

Vogel Studienmodule

Jürgen
Bechtloff

Regelungstechnik

Jürgen Bechtloff
Regelungstechnik

Professor Dr.-Ing. Jürgen Bechtloff

Regelungstechnik

Vogel Buchverlag

Professor Dr.-Ing. **JÜRGEN BECHTLOFF**

studierte an der Technischen Universität Braunschweig Maschinenbau und promovierte dort 1992 auf dem Gebiet der Robotik. Er war anschließend in der Entwicklung der Firma Moeller in Bonn tätig, einem Hersteller von Komponenten und Systemen für die Energieverteilung und Automatisierung (Automatisierungstechnik).

Seit 1998 verantwortet Professor JÜRGEN BECHTLOFF an der Fachhochschule Südwestfalen am Standort Meschede die Lehrgebiete Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die Module Mechatronik, Robotik und Getriebetechnik.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3202-8

1. Auflage. 2012

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.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2012 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Regelungstechnische Lösungen sind in der Technik überall dort gegenwärtig, wo entweder instabile Systeme zu beherrschen sind oder technische Vorgänge automatisch und kontrolliert ablaufen sollen. Deshalb spielt die Regelungstechnik bei intelligenten Lösungen eine entscheidende Rolle.

Diese Technik beschränkt sich nicht auf ein bestimmtes physikalisches System, sondern bietet Methoden an, alle physikalischen Systeme mit einer **einheitlichen Systematik** auf einer besonderen, abstrakten Ebene zu betrachten. Die Regelungstechnik ist deshalb eher ein theoretisches Lehrgebiet, das dieses Studienmodul zum besseren Verständnis mit einer Vielzahl von Lehrbeispielen begleitet. **Grundlagen** sind dafür alle an den Ingenieurwissenschaften beteiligten Disziplinen: Mathematik, Physik, Informatik, Messtechnik usw.

Ziel

Eine Lehrveranstaltung – sowie auch dieses Studienmodul – können das breit gefächerte Lehrgebiet der Regelungstechnik (die sich auch aufgrund der Innovationszyklen sehr dynamisch entwickelt) nur begrenzt darstellen. Beschrieben werden Grundlagen und die in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Lösungsprinzipien für lineare **1-Größen-Regelkreise**. Darstellungen im Zustandsraum, Synthese von Zustandsregelungen, diskrete Systeme und Fuzzy-Systeme bleiben somit unberücksichtigt.

Aufbau

Exemplarisch wird der Unterschied zwischen **Steuerung** und **Regelung** praxisbezogen erklärt. Dabei werden die Grundbegriffe erläutert und verschiedene **Signaltypen** klassifiziert. Die **Analyse von dynamischen** Systemen steht immer am Anfang einer regelungstechnischen Aufgabenstellung, darum werden deren Eigenschaften untersucht. Eine vollständige Analyse, einschließlich der Lösungen mit Differentialgleichungen, rundet den Abschnitt ab.

Eine Grundlage zur Analyse von physikalischen Systemen bilden die **PAYNTERschen Vierecke**, die die Analogie untereinander anschaulich beschreiben. Daraus entsteht ein Verständnis, das den prinzipiellen Zugang zu den Analyseprinzipien erst ermöglicht. Die beispielhafte Analyse unterschiedlicher Systeme ergänzt die Grundlagen, deren Ergebnis Differentialgleichungen sind.

In der Regelungstechnik hat sich die Betrachtung der dynamischen Systeme im **Frequenz-** und im **LAPLACE-Bildbereich** bewährt. Aus diesen mittels Transformation bzw. Variablensubstitution entwickelten Darstellungen lassen sich die Systemeigenschaften sehr effizient ablesen. Aber auch die weitere mathematische Berechnung mit dem Ziel des sicheren Entwurfs von Regelkreisen profitiert von dieser Darstellungsweise. Bei der Handhabung wird auf eine praxisnahe Darstellung besonderer Wert gelegt.

Mit diesen mathematischen Grundlagen werden im nächsten Schritt die wichtigsten linearen Systeme analysiert und einer **systematischen Klassifikation** zugeführt. Es entsteht ein **Systembaukasten** der linearen Regelungstechnik, mit dem die in der Praxis am häufigsten vorkommenden technischen Systeme modellhaft beschrieben werden können.

In den nächsten Abschnitten werden zwei wichtige grafische Beschreibungsmittel behandelt. So stellt das **BODE-Diagramm** mit der Möglichkeit, über Asympto-

tenverläufe sehr einfach auf Gesamtverläufe ohne explizite numerische Berechnung schließen zu können, ein wichtiges Hilfsmittel für den Frequenzbereich dar. Diese Verläufe werden bei der Stabilitätsbetrachtung noch einmal intensiv eingesetzt. Die Struktur von Regelkreisen wird in der Praxis immer grafisch mit Hilfe des zweiten Beschreibungsmittels, dem **Signalflussplan**, wiedergegeben. Vereinfachung und Analyse werden anhand von Beispielen demonstriert.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wird dann der **geschlossene Regelkreis** intensiv untersucht. Auch diese Aufgabe wird systematisiert und die Frage beantwortet, welche Voraussetzungen ein Regler aufweisen muss, um eine gegebene Strecke zufriedenstellend zu regeln.

Die eigentlichen **Regler** behandelt der nächste Abschnitt, und neben dem Standard-Industrieregler werden weitere Verfahren besprochen.

Bei allen Betrachtungen zur Regelkreissynthese wurde von der Kenntnis der Regelstrecke und ihren konkreten Parameterwerten ausgegangen. In der Praxis gelingt nicht immer die vollständige theoretische Modellbildung. Hier haben sich ganz praktische Verfahren der Streckenbeobachtung etabliert. Aus den Antwortverläufen lassen sich die Streckenparameter bestimmen. Die wichtigsten **Identifikationsverfahren** werden beschrieben und mit Beispielen erläutert.

