänen	223
11.1.1	Programmablaufplan	223
11.1.2	GRAFCET	224
11.1.3	Wirkschaltpläne	225
11.2	Fehlersuche im Steuerstromkreis	227
11.3	Fehlersuche mit SPS	229
11.4	Einsatz der Messtechnik zur Fehlerdiagnose	231
11.4.1	Messgeräte in der Hydraulik	231
11.4.2	Messgeräte in der Pneumatik	232
11.4.3	Messgeräte in der Elektrotechnik	233
11.5	Einsatz von Dokumentation und Programmen zur Fehlerdiagnose	235
11.5.1	Fehlersuchprogramme	235
11.5.2	Fehlerschnellsuchprogramme	236
11.5.3	Fehlerbaumanalyse	237

12	Fehlervermeidung und Fehlersuche in komplexen Anlagen	241
12.1	... in hydraulischen Anlagen	241
12.1.1	Fehlervermeidung	242
12.1.2	Fehlersuche.....	243
12.2	... in pneumatischen Anlagen	246
12.2.1	Fehlervermeidung	246
12.2.2	Fehlersuche.....	247
12.3	... bei elektrischen Antrieben	250
12.3.1	Fehlervermeidung	250
12.3.2	Fehlersuche.....	251
13	Industrie 4.0.....	255
13.1	Industrie 4.0 im Überblick: Ein komplexes Thema, viele Facetten, einfache Antworten.....	256
13.2	Verschmelzung von Industrie und IT.....	258
13.3	Internet der Dinge (IoT).....	261
13.4	Begriffe Industrie 4.0	262
13.5	Industrie 4.0 und der Mensch	264
13.6	Datensicherheit im Netz	265
13.7	7 Merkmale von Industrie-4.0-Anwendungen.....	265
14	Anhang	269
14.1	Übersicht der Symbole für elektrische Betriebsmittel	269
14.2	Übersicht wichtiger Symbole der Pneumatik.....	281
14.3	Übersicht wichtiger Symbole der Hydraulik.....	283
14.4	Vergleich Elektrotechnik – Pneumatik – Hydraulik	285
14.5	Gefährdungen nach DIN EN ISO 12100 und relevante Normen (Auswahl)	287
14.6	Kategorien der sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen nach DIN EN ISO 13849-1	292
14.7	IP-Schutzarten (erste und zweite Kennziffer)	293
14.8	Gefährdungen	294
14.8.1	Mechanische Gefährdungen	294
14.8.2	Elektrische Gefährdungen durch direkte Berührung mit spannungs- führenden Teilen	302
14.9	Fehlersuchprogramme in elektrischen Teilsystemen.....	305
14.10	Fehlersuchprogramme in hydraulischen Teilsystemen	317
14.11	Störungen und Fehlersuche in pneumatischen Teilsystemen.....	320
14.11.1	Störungen durch unterdimensionierte Luftversorgung	320
14.11.2	Störungen durch Kondenswasser	320
14.11.3	Schäden durch feuchte Druckluft.....	321
14.11.4	Störungen durch Verschmutzung.....	321
14.11.5	Störungen an Zylindern	321
14.11.6	Fehlersuche im Arbeitsteil.....	322
14.11.7	Fehlersuche an Magnetventilen.....	322
14.11.8	Fehlersuche an Pneumatikventilen.....	323
14.12	Fehlerbaumanalyse – Tabelle der Symbole.....	324

1 Arbeitsgebiet Mechatronik

Mechatroniker/Mechatronikerinnen arbeiten in der Montage und Instandhaltung von komplexen Maschinen, Anlagen und Systemen im Anlagen- und Maschinenbau oder bei den Betreibern mechatronischer Systeme.

Mechatroniker/Mechatronikerinnen üben Tätigkeiten an unterschiedlichen Einsatzorten, vornehmlich auf Montagebaustellen, in Werkstätten oder im Servicebereich unter Beachtung der einschlägigen Vorschriften und Sicherheitsbestimmungen selbständig nach Unterlagen und Anweisungen aus.

1.1 Berufliche Anforderungen

Mechatroniker/Mechatronikerinnen

- ▶ planen und steuern Arbeitsabläufe, kontrollieren und beurteilen Arbeitsergebnisse und wenden Qualitätsmanagementsysteme an,
- ▶ bearbeiten mechanische Teile und bauen Baugruppen und Komponenten zu mechatronischen Systemen zusammen,
- ▶ installieren elektrische Baugruppen und Komponenten.
- ▶ messen und prüfen elektrische Größen,
- ▶ installieren und testen Hard- und Softwarekomponenten,
- ▶ bauen elektrische, pneumatische und hydraulische Steuerungen auf und prüfen sie,
- ▶ programmieren mechatronische Systeme,
- ▶ nehmen mechatronische Systeme in Betrieb und bedienen sie,
- ▶ montieren, demontieren, transportieren und sichern Maschinen, Systeme und Anlagen,
- ▶ konfigurieren und prüfen die Funktionen mechatronischer Systeme,
- ▶ übergeben mechatronische Systeme und weisen Kunden ein,
- ▶ führen die Instandhaltung mechatronischer Systeme durch.

1.2 Was ist Mechatronik?

Mechatronik ist ein interdisziplinäres High-tech-Wissensgebiet.

Das aus den Wortstämmen „Mechanik“ und „Elektronik“ gebildete Kunstwort entstand Anfang der 70er-Jahre in Japan und bezeichnete damals die Anwendungen der Mikroprozessortechnik zur Steuerung von Maschinen.

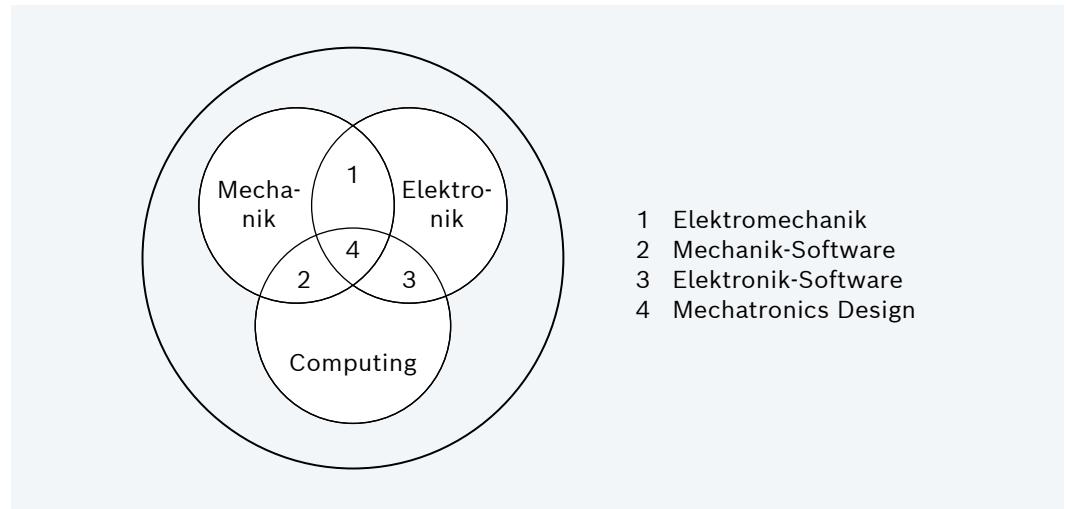


Bild 1: Bestandteile der Mechatronik

Mechanik, Elektronik und Computing (Informationstechnik) werden zusammengefasst und im gesamten Produktlebenszyklus (Modellierung, Entwicklung, Herstellung, Nutzung) ganzheitlich betrachtet.

Die wissenschaftlich-technische Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass Innovationen besonders in den Schnittstellen der Wissensgebiete entstehen. In der Mechatronik werden deshalb folgende interdisziplinäre Fachgebiete betrachtet:

- ▶ Elektromechanik (Elektropneumatik/Elektrohydraulik, ECAD-Elektrokonstruktion)
- ▶ Mechanik-Software (Virtual Reality, Bewegungsanimation)
- ▶ Elektronik-Software (NC, SPS, PC, ...)
- ▶ Mechatronische Systeme (Systemtheorie, komplexe automatisierte Systeme)

1.3 Grundstruktur mechatronischer Systeme

1.3.1 Prinzipieller Aufbau

Allgemein wird in einem technischen System Energie, Stoff und Information umgesetzt. Bei mechatronischen Systemen stehen der Energie- und der Informationsfluss im Mittelpunkt.

Der Energiefluss entsteht dabei durch Kräfte und Momente, die auf eine bewegte Systemgrenze wirken, oder durch elektrische Ströme, die über Systemgrenzen fließen.

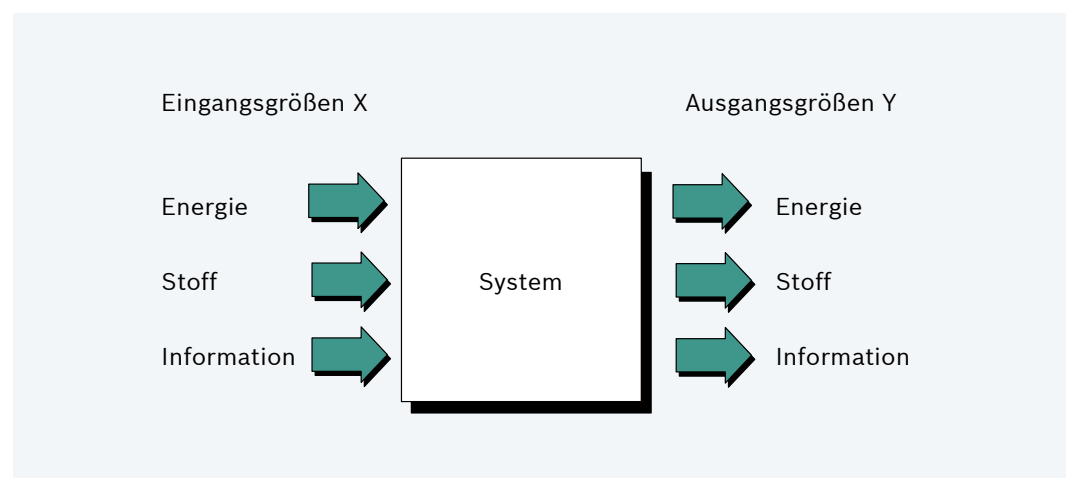


Bild 2: Prinzipieller Aufbau eines technischen Systems

Mechatronische Systeme bestehen aus:

- ▶ einer mechanischen Grundstruktur, die ein bestimmtes Trag- oder Bewegungsverhalten erzeugt,
- ▶ Sensoren, mit denen Informationen über das System oder die Umgebung erfasst werden,
- ▶ Prozessoren, in denen die Informationen ausgewertet und nach bestimmten Regeln Stellgrößen erzeugt werden,
- ▶ Aktoren, in denen die Stellgrößen in Kräfte, Bewegungen, elektrische Spannungen oder andere Größen umgesetzt werden, die auf das Grundsystem oder seine Umgebung einwirken.

Der prinzipielle Aufbau mechatronischer Systeme ist in Bild 3 dargestellt. Sensoren und Aktoren stellen die Bindeglieder zwischen Energie und Information dar.

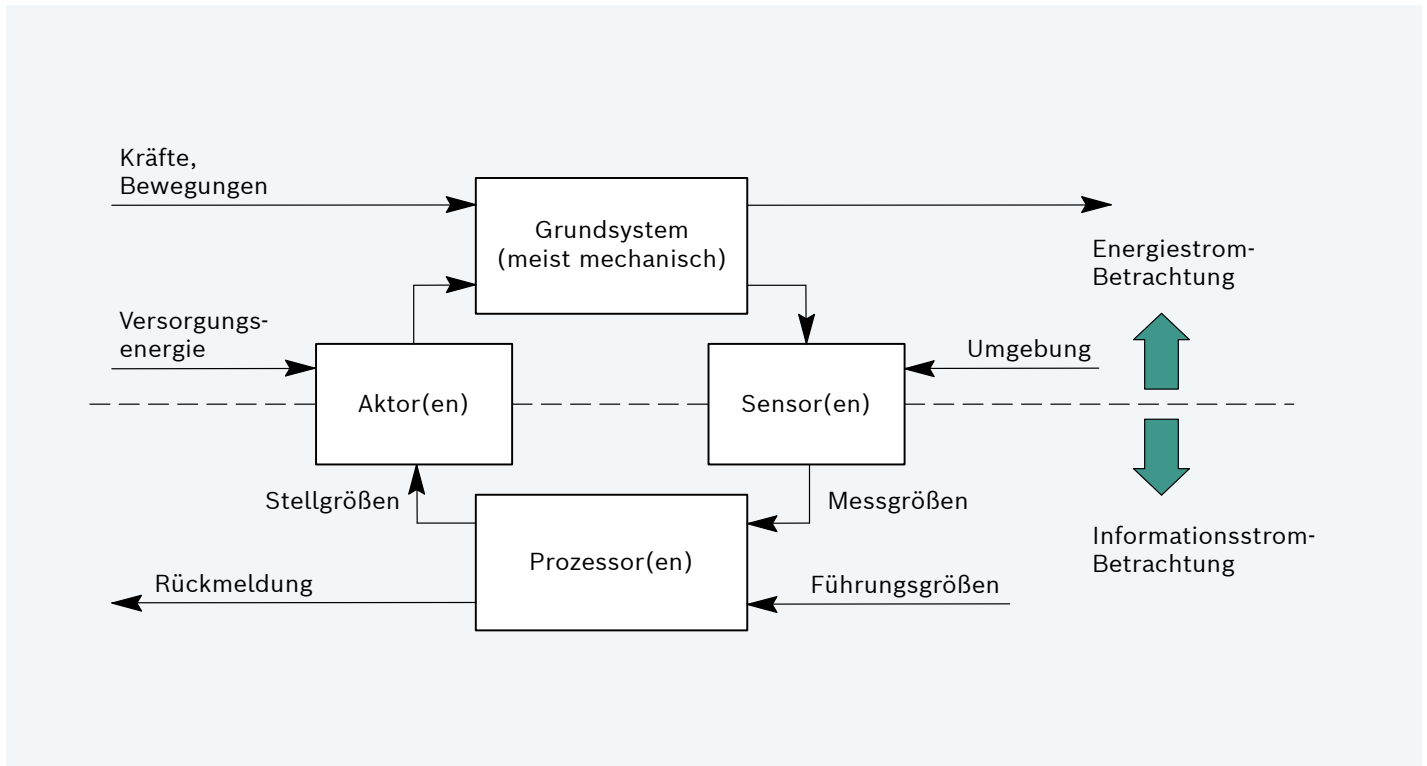


Bild 3: Grundstruktur mechatronischer Systeme

1.3.2 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Mechatronische Systeme zeichnen sich in der Regel durch eine hohe Komplexität aus. Das Hauptproblem bei der Entwicklung mechatronischer Produkte besteht oft in der Beherrschung dieser Komplexität, sowohl in technischer als auch in organisatorischer Hinsicht.