Die Frage nach der **Stabilität** von Regelkreisen für deren sicheren Betrieb ist bereits beim Entwurf zu beantworten. Hieraus lassen sich ebenfalls Parametereinstellbedingungen ableiten. Wie gut eine Reglereinstellung dann tatsächlich in einer Regelkreisumsetzung funktioniert, lässt sich mit Hilfe der Kriterien der **Regelkreisoptimierung** beantworten.

Zum Abschluss werden einige wenige typische **Realisierungen der Regelungstechnik** vorgestellt. Dort wo es sinnvoll ist, schließen Kapitel mit **Übungsaufgaben** ab, die das Verständnis vertiefen. Kapitel 15 bringt dann die Lösungen zusammen mit den Aufgabestellungen.

Voraussetzungen

Das Studienmodul setzt solide Kenntnisse in den Grundlagenfächern Ingenieurmathematik und allgemeine Physik (inkl. Elektrotechnik) voraus. Alle anderen für das Verständnis der einzelnen regelungstechnischen Themen erforderlichen Grundlagen werden in den einzelnen Abschnitten vermittelt.

Software-Tools

Zur Vereinfachung von Berechnungen in der Regelungstechnik und natürlich für alle anderen ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen haben sich eine Vielzahl von unterstützenden Software-Tools etabliert. Neben der direkten Programmierung in einer Hochsprache wie C, C++, C#, Pascal, Java usw. eignen sich oftmals auch mathematische Anwendungen wie Maple, Matlab, Freemath, Scilab, Octave oder MathCad. Bei der Bearbeitung der praktischen Laboraufgaben sollte unbedingt eines dieser Programme eingesetzt werden, um praktische Erfahrungen bei der Anwendung zu sammeln. Eine Liste mit Anbietern und Quellen steht im Literaturverzeichnis.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Vorwort | 5 |
| 1 Einführung in die Regelungstechnik | 13 |
| 1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik | 13 |
| 1.2 Definition von Steuerung und Regelung | 14 |
| 1.2.1 Steuerung | 14 |
| 1.2.2 Regelung | 16 |
| 1.2.3 Merkmale von Regelungen und Steuerungen | 19 |
| 2 Signale | 21 |
| 3 Systemeigenschaften | 25 |
| 3.1 Dynamisches und statisches Verhalten von Systemen | 25 |
| 3.2 Lineare und nichtlineare Systeme | 26 |
| 3.3 Linearisierung nichtlinearer Systeme | 28 |
| 3.3.1 Linearisieren des statischen Verhaltens | 28 |
| 3.3.1.1 Grafische Linearisierung | 28 |
| 3.3.1.2 Analytisches Linearisieren | 29 |
| 3.4 Zeitvariante und zeitinvariante Systeme | 30 |
| 3.5 Beschreibung von Regelkreisgliedern durch Differentialgleichungen | 31 |
| 3.5.1 Aufstellen von Differentialgleichungen | 31 |
| 3.5.2 Lösung der Differentialgleichungen durch einen geeigneten Ansatz | 34 |
| 3.5.3 Spezielle Eingangssignale in der Regelungstechnik | 37 |
| 3.5.4 Übergangsfunktion (Sprungantwort) | 38 |
| 4 Modellbildung | 41 |
| 4.1 Allgemeines System | 43 |
| 4.2 Mechanisch-translatorisches System | 44 |
| 4.3 Mechanisch-rotatorisches System | 45 |
| 4.4 Elektrisches System | 46 |
| 4.5 Fluidisches System | 47 |
| 4.6 Thermodynamisches System | 47 |
| 4.7 Systemanalogien | 48 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5 | Darstellung von Regelkreisgliedern durch Übertragungsfunktion und Frequenzgang | 51 |
| 5.1 | LAPLACE-Transformation | 51 |
| 5.1.1 | Haupteigenschaften der LAPLACE-Transformation | 53 |
| 5.1.2 | Grenzwertsätze | 54 |
| 5.1.3 | Übertragungsfunktion | 55 |
| 5.1.4 | Frequenzgang | 56 |
| 5.1.5 | Grafische Darstellung des Frequenzgangs | 58 |
| 5.1.6 | Ortskurve | 60 |
| 5.1.7 | BODE-Diagramm | 61 |
| 6 | Regelstrecken | 65 |
| 6.1 | Proportionale Regelstrecken | 67 |
| 6.1.1 | Proportionale Strecken ohne Verzögerung (P-Glied) | 67 |
| 6.1.2 | Proportionale Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung (PT_1 -Glied) | 68 |
| 6.1.3 | Schwingungsfähige Proportionalstrecken (PT_2 -Glied) | 71 |
| 6.2 | Integrierende Regelstrecken | 79 |
| 6.2.1 | Integrierende Strecken ohne Verzögerung (I-Glied) | 79 |
| 6.2.2 | Integrierende Strecken mit Verzögerungen (IT_n -Glied) | 82 |
| 6.2.3 | Differenzierende Regelstrecken | 86 |
| 6.2.3.1 | Idealer Differenzierer | 86 |
| 6.2.3.2 | Strecken mit differenzierendem und verzögerndem Verhalten (DT_n -Element) | 89 |
| 6.2.3.3 | Proportionale Strecken mit differenzierendem und verzögerndem Verhalten (PDT_n -Element) | 93 |
| 6.2.4 | Strecken mit Totzeit (T_f -Element) | 96 |
| 7 | Darstellung des Frequenzganges im BODE-Diagramm | 101 |
| 7.1 | Konstruktion eines BODE-Diagramms | 103 |
| 8 | Signalflusspläne | 107 |
| 8.1 | Übertragungsblöcke | 107 |