Entwicklung und Konstruktion sind Teil des gesamten Produktentstehungs- und -nutzungsprozesses, zu dem auch Produktplanung, Fertigung und Vertrieb sowie Gebrauch, Instandhaltung und Entsorgung gehören.

Die Hauptanforderung der frühen Phasen ist es, ausgehend von der gegebenen Aufgabenstellung, durch Abstrahieren, Aufstellen von Funktionsstrukturen und Suchen nach geeigneten Lösungsprinzipien und deren Kombination, einen grundsätzlichen Lösungsweg festzulegen. Hierzu müssen, z. B. durch Betrachtung von Energie-, Stoff- und Signalflüssen, die wichtigsten Systemfunktionen und ihre Verkettung erfasst und lösungsneutral formuliert werden. Der Begriff „Funktion“ wird dabei auch in der Mechatronik gemäß der in der Konstruktionssystematik des Maschinenbaus üblichen Bedeutung benutzt. Demnach ist darunter eine abstrakte, lösungsneutrale und eindeutige Form einer Aufgabenstellung zu verstehen. Die Gesamtfunktion zur Beschreibung der Gesamtaufgabe des Produktes oder Systemes wird zweckmäßiger in einfach zu lösende Teilaufgaben aufgliedert, deren logischer bzw. physikalischer Zusammenhang die Funktionsstruktur darstellt. Die Beschreibung dieser Funktionen erfolgt in natürlicher Sprache.

Die Teilfunktionen und die Funktionsstruktur müssen durch einen physikalischen Wirkzusammenhang erfüllt werden, der dementsprechend aus Wirkprinzipien und deren Wirkstruktur aufgebaut ist. In der Regel kann eine Funktion durch mehrere Wirkprinzipien, denen beispielsweise physikalische Effekte zugrunde liegen können, erfüllt werden. Unter diesen Wirkprinzipien ist die günstigste Lösung auszuwählen.

Ausgehend von der so gewonnenen Funktions- und Wirkstruktur, ist danach die Baustruktur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten vollständig auszuarbeiten. Dabei werden zuerst prinzipielle Lösungen gesucht, die je nach Realisierungsmöglichkeit modular zu gliedern sind. Vorhandene Lösungselemente, wie etwa Normteile oder katalogisierte Komponenten, sind bevorzugt zu verwenden. Erst danach wird mit der Detailkonstruktion, d. h. der endgültigen Gestaltung aller Systemteile, begonnen. Während in den frühen Phasen die Funktion des Systems und seiner Teile im Vordergrund stehen, orientiert man sich in den späteren Phasen eher an der Gestalt. Man spricht demzufolge auch von „funktionsorientierten“ und von „gestaltungsorientierten“ Entwürfen.

Dieses Vorgehen entspricht der in VDI-Richtlinie 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme“ (VDI-Verlag) beschriebenen und im Maschinenbau eingeführten allgemeinen Konstruktionsmethodik. Bei der Entwicklung mechatronischer Produkte steht vor allem die disziplinübergreifende Betrachtung der Systemdynamik im Vordergrund, besonders beim betont funktionsorientierten Entwurf der Regelung.

1.3.3 Funktionsbegriff in der Mechatronik

Bei mechatronischen Systemen besteht eine wesentliche Besonderheit darin, dass Komponenten aus ganz unterschiedlichen Bereichen miteinander verknüpft werden können. Es gibt oft eine ganze Reihe möglicher Alternativlösungen, die bei der Entwicklung zu bewerten und miteinander zu vergleichen sind.

Spätestens dann, wenn eine quantitative Bewertung zur Entscheidungsfindung notwendig wird, reicht die umgangssprachliche Funktionsbeschreibung nicht mehr aus. Dann ist eine weitergehende Präzisierung des Funktionsbegriffes notwendig.

Betrachtet man die Grundstruktur mechatronischer Systeme, so fällt auf, dass diese Grundstruktur sowohl zur Beschreibung einfacher Komponenten und Teilsysteme, als auch zur Beschreibung komplexer Gesamtsysteme geeignet ist. Stets erfolgt eine Transformation von Eingangsgrößen auf Ausgangsgrößen, die, bei geeigneter Formalisierung, mathematisch beschreibbar ist. Der Zustand des Systems, in dem diese Transformation stattfindet, wird durch Zustandsgrößen beschrieben. Es liegt nahe, die einschlägigen Methoden der Systemdynamik auch zur Funktionsbeschreibung bei mechatronischen Systemen einzusetzen.

Die Funktionen, die in mechatronischen Systemen auftreten, werden in zunehmender Komplexität und Vollständigkeit grundsätzlich wie folgt eingeteilt:

- ▶ **Kinematische Funktionen**
→ Bereitstellen eines geeigneten Bewegungsmechanismus, mit dem die Aufgabe (Funktion) gelöst werden kann
- ▶ **Dynamische Funktionen**
→ zusätzlich die Einbeziehung der wirkenden Kräfte und des Antriebsverhaltens
- ▶ **Mechatronische Funktionen**
→ Einbeziehung der Regelungsalgorithmen, der Sensorik und weiterer Komponenten zur Vervollständigung der Funktionsbeschreibung

Die einzelnen Komponenten und Teilsysteme werden „mechatronische Funktionsmodule“ genannt.

Das Verhalten des Gesamtsystemes kann nun einer ausführlichen Analyse unterzogen werden.

Für den Mechatroniker stellen mechatronische Funktionsmodule sogenannte Lösungselemente dar, aus denen schrittweise Gesamtsysteme aufgebaut werden können. Dadurch entsteht eine blockorientierte, hierarchische Systemstruktur, die ein hohes Maß an Wiederverwendbarkeit einmal generierter Funktionsmodule oder auch komplexer Aggregate ermöglicht.

1.4 Grundlagen der Elektrotechnik

Die Elektrotechnik umfasst die Gesamtheit der technischen Anwendungen, in denen die Wirkungen des elektrischen Stroms und die Eigenschaften elektrischer und magnetischer Felder ausgenutzt werden.

1.4.1 Elektrizität

Die Begriffe positive und negative Elektrizität wurden durch den amerikanischen Naturwissenschaftler Benjamin Franklin eingeführt, um die an Glas- und Hartgummistäben entstehende Ladungsart zu bezeichnen.