| 8.2 | Verknüpfungselemente | 108 |
| 8.3 | Verknüpfungs- und Vereinfachungsregeln | 109 |
| 8.3.1 | Kettenstruktur | 110 |
| 8.3.2 | Parallelstruktur | 110 |
| 8.4 | Umformung von Signalflussplänen | 110 |
| 8.5 | Anwendungen | 113 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9 | Regelkreis | 119 |
| 9.1 | Verhalten des Regelkreises bei einer Eingangsgröße | 121 |
| 9.1.1 | Führungsverhalten | 121 |
| 9.1.2 | Störungsübertragungsverhalten von Versorgungsstörrößen | 122 |
| 9.1.3 | Störungsübertragungsverhalten von Laststörrößen | 122 |
| 9.2 | Untersuchung von Regelkreisstrukturen | 123 |
| 9.2.1 | Regler für proportionale Strecken | 123 |
| 9.2.1.1 | Verzögerungsstrecke 1. Ordnung (PT_1 -Strecke) | 123 |
| 9.2.1.1.1 | P-Regler | 124 |
| 9.2.1.1.2 | PI-Regler | 127 |
| 9.2.1.1.3 | Verzögerungsstrecke 2. Ordnung (PT_2 -Strecke) | 131 |
| 9.2.2 | Integrierende Strecke mit einer Verzögerung 1. Ordnung (PIT_1 -Strecke) | 134 |
| | | |
| 10 | Regler | 139 |
| 10.1 | PID-Regler | 139 |
| 10.1.1 | Analytische Parameterermittlung | 141 |
| 10.1.1.1 | PT_3 -Strecke | 141 |
| 10.1.1.2 | PT_{2s} -Strecke | 143 |
| 10.1.2 | Empirische Einstellregeln für PID-Regler | 143 |
| 10.1.2.1 | Einstellregeln nach ZIEGLER-NICHOLS | 144 |
| 10.1.2.2 | Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK | 145 |
| 10.1.3 | Vergleich der unterschiedlichen Auslegungen | 146 |
| 10.1.4 | T-Summen-Regel | 146 |
| 10.1.5 | Begrenzung der Stellgröße | 147 |
| 10.2 | Analytische Regler | 148 |
| 10.2.1 | Vorgabe des Verhaltens des geschlossenen Regelkreises | 149 |
| 10.2.2 | Verfahren nach TRUXAL-GUILLEMIN | 152 |
| 10.3 | Kaskadenregelung | 157 |
| 10.4 | Schaltende Regler | 162 |
| 10.4.1 | 2-Punkt-Regler | 162 |
| | | |
| 11 | Identifikation von Strecken | 167 |
| 11.1 | Experimentelle Analyse mit sprungförmiger Anregung | 167 |
| 11.1.1 | PT_1 -Element | 168 |
| 11.1.2 | Schwingungsfähiges PT_2 -Element | 169 |
| 11.1.3 | Nicht-schwingungsfähige PT_n -Elemente | 170 |
| 11.1.3.1 | Prinzip des Wendepunktverfahrens für PT_2 -Elemente | 171 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11.1.3.2 | Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit 2 unterschiedlichen Zeitkonstanten | 171 |
| 11.1.3.3 | Wendetangentenverfahren für n Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten | 173 |
| 11.1.3.4 | Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren unterschiedlichen Zeitkonstanten | 175 |
| 11.2 | Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerungen (PIT_n) | 178 |
| 11.3 | Identifikation von Proportional-Differential-Elementen mit Verzögerung 1. Ordnung (PDT_1) | 180 |
| 12 | Stabilität von Regelkreisen | 183 |
| 12.1 | Definition der Stabilität | 183 |
| 12.2 | Stabilitätskriterium nach HURWITZ | 186 |
| 12.2.1 | Beispiele zur Regler-Auslegung nach dem HURWITZ-Kriterium | 187 |
| 12.3 | NYQUIST-Kriterium | 190 |
| 13 | Optimierung von Regelkreisen | 197 |
| 13.1 | Begriff der Regelfläche | 197 |
| 13.1.1 | Integralkriterium der linearen Regelfläche | 197 |
| 13.1.2 | Integralkriterien der Betragsregelfläche | 200 |
| 13.1.3 | Integralkriterium der Quadratischen Regelfläche | 201 |
| 14 | Regelungstechnische Lösungen | 205 |
| 14.1 | Kontinuierlicher Proportional-Regler | 205 |
| 14.2 | Kontinuierlicher Integralregler | 205 |
| 14.3 | 2-Punkt-Regler (mechanisch) | 206 |
| 14.4 | Prozessregler | 207 |
| 14.5 | Spezialregler | 209 |
| 14.6 | Mechatronische Systeme | 211 |
| 14.7 | Automatisierungssysteme | 213 |
| 15 | Lösungen zu den Aufgaben | 215 |
| 15.1 | Aufgaben zu Kapitel 3 | 215 |
| 15.2 | Aufgaben zu Kapitel 4 | 217 |
| 15.3 | Aufgaben zu Kapitel 5 | 218 |
| 15.4 | Aufgabe zu Kapitel 6 | 224 |
| 15.5 | Aufgaben zu Kapitel 7 | 226 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 15.6 Aufgaben zu Kapitel 8 | 230 |
| 15.7 Aufgaben zu Kapitel 9 | 235 |
| 15.8 Aufgaben zu Kapitel 10 | 238 |
| 15.9 Aufgaben zu Kapitel 11 | 241 |
| 15.10 Aufgabe zu Kapitel 12 | 245 |
| | |
| Literaturverzeichnis | 249 |
| | |
| Stichwortverzeichnis | 251 |

1 Einführung in die Regelungstechnik

Die Regelungstechnik ist ein fester Bestandteil auch in unserem alltäglichen Leben. So funktioniert, beispielsweise, aufrechter Gang nur durch Regelung: Die Sinne wirken als Sensoren und die Muskeln als Aktoren. Weitere diesbezügliche **Regelungsaufgaben** sind das Konstanthalten der Körpertemperatur, des Blutdruckes und vieles mehr.