Er hat nachgewiesen, dass die Ladungen auf den Stäben unterschiedliche Elektrizitätsarten darstellen. In Festkörpern können sich freie Elektronen bewegen. Reibung kann den Übergang freier Elektronen von einer Oberfläche auf eine andere hervorrufen. Die Bewegung freier Elektronen bildet den elektrischen Strom.

Franklin kam zum Schluss, dass der Stromfluss vom positiven Anschluss der Reibungsmaschine über den externen Strompfad zum negativen Anschluss führen müsse.

Die **Stromstärke**, welche durch einen metallischen Leiter mit einem Potentialunterschied zwischen seinen Enden fließt, ist

- ▶ direkt proportional zur Potentialdifferenz und
- ▶ indirekt proportional zum elektrischen Widerstand des Leiters (Ohmsches Gesetz).

Der **Widerstand** eines Leiters ist abhängig von:

- ▶ Material
- ▶ Länge
- ▶ Querschnitt
- ▶ Temperatur

Das 1. Kirchhoffsche Gesetz besagt, dass in einem Knotenpunkt eines elektrischen Netzwerkes die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme ist (Knotenregel). Im 2. Kirchhoffsche Gesetz wird ausgesagt, dass die Summe aller Teilspannungen (Potentialdifferenzen) einer Masche oder eines geschlossenen Stromkreissystem gleich Null ist (Maschenregel).

Elektrische Energie kann in kleinste Teile beliebiger Größe geteilt und ohne wesentliche Verluste genutzt werden.

Elektrische Leiter werden nicht nur zur Übertragung von Strömen an verschiedene Orte verwendet, sondern wandeln auch elektrische Energie in andere benötigte Formen um, wie z. B. in Wärme, Licht oder mechanische Energie.

1.4.2 Magnetismus

Magnetismus wird allgemein als Fähigkeit oder Kraft eines Materials definiert, welches Eisen- oder Stahlteile anziehen und halten kann.

Ein Magnet wird als ein Körper bezeichnet, der die Polaritätseigenschaften und damit die Fähigkeit besitzt, Eisen oder Stahl anzuziehen.

Beispiele für die technische Anwendung des Magnetismus sind Generatoren, Transformatoren, Relais und andere.

Der dänische Physiker Oerstedt entdeckte Anfang des 19. Jahrhunderts den engen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus.

Die elektrische Stromstärke von 1 Ampere ist definiert als

- ▶ der elektrische Stromfluss durch zwei parallel zueinander angeordnete Leiter mit 1 Meter Länge und 1 Meter Abstand, welcher eine elektromagnetische Anzugskraft von $2 \cdot 10^{-7}$ Newton zwischen diesen Leitern hervorruft.

Ferromagnetisches Material hat die Eigenschaft, wenn es in örtlich und intensitätsmäßig veränderliche Magnetfelder gebracht wird, eilt die magnetische Induktion der sich verändernden Magnetkraft nach. Diese Verzögerung in der Magnetisierung wird als **Hysterese** bezeichnet.

Die durch Materialreibung erzeugte Wärme verursacht Leistungsverluste.

Verwendet man ferromagnetisches Material in Wechselstromgeräten wie Transformatoren oder Generatoren, wird das Material einer zyklischen Veränderung in Bezug auf Richtung und Intensität unterzogen. Die Energieverluste in jedem Zyklus werden durch eine Hysteresisschleife der Magnetfeldstärke über der resultierenden magnetischen Induktion verdeutlicht.

Wirbelströme sind zirkulierende Ströme, die in einem Material durch veränderliche Magnetfelder erzeugt werden.

1.4.3 Physikalische und technische Begriffe

DC/AC	DC: Gleichstrom (Direct Current) AC: Wechselstrom (Alternating Current)
Widerstand	In Gleichstromkreisen gibt es einen einzigen „Widerstand“ gegen den Stromfluss; den „Ohmschen Widerstand“ R („Resistanz“ oder „Wirkwiderstand“). In Wechselstromkreisen müssen zusätzlich die Größen „Induktiver Widerstand“ X_L und „Kapazitiver Widerstand“ X_C berücksichtigt werden. Beide werden unter dem Überbegriff „Reaktanz“ oder „Blindwiderstand“ zusammengefasst. Der Effekt von Resistanz und Reaktanz wird als „Impedanz“ oder „Scheinwiderstand“ Z bezeichnet.
Induktivität	Induktivität oder induktiver Widerstand ist eine physikalische Größe, die den Widerstand beim Durchfließen eines elektrischen Leiters mit Wechselstrom charakterisiert. Die Induktivität verursacht ein Nacheilen des Stromes gegenüber der Spannung.
Kapazität	Kapazitäten werden hauptsächlich zur Speicherung von elektrischen Ladungen verwendet. Bei einem Elektrolytkondensator wird eine dünne, nichtleitende Chemikalie auf einer Seite der Platte als Isolator verwendet. Die Nachteile von Elektrolytkondensatoren bestehen darin, dass sie nicht für hohe Spannungen geeignet sind (Obergrenze ungefähr 600 V) sowie einen (kleinen) Leckstrom und somit Energieverluste aufweisen. Veränderliche Kondensatoren bestehen aus einer Reihe von Metallplatten, die im Abstand zu einer Reihe feststehender Platten ineinander und auseinander bewegt werden können. In einem Wechselstromkreis hat der Kondensator einen kapazitiven Widerstand, der gegen eine sich ändernde Wechselspannung wirkt. Kapazitive Widerstände bewirken ein Nacheilen der Spannung gegenüber dem Strom.
Isolator	Ein Isolator erfüllt verschiedene Funktionen bei der praktischen Anwendung elektrischer Stromkreise. Er verhindert, dass sich blanke Leiter gegenseitig berühren und ermöglicht somit die Übertragung großer (und ggf. gefährlicher) Stromstärken. Ein Isolator schützt Personen vor Schädigung durch den Kontakt mit zu hohe elektrische Strömen. Außerdem verhindert er große Verlustströme (Energieverluste) und einen unerwünschten Temperaturanstieg als Wirkung hoher Ströme.
Halbleiter	Materialien wie Silizium, Germanium oder Selen haben die Eigenschaften von Halbleitern mit sehr nützlichen Eigenschaften für die Übertragung des elektrischen Stromes. Bei einer Verbindung von Germanium des n-Typs und mit Germanium des p-Typs wird an der Verbindungsstelle eine pn-Übergangsdioden gebildet. Ein pn-Übergang hat vor allem die Eigenschaft, den Durchlass des Stromes in eine Richtung zu ermöglichen und in die entgegengesetzte Richtung zu sperren.

- Generator** Rotierende Maschinen der Elektrotechnik bestehen grundsätzlich aus zwei physisch getrennten Bauteilen: Stator und Rotor. Die innere Zylinderfläche des Stators wirkt auf die äußere Oberfläche des darin befindlichen Rotors. Ein Luftspalt zwischen beiden ermöglicht die Drehbewegung des Rotors.
Die Kerne von Stator und Rotor bestehen aus dünnen Blechen aus Magnetmaterial (z.B. Silikatstahl), wodurch Verluste durch induzierte Wirbelströme und Hysterese minimiert werden.
Das Material der Kerne muss eine hohe magnetische Permeabilität besitzen, um die erforderliche Intensität des Magnetflusses ohne überhöhte Stromstärken zu erreichen. Die Magnetflussstärke im Luftspalt ist direkt proportional zur Magnetfeldintensität.
- Schaltgeräte** Schaltgeräte werden zum Öffnen oder Schließen elektrischer Stromkreise eingesetzt. Als Stromkreisunterbrecher besteht ihre Hauptfunktion darin, Stromkreise bei Bedarf oder dem Auftreten eines Fehlers zu öffnen, d.h. stromlos zu schalten.
Schaltgeräte müssen robust gegenüber den zu schaltenden Stromstärken und auch den auftretenden mechanischen Belastungen beim Schaltvorgang sein.
Bei der Auswahl des Schaltgerätes ist neben wirtschaftlichen Aspekten vor allem die Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen zu beachten.
- Schutzrelais** Schutzrelais messen im zu überwachenden Stromkreis ständig die aktuellen elektrischen Größen und unterbrechen ihn, sobald eine dieser Größen für wenige Millisekunden vom erlaubten Zustand abweicht.
Alle Schutzrelais haben zwei Stellungen; die Normalstellung mit gewöhnlich offenen Kontakten und die Fehlerstellung mit geschlossenen Kontakten. Die Fehlerstellung wird aktiviert, wenn ein Fehler innerhalb des elektrischen Stromkreises erkannt wird (z. B. durch Überstrom).

1.4.4 Elektrische Grundgrößen: Stromstärke, Spannung und Widerstand

Die Stromstärke ist eine der sieben Basisgrößen des internationalen SI-Einheitensystems, wie z. B. Länge oder Masse, aus denen man alle anderen Größen dieses Systems und deren Einheiten ableiten kann.

Größe	Formelzeichen	Einheit	fluidtechnisch vergleichbar mit
Stromstärke	I	Ampere (A)	Volumenstrom
Spannung	U	Volt (V)	Druck
Widerstand	R	Ohm (Ω)	Strömungswiderstand durch Reibung

Tabelle 1: Grundgrößen der Elektrotechnik

Mögliche Wirkungen des elektrischen Stromes:

- ▶ **Wärmewirkung**
Jeder stromdurchflossene Leiter erwärmt sich (Beispiel: elektrische Heizung).
- ▶ **Magnetische Wirkung**
Jeden stromdurchflossenen Leiter umgibt ein Magnetfeld (Beispiel: Relais).
- ▶ **Lichtwirkung**
Unter bestimmten Bedingungen regt der elektrische Strom feste Leiter und Gase zum Leuchten an (Beispiel: Glühlampe).
- ▶ **Chemische Wirkung**
Der elektrische Strom erzeugt an Elektrolyten (Basen und Säuren in Lösung) eine chemische Veränderung (Beispiel: Akkumulator).
- ▶ **Verletzende Wirkung auf Lebewesen**
Menschen und Tiere können beim Berühren spannungsführender Leiter einen elektrischen Schlag erhalten (Beispiel: elektrischer Weidezaun).

1.4.5 Ohmsches Gesetz

Das Ohmsche Gesetz sagt aus, dass der Widerstand als Verhältnis von Spannung zu Stromstärke konstant bleibt; je höher die Spannung, desto höher die Stromstärke.

$$R = \frac{U}{I}$$

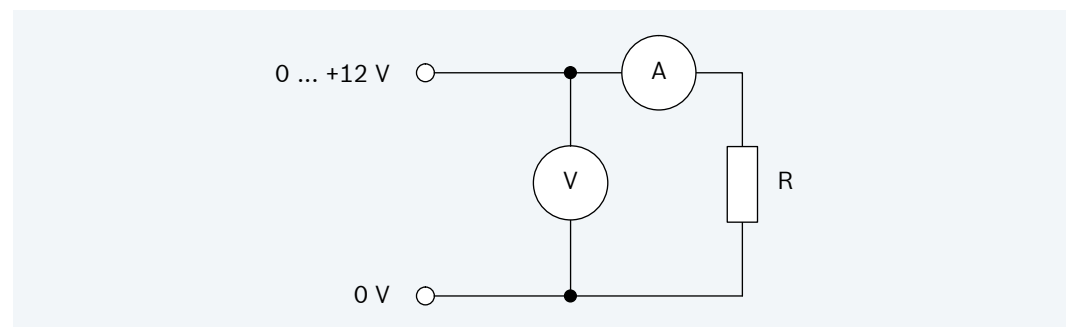


Bild 4: Einfacher Stromkreis

Man unterscheidet die technische Stromrichtung (vom Pluspol zur Masse) und die tatsächliche Bewegungsrichtung der Elektronen im Leiter (von Minus nach Plus).

Der elektrische Widerstand hängt auch davon ab, ob Gleichspannung oder ob Wechselspannung vorliegt. Der Widerstand einer normalen Glühlampe ist beispielsweise bei Gleich- oder Wechselstrom gleich groß, bei einer Magnetspule dagegen weist bei Wechselstrom einen höheren Widerstand auf als bei Gleichstrom.

Daraus ergibt sich, dass die Spulen von Magnetventilen bei Versorgung mit Wechselspannung mit größeren Werten betrieben werden dürfen als bei Gleichstrom.

Beispiele für charakteristische Widerstandswerte:

kurze Leitungsstücke	1 $\mu\Omega$ – 100 m Ω
längere Leitungsstücke	0,1 Ω – 10 Ω
Widerstände von Lampen und Geräten im Haushalt	10 Ω – 1000 Ω
Widerstände in elektronischen Geräten	0,1 Ω – 1000 M Ω
Isolationswiderstände	10 M Ω – 1000 G Ω

Parallelschaltung

Eine Parallelschaltung liegt vor, wenn in einer elektrischen Anlage verschiedene Verbraucher unabhängig voneinander ein- bzw. ausgeschaltet werden können. Das bedeutet, jeder Verbraucher kann von einem anderen Strom durchflossen werden. Allen gemeinsam ist jedoch die anliegende Spannung.

Beispiele für Parallelschaltungen sind die Wohnungsbeleuchtung und Geräte, die über Steckdosen mit dem Stromkreis verbunden sind.