Die erste, technisch bedeutsame regelungstechnische Lösung war der **Fliehkraftregler** von JAMES WATT, der die Drehzahl an Dampfmaschinen regeln sollte. Heute findet man die technische Regelungstechnik in fast allen Anwendungen: Der Temperaturregler des Kühlschranks, der Temperaturregler der Gebäudeheizungsanlage, das Antiblockiersystem im Pkw sind nur einige Beispiele.

Allen regelungstechnischen Lösungen liegt das Prinzip der **Rückkopplung** zu Grunde. Sie beruht auf dem fortlaufenden Vergleich der Regelgröße, z.B. der gemessenen Drehzahl (Istwert) mit der Führungsgröße oder einem vorgegebenen Wert für die Drehzahl (Sollwert). Eine Abweichung des Istwertes vom Sollwert bewirkt einen Einfluss auf das System (Stellgröße).

In der industriellen Produktion stehen die 3 Komponenten Materie, Energie und Information im Mittelpunkt. Während das Interesse bei Produktionsprozessen früher vorrangig ihrer energetischen und stofflichen Seite galt, gewinnen bei ihrer Automatisierung die sie begleitenden/überlagernden Informationen zunehmend dominierenden Einfluss.

1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik

Nach DIN 66 201 (bzw. DIN V 19 233) gilt:

„Ein Prozess ist eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird. Ein technischer Prozess ist ein Prozess, dessen Zustandsgrößen mit technischen Mitteln erfasst und beeinflusst (gemessen, gesteuert und geregelt) werden können.“

Hierdurch läuft in einer technischen Anlage ein technischer Prozess ab (Bild 1.1), der durch das Automatisierungsgerät gesteuert oder geregelt wird (Bild 1.2).

Der Material-, Energie- und/oder Informationsfluss wird durch die technische Anlage verändert. Vertikal verläuft immer ein **Informationsfluss** zur Steuerung. Hier werden Prozesszustände mit Sensoren erfasst, in der Steuerung verarbeitet und an Aktoren weitergegeben, die den technischen Prozess beeinflussen. Technische Anlagen wirken in ihrer **Verarbeitungsart** auf den Material-, Energie- oder Informationsfluss ein. Dabei unterscheidet man zwischen **kontinuierlichen und diskreten Prozessen**.

Kontinuierliche Prozesse:

- energetische Prozesse (Kraftwerke),
- chemische Prozesse (Chemieanlagen),
- thermische Prozesse (Heizungen).

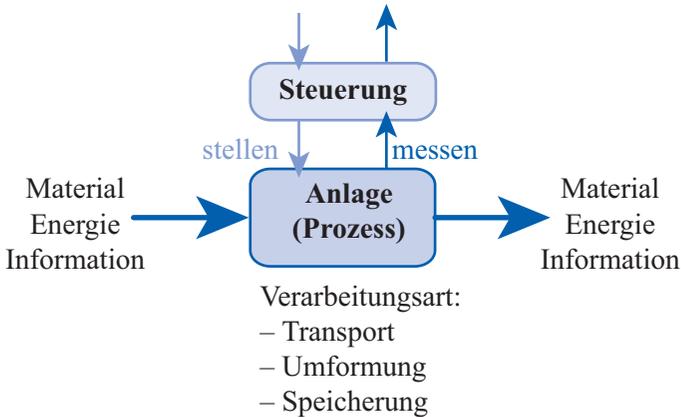


Bild 1.1 Der industrielle Prozess

Diskrete Prozesse

- Fertigungsprozesse (Maschinensysteme),
- Lagerprozesse (Hochregallager),
- Transportprozesse (Verkehrssysteme).

In der Praxis sind oft beide Prozesstypen parallel anzutreffen.

1.2 Definition von Steuerung und Regelung

1.2.1 Steuerung

Steuern bedeutet nach DIN 19 226:



„Steuern ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.“

Kennzeichen für das Steuern ist der **offene Wirkungsweg**, bei dem die durch die Eingangsgröße beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken.

Die Erfassung der Eingangsgrößen erfolgt über Sensoren, die überwiegend binär arbeiten (Ein/Aus, Sollwert über-/unterschritten usw.).

Exemplarisch: Heizungssteuerung (Warmwasserheizung)

Ziel der als Beispiel in Bild 1.2 gezeigten Heizungssteuerung ist es, die Raumtemperatur x_r auf einem konstanten Wert zu halten. Dies geschieht mit Hilfe eines Heizkörpers mittels Verstellen des Heizungsventils.

Die Raumtemperatur wird sich ändern, wenn sich die Außentemperatur ändert. Die Außentemperatur wirkt also als sog. **Störgröße** z_1 . Die Raumtemperatur kann

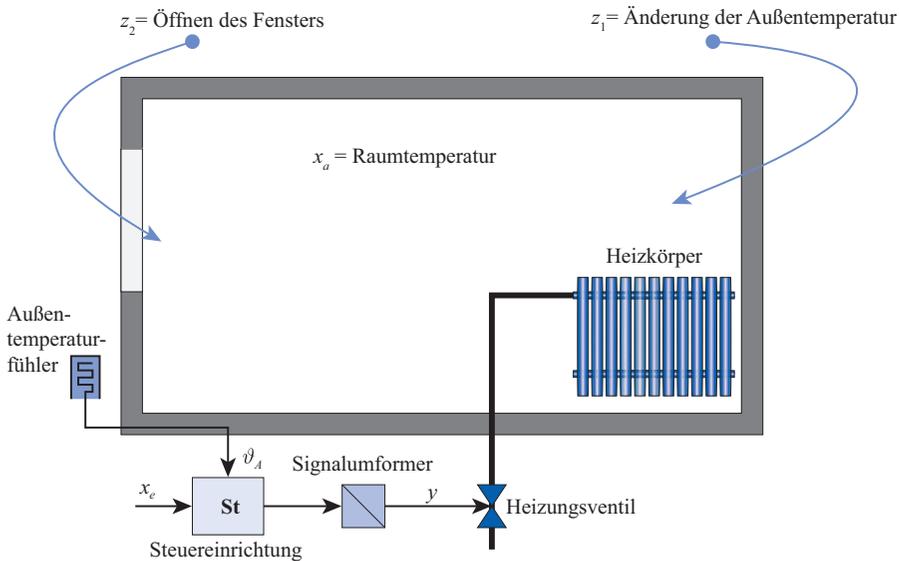


Bild 1.2 Raumtemperatursteuerung

konstant gehalten werden, indem ein geeignetes Steuergerät den Heizwasserdurchfluss verstellt, wenn die Außentemperatur z_1 sich ändert.

Kennt man nun den Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der für das Konstanthalten der Raumtemperatur notwendigen Heizleistung x_e , so kann durch eine entsprechende Steuerung diese Störgröße in ihrer Wirkung kompensiert werden.

Es können jedoch noch weitere Störgrößen (z_2) auftreten, z.B. das Öffnen eines Fensters oder einer Tür usw. Die Wirkung dieser Störgrößen auf die Raumtemperatur wird durch das Steuerungssystem nicht aufgehoben.

Der Wirkungsablauf der Heizungssteuerung zeigt, dass zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße ein bestimmtes Verhalten vorhanden ist.

Das Kennzeichen der Steuerung ist der offene Wirkungskreislauf über die **Steuerkette**, wie sie in Bild 1.3 dargestellt ist.

Man erkennt hierbei deutlich die offene, rückwirkungsfrei angenommene Steuerkette. Dabei bedeutet rückwirkungsfrei, dass die Eingangssignale x_e die Stellgröße y , diese aber nicht x_e beeinflusst. Sind keine Störungen vorhanden, so ist x_a eindeutig nur von x_e abhängig.

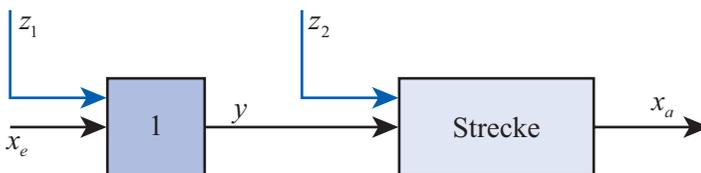


Bild 1.3 Signalflussplan der offenen Steuerkette

1.2.2 Regelung

Regeln bedeutet nach DIN 19 226:



„Regeln ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die zu regelnde Größe (Regelgröße = Istwert), erfasst, mit einer anderen Größe, der vorgegebenen Führungsgröße (Sollwert), verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.“

Der sich ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis, statt.

Das Erfassen der Eingangsgrößen erfolgt über analoge oder digitale Messeinrichtungen, damit der so erfasste Istwert dem Sollwert angeglichen werden kann.“

Exemplarisch: Heizungsregelung

Bei diesem Beispiel soll die Temperatur des Raums (Bild 1.4) auf einem vorgeschriebenen Wert durch Regelung der Heizungsanlage gehalten werden.

Die Aufgabe dieser Raumtemperaturregelung besteht darin, die Temperatur innerhalb des Raumes entweder konstant zu halten oder nach einem vorgeschriebenen Programm zu ändern, unabhängig von irgendwelchen Störgrößen. Dazu ist es notwendig, die zu regelnde Größe (Raumtemperatur) fortlaufend zu messen und ihren Wert, den **Istwert**, mit einem vorgegebenen **Sollwert** zu vergleichen. Die Regeleinrichtung muss so beschaffen sein, dass sie auf eine Abweichung der Raumtemperatur vom Sollwert reagiert und ein geeignetes Stellglied so verstellt, dass die aufgetretene Abweichung der zu regelnden Größe von ihrem Sollwert ausgeglichen

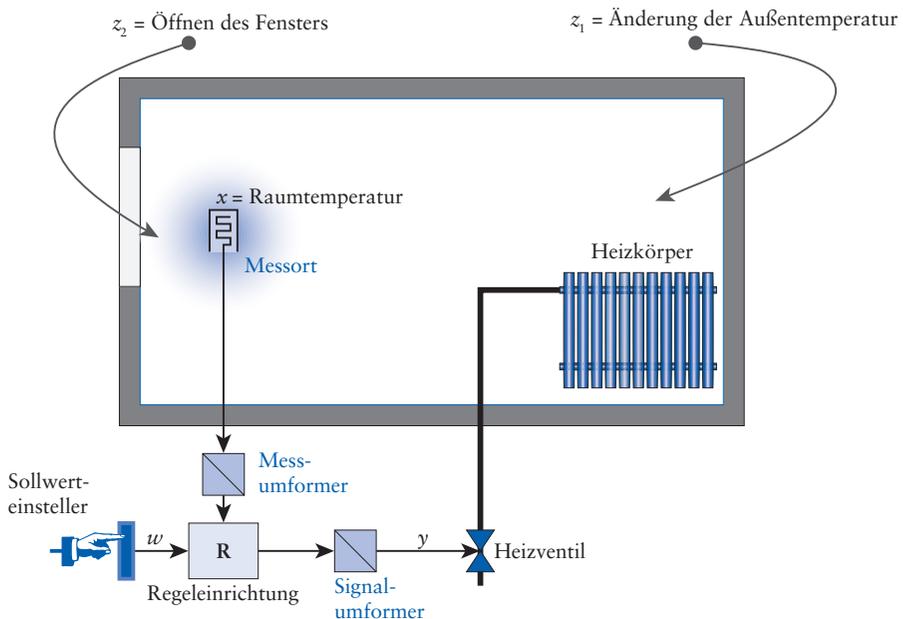


Bild 1.4 Raumtemperaturregelung

wird. Treten in diesem System Störungen auf, so bewirken sie eine **Regelabweichung**, die einen Regelvorgang auslösen. Die Wirkung der Störgröße selbst ist somit eine wesentliche Ursache dieses Regelvorganges. Störgrößen sind bei diesem Regelvorgang: Außentemperatur, Sonneneinstrahlung, Öffnen von Fenstern, Zahl der Personen usw.