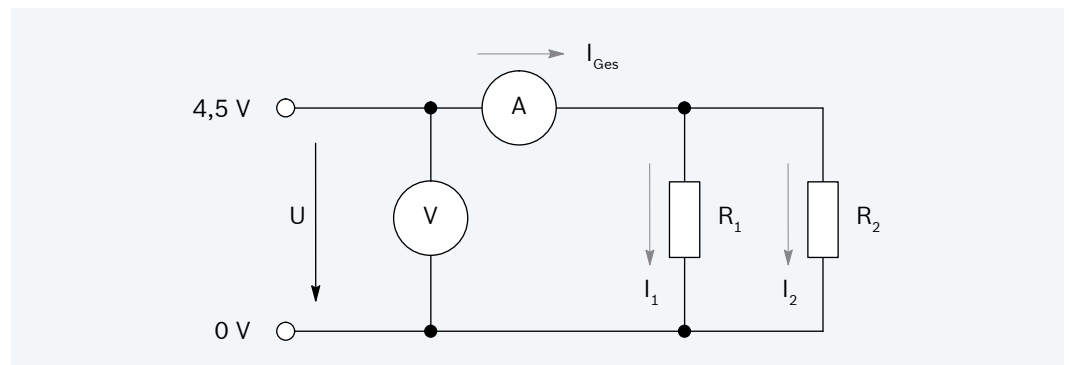


Bild 5: Stromkreis mit Parallelschaltung

Um den Gesamtwiderstand zu berechnen, addiert man zunächst die Kehrwerte der einzelnen Widerstände:

$$\frac{1}{R_{\text{Ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Der Gesamtwiderstand in Bild 5 beträgt demnach:

$$\frac{1}{R_{\text{Ges}}} = \frac{1}{3 \text{ Ohm}} + \frac{1}{1 \text{ Ohm}} = \frac{1}{0,75 \text{ Ohm}} \quad R_{\text{Ges}} = 0,75 \text{ Ohm}$$

Berechnung des Gesamtstromes:

$$I_{\text{Ges}} = \frac{U}{R_{\text{Ges}}} = \frac{4,5 \text{ V}}{0,75 \text{ Ohm}} = 6 \text{ A}$$

Berechnung von I_1 und I_2 :

$$I_1 = \frac{4,5 \text{ V}}{3 \text{ Ohm}} = 1,5 \text{ A} \quad I_2 = \frac{4,5 \text{ V}}{1 \text{ Ohm}} = 4,5 \text{ A}$$

Es wird ersichtlich, dass die Summe der beiden Teilströme I_1 und I_2 wieder den Gesamtstrom $I = 6 \text{ A}$ ergibt.

Parallelschaltung Eine Reihenschaltung liegt vor, wenn nach Anlegen einer Spannung derselbe Strom der Reihe nach durch die einzelnen Verbraucher (Widerstände) fließt.

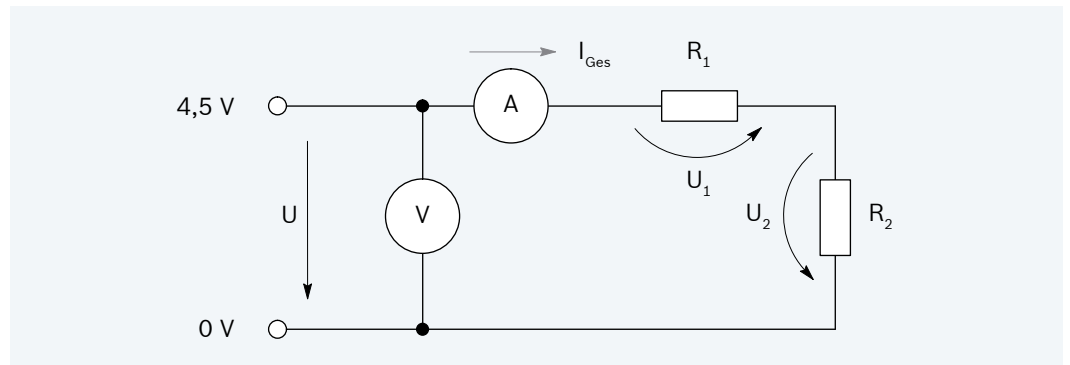


Bild 6: Stromkreis mit Reihenschaltung

Zur Berechnung des Gesamtwertes werden die Widerstandswerte der einzelnen Widerstände addiert:

$$R_{Ges} = R_1 + R_2$$

Der Gesamtwert der Schaltung (Bild 6) beträgt demnach:

$$R_{Ges} = 3 \text{ Ohm} + 1 \text{ Ohm} = 4 \text{ Ohm}$$

Berechnung des Gesamtstromes:

$$I_{Ges} = \frac{U}{R_{Ges}} = \frac{4,5 \text{ V}}{4 \text{ Ohm}} = 1,125 \text{ A}$$

Berechnung von U_1 und U_2 :

$$U_1 = 1,125 \text{ A} \cdot 3 \text{ Ohm} = 3,375 \text{ V}$$

$$U_2 = 1,125 \text{ A} \cdot 1 \text{ Ohm} = 1,125 \text{ V}$$

Daraus wird ersichtlich, dass die Summe der beiden Teilspannungen U_1 und U_2 die Gesamtspannung $U = 4,5 \text{ V}$ ergibt.

1.5 Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik

In der Antriebstechnik sind elektrische Maschinen in allen Bereichen der Wirtschaft weit verbreitet. Eine wesentliche Rolle für die Auswahl eines elektrischen Antriebes ist seine gute Integrierbarkeit in technische Systeme unterschiedlichster Art.

1.5.1 Gleichstrommotor

Das Grundprinzip eines Gleichstrommotors besteht darin, dass sich eine Leiterschleife, die sich in einem Magnetfeld befindet, durch Umschalten des Magnetfeldes in eine fortlaufende Drehbewegung versetzt wird.

Mit dem Einsatz von mehreren Leiterschleifen ist ein sicheres Anlaufen des Motors sichergestellt. Bei größeren Motoren wird das Magnetfeld statt durch Dauermagneten mit Elektromagneten erzeugt. Dabei wird zwischen Hauptschlussmotor und Nebenschlussmotoren unterschieden.

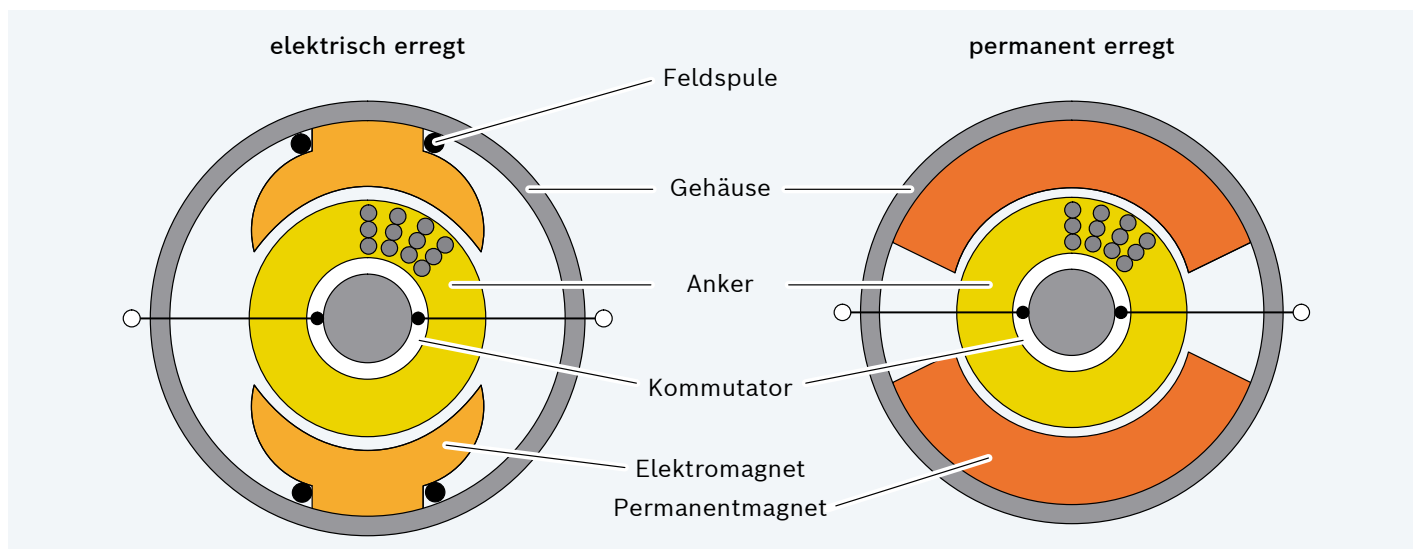


Bild 7: Gleichstrommotor

1.5.2 Wechselstrommotor / Drehstrommotor

Drehstrom entsteht durch die Verkettung von 3 Wechselspannungen, deren Phasenwinkel fest um 120 Grad verschoben sind. Drehstrom hat die gleichen Vorteile wie der Wechselstrom.