In Bild 1.4 kann man die Regelstrecke sehr gut erkennen, die im Wesentlichen aus Signalumformer, Heizungsventil, Heizkörper, Raumtemperaturfühler und dem zu heizenden Raum besteht. Die Raumtemperatur (**Regelgröße**) wird mit einem Fühler im Raum (Messort) gemessen. Der gemessene Wert wird fortlaufend mit der **Führungsgröße**, die mit einem Sollwertesteller vorgegeben wird, in der Vergleichsstelle verglichen. Daraufhin regelt der Regler über eine Signalumformung das Heizungsventil (Stellglied), bis die gewünschte Temperatur im Raum erreicht ist. Die beeinflussenden Störgrößen (z_1, z_2) werden in ihrer Wirkung auf die Regelgröße erfasst und ausgeregelt.

Das Prinzip einer Regelung (Bild 1.5) ist das fortlaufende:

- **Messen:** Die Regelgröße wird direkt oder mittels Sensoren gemessen.
- **Vergleichen:** Der Wert der Regelgröße wird mit dem Sollwert verglichen, die Differenz ist die Regelabweichung.
- **Stellen:** Aus der Regelabweichung wird unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Regelstrecke die Stellgröße bestimmt.

In Blockschaltbild (Bild 1.6) ist der **Signalfluss** der Raumtemperaturregelung dargestellt. Die Entsprechungen aus dem Prinzipbild sind deutlich erkennbar.

Bild 1.5 Kreisstruktur einer Regelung

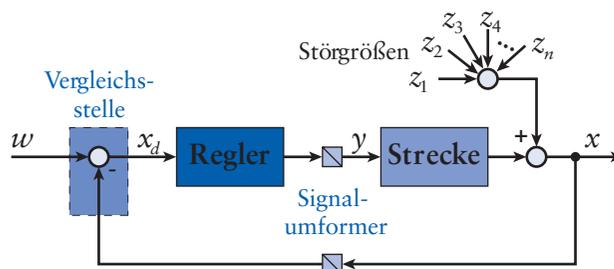
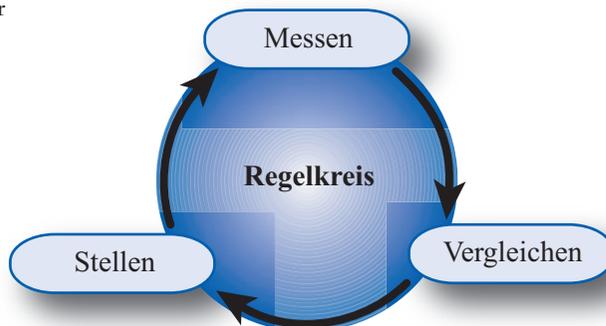


Bild 1.6 Signalflussplan des Regelkreises

Größen:

- w Führungsgröße oder Sollwert
- x Regelgröße oder Istwert
- y Stellgröße
- x_d Regeldifferenz
- z_i Störgrößen

Der Regelkreis hat also 2 Aufgaben zu erfüllen:

- Die Regelgröße $x(t)$ hat einer Veränderung der Führungsgröße $w(t)$ möglichst gut zu folgen. Diese Eigenschaft wird als **Führungsverhalten** des Regelkreises bezeichnet.
- Der Regelkreis soll Störungen, die auf die Strecke einwirken, in dem Sinne optimal ausregeln, dass die Regelgröße – auch bei permanenter Störungseinwirkung – wieder den Wert der Führungsgröße annimmt. Diese Eigenschaft des Regelkreises wird als sein **Störverhalten** bezeichnet.

Der Zustand „optimal“ muss anhand der realen Aufgabenstellung definiert werden. Theoretisch optimal wäre folgendes Verhalten (Bild 1.7):

- sofortiges Folgen der Regelgröße $x(t)$ nach einer Führungsgrößenänderung $w(t)$,
- sofortiges Ausregeln einer Störung $z(t)$ ohne Beeinflussung der Regelgröße $x(t)$.

Wegen des nicht verzögerungsfreien **Übertragungsverhaltens** der Übertragungsglieder des Regelkreises, insbesondere der Regelstrecke, ist ein solches Führungs- und Störverhalten nicht realisierbar. Bei einem realen Regelkreis ist das Übergangsverhalten von einem Systemzustand in den anderen (Stör- oder Führungsgrößenänderung) durch Abweichungen der Regelgröße vom theoretisch optimalen Verlauf gekennzeichnet (Bild 1.8). Auch ist nicht bei jeder beliebigen Regelkreiskonfiguration sichergestellt, dass der stationäre Endwert der Regelgröße genau den Wert der Führungsgröße annimmt.

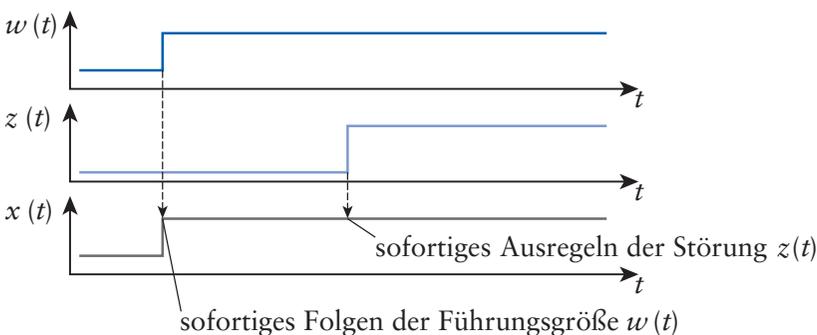


Bild 1.7 Ideales Verhalten eines Regelkreises

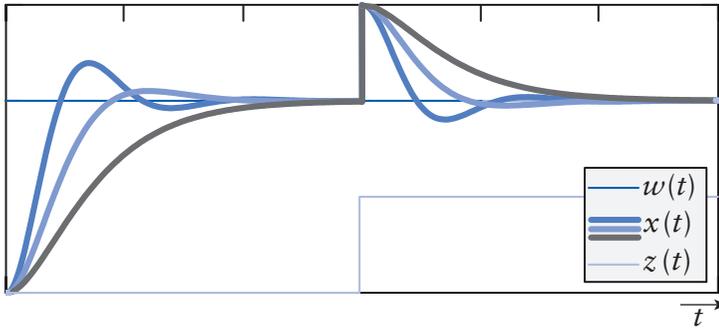


Bild 1.8 Reales Verhalten eines Regelkreises

1.2.3 Merkmale von Regelungen und Steuerungen

Merkmale und Eigenschaften von Regelung und Steuerung sind in Tabelle 1.1 zusammengefasst.

Tabelle 1.1 Merkmale von Regelung und Steuerung

| Kennzeichen | Regelung | Steuerung |
|--|--|--|
| Wirkungsweg: | geschlossen (Regelkreis) | offen (Steuerkette) |
| Messung und Vergleich der einzustellenden Größe: | zu regelnde Größe wird gemessen und verglichen | zu steuernde Größe wird nicht gemessen und nicht verglichen |
| Reaktion auf Störung (allgemein): | wirkt allen Störungen entgegen, die an dem zu regelnden System angreifen | reagiert nur auf die Störungen, die gemessen und in der Steuerung verarbeitet werden |
| Reaktion auf Störungen (zeitlich): | reagiert erst dann, wenn die Differenz von Soll- und Istwert sich ändert | reagiert schnell, da die Störung direkt gemessen wird |
| technischer Aufwand: | geringer Aufwand: Messung der zu regelnden Größe, Sollwert-Istwert-Vergleich, Leistungsverstärkung | hoher Aufwand, wenn viele Störungen berücksichtigt werden müssen, geringer Aufwand, wenn keine Störungen auftreten |
| Verhalten bei instabilen Systemen: | bei instabilen Systemen müssen Regelungen eingesetzt werden | Steuerungen sind bei instabilen Systemen unbrauchbar |

2 Signale

Die **Größen eines Systems** müssen qualitativ eindeutigen Definitionen genügen, und sie müssen quantitativ eindeutig bestimmbar sein. Diese Größen können, wie in Bild 2.1 dargestellt, von außen auf ein System einwirken (Eingangsgrößen), sie können vom System nach außen wirken (Ausgangsgrößen), und sie können im Inneren des Systems wirken (innere Größen, Zustandsgrößen).

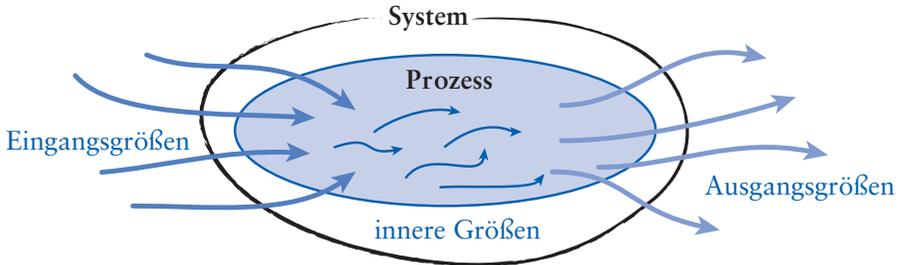


Bild 2.1 Systemzusammenhänge

- ❑ **Eingangsgrößen** wirken auf das System von außen, und sie werden nicht vom System beeinflusst.
- ❑ **Ausgangsgrößen** werden vom betrachteten System beeinflusst und wirken nach außen.
- ❑ **Innere Größen** wirken nur im Inneren des Systems und werden eindeutig von den Eingangsgrößen beeinflusst.

Diese Zusammenhänge sind am Beispiel eines Windrads in Bild 2.2 erläutert:

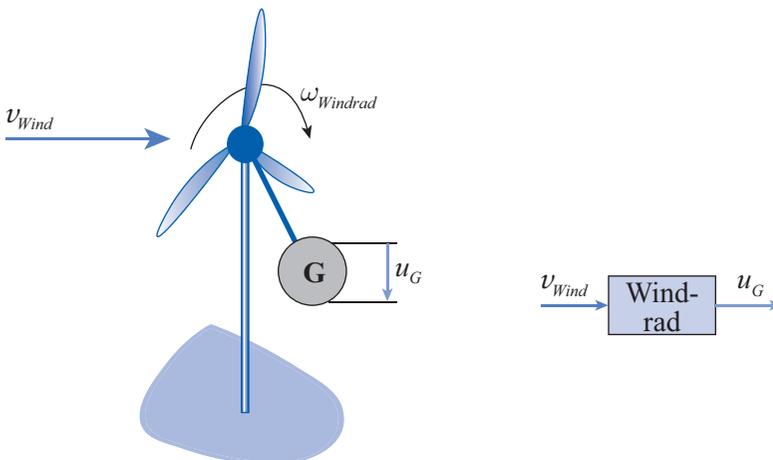


Bild 2.2 System Windrad

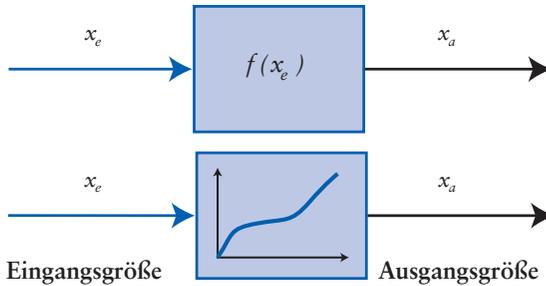


Bild 2.3 Signalblock

Die Windgeschwindigkeit v_{Wind} wirkt von außen auf das Windrad und stellt somit die Eingangsgröße des Systems Windrad dar. Die Windgeschwindigkeit bewirkt die Drehung des Windrades mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_{Windrad}$. Die Generatorspannung u_G steht zur Nutzung der elektrischen Energie zur Verfügung und stellt so die Ausgangsgröße des Systems dar. Die Winkelgeschwindigkeit des Windrades wirkt also nur im Inneren.