Zusätzliche Merkmale des Drehstroms:

- ▶ Bildung eines Drehfeldes für den Antrieb des Motors (Läufer).
- ▶ Verteilung der Last auf 3 Leiter (Verringerung des Leitungsquerschnitts möglich)
- ▶ Spannung zwischen den 3 Leitern: $3 \times 400 \text{ V}_{AC}$.

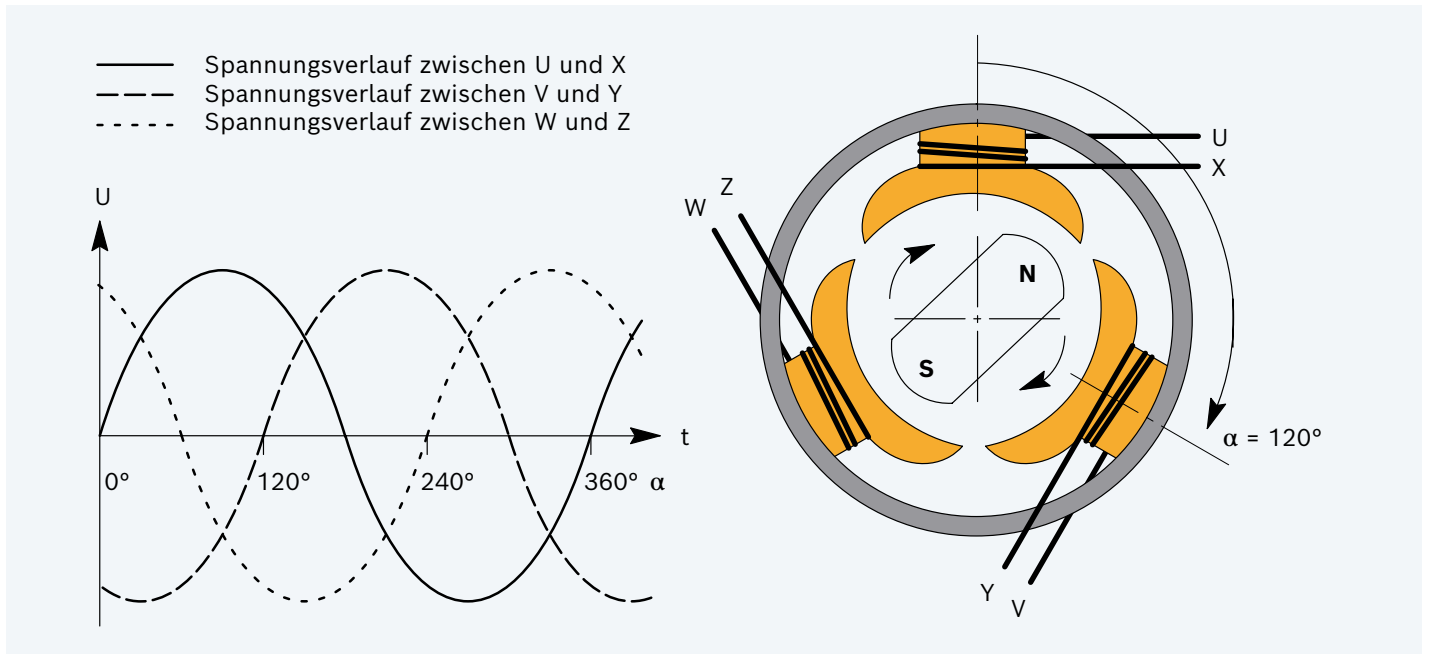


Bild 8: Drehstrommotor

Bei Drehstrommotoren ist die Drehrichtung durch Vertauschen von zwei der drei Anschlussleitungen umkehrbar.

1.5.3 Elektroschaltplan

Schaltzeichen und Schaltpläne der Elektrotechnik sind in internationalen (IEC) und europäischen Normen (EN) festgelegt.

In VDE-Bestimmungen wird angegeben, welche Schaltplanunterlagen im Lieferumfang elektrischer Geräte und Anlagen enthalten sein müssen.

Sie umfassen alle notwendigen Informationen für den Anwender über Montage, Inbetriebnahme, Wartung und Instandhaltung der elektrischen Steuerung.

Norm	Inhalt
DIN EN 60617-2	Graphische Symbole für Schaltpläne – Symbolelemente, Kennzeichen und andere Schaltzeichen für allgemeine Anwendungen
DIN EN 60617-3	Graphische Symbole für Schaltpläne – Schaltzeichen für Leiter und Verbinder
DIN EN 60617-7	Graphische Symbole für Schaltpläne – Schaltzeichen für Schalt- und Schutzeinrichtungen

Tabelle 2: Wichtige Normen für Schaltzeichen der Elektrotechnik

Norm	Inhalt
DIN EN 81346-1	Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung – Allgemeine Regeln
DIN EN 81346-2	Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung – Klassifizierung von Objekten und Kennbuchstaben von Klassen
DIN EN 61082-4	Dokumente der Elektrotechnik – Ortsbezogene- und Installationsdokumente
DIN EN 61355-1	Klassifikation und Kennzeichnung von Dokumenten für Anlagen, Systeme und Ausrüstungen – Regeln und Tabellen zur Klassifikation

Tabelle 3: Wichtige Normen für Schaltpläne der Elektrotechnik

Arten von Schaltplänen

Die Schaltungsunterlagen werden nach Zweck und Art der Darstellung unterteilt. Es wird unterschieden in:

- ▶ Pläne, die die Arbeitsweise der Steuerung darstellen (z. B. Übersichtsschaltplan, Stromlaufplan, Funktionsschaltplan)
- ▶ Pläne, die die Verbindungen und die räumliche Lage darstellen (z. B. Bauschaltplan, Anordnungsplan, Geräteliste)

Übersichtsschaltplan

Ein Übersichtsschaltplan wird nach den Vorgaben der DIN EN 61082-1 erstellt und ist die vereinfachte, abstrahierte Darstellung einer elektrischen Schaltung. Dabei werden nur die wesentlichen Elemente der Schaltung berücksichtigt. Der Übersichtsschaltplan zeigt Funktionsweise und Gliederung der elektrischen Schaltung.

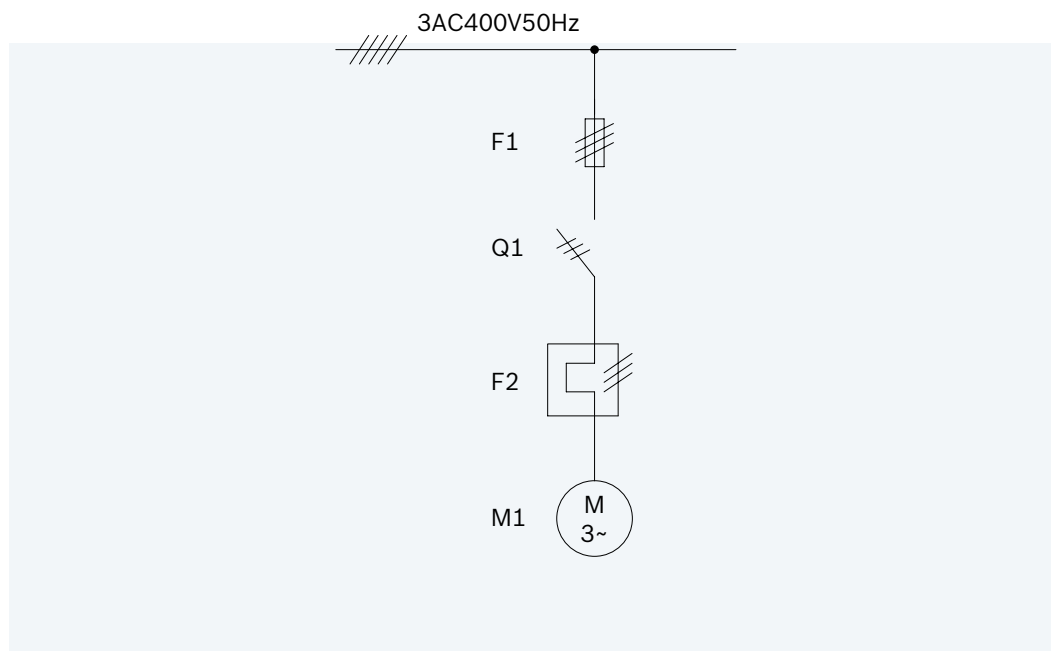


Bild 9: Beispiel eines Übersichtsschaltplanes

Stromlaufplan Ein Stromlaufplan wird nach den Vorgaben der DIN EN 61082-1 erstellt. Er ist die ausführliche, abstrahierte Darstellung einer elektrischen Schaltung. Die Schaltung wird nach Stromwegen bzw. Strompfaden aufgelöst. Sie wird mit allen Leitungen und Verbindungen dargestellt. Die räumliche Lage der einzelnen Elemente der Schaltung wird nicht berücksichtigt. Bei größeren Anlagen wird eine getrennte Darstellung des Stromlaufplans in Hauptstromkreis und Steuerstromkreis vorgenommen.

Der Stromlaufplan enthält waagrecht angeordnete Potentiallinien und senkrecht verlaufende Strompfade. Alle Schaltelemente werden im spannungslosen Zustand dargestellt. Automatische Kontaktgeber, wie z. B. Endschalter, werden in ihrer Grundstellung bezüglich der Gesamtanlage gezeichnet. Sind abweichende Darstellungen nicht zu vermeiden, sind diese im Stromlaufplan unbedingt zu vermerken.

Alle Schaltzeichen sind in Stromwegrichtung (senkrecht) anzuordnen. Die Bewegungsrichtung der Schaltzeichen soll immer von links nach rechts erfolgen. Die Symbole für Schaltzeichen sind in der DIN EN 60617-2 vorgegeben.

Klemmenbezeichnungen sollen immer links vom Symbol stehen und von unten oder von rechts aus lesbar sein.

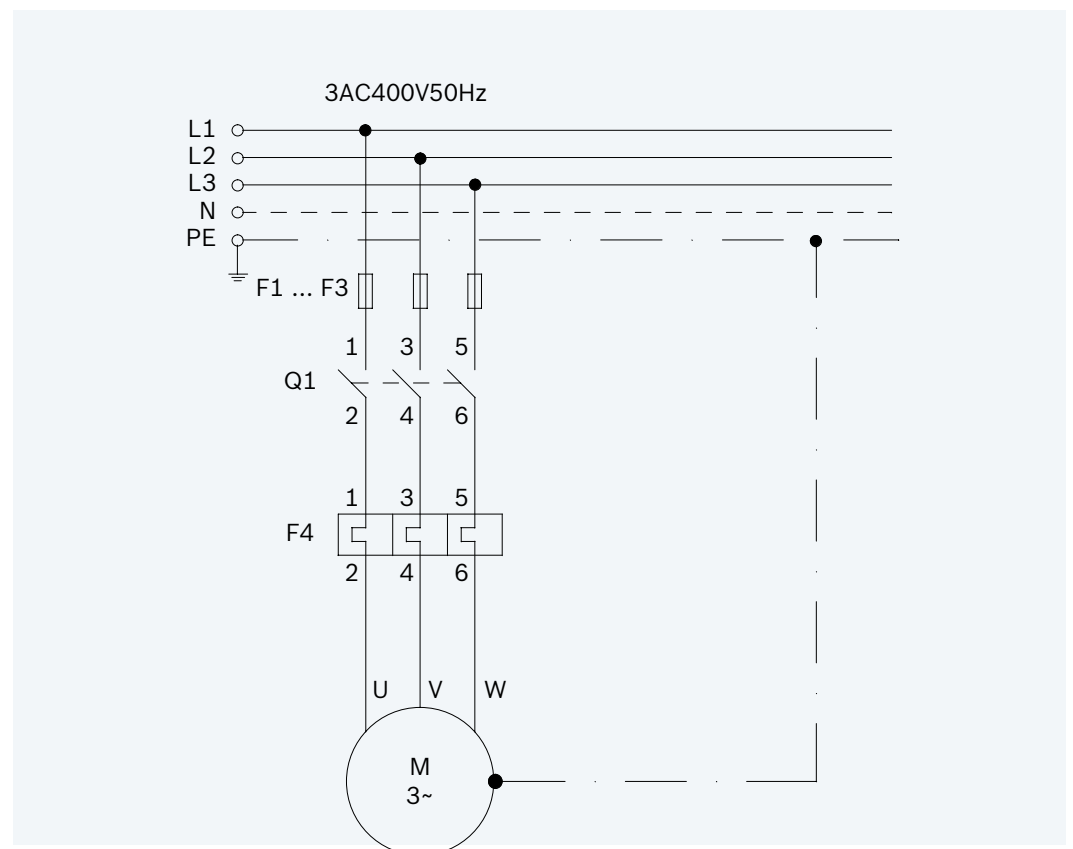


Bild 10: Beispiel eines Stromlaufplanes

Bosch Rexroth AG

Bosch Rexroth Academy
Unterdürrbacher Straße 10
97080 Würzburg, Germany
Tel.: +49 (0)9352/18-1920
E-Mail: academy@boschrexroth.de
www.boschrexroth.com/academy