Wie in Bild 2.2 rechts abgebildet, werden die Systeme und ihre Signale mit Hilfe von Blocksymbolen dargestellt. Sie stellen grafisch mathematische Beziehungen dar und werden noch ausführlich behandelt.

Der **Signalflussplan** besteht aus **Signalübertragungsblöcken**, die einen linearen oder einen nichtlinearen funktionalen Zusammenhang beschreiben. Darüber hinaus, insbesondere bei zeitlich veränderlichen Signalen, wird das Übertragungsverhalten z.B. mit Hilfe von Differentialgleichungen (Bild 2.3) ermittelt.

Die Ausgangsgröße ist:

$$x_a = f(x_e)$$

Kennzeichen von Signalen

Die Einteilung von Signalen (Tabelle 2.1) wird unter folgenden Gesichtspunkten vorgenommen:

- Das Signal kann entweder **alle Werte** eines vorgegebenen Bereichs einnehmen oder nicht.
- Das Signal ist in **jedem beliebigen Zeitpunkt** veränderbar oder nicht.

Tabelle 1.4 Signalarten

| | |
|--------------------------|---|
| analog | wenn das Signal innerhalb eines vorgegebenen Bereichs jeden beliebigen Wert annehmen kann; |
| diskret | wenn das Signal nur diskrete Werte annehmen kann; diskrete Signale heißen digital, wenn die diskreten Werte des Signals kodiert (verschlüsselt) sind; |
| kontinuierlich | wenn das Signal zu jedem beliebigen Zeitpunkt veränderbar ist; |
| diskontinuierlich | wenn das Signal nur zu diskreten Zeitpunkten andere Werte annehmen kann. |

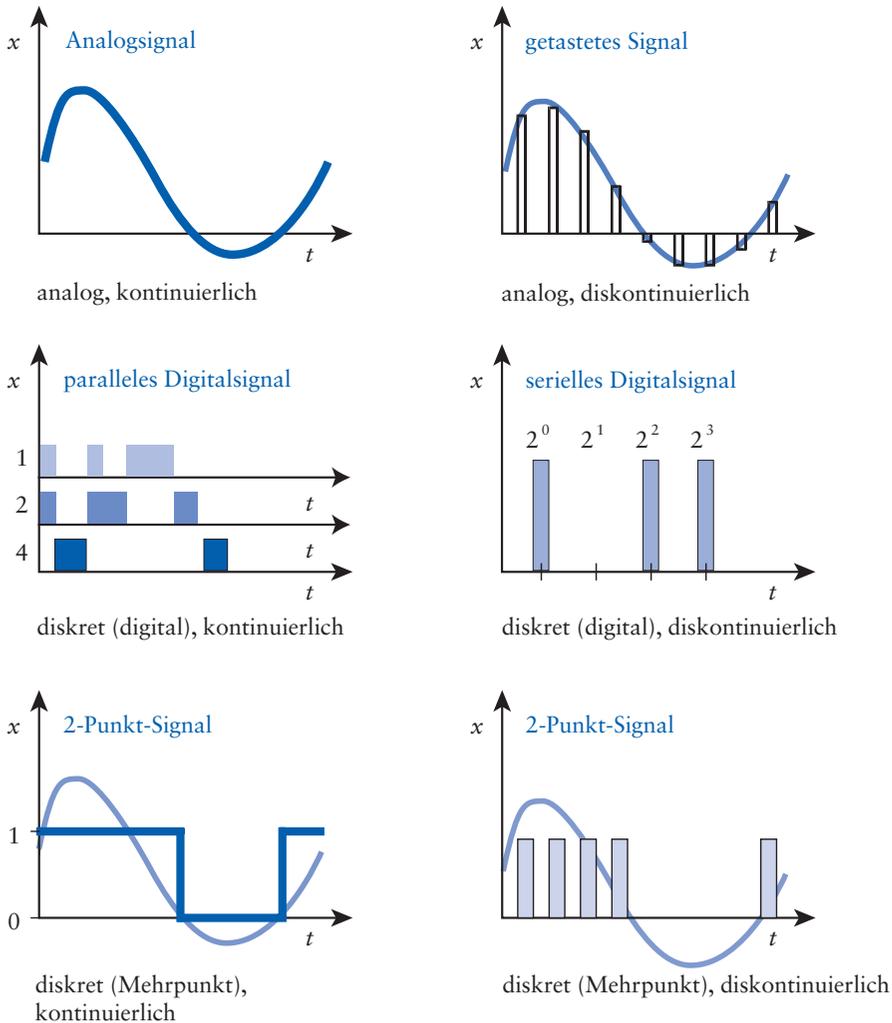


Bild 2.4 Typische Signalformen

Beispiele typischer Signalformen aus der Automatisierungstechnik sind in Bild 2.4 wiedergegeben. Aus Anwendersicht unterscheidet man nach:

- Nutzsignalen und
- Störsignalen (die z.B. aus Umwelteinflüssen oder aus anderen Systemen resultieren).

Technische Signale entstehen in der Praxis aus der Überlagerung von Nutzsinal und Störsignal. Ein anschauliches Beispiel zeigt Bild 2.5.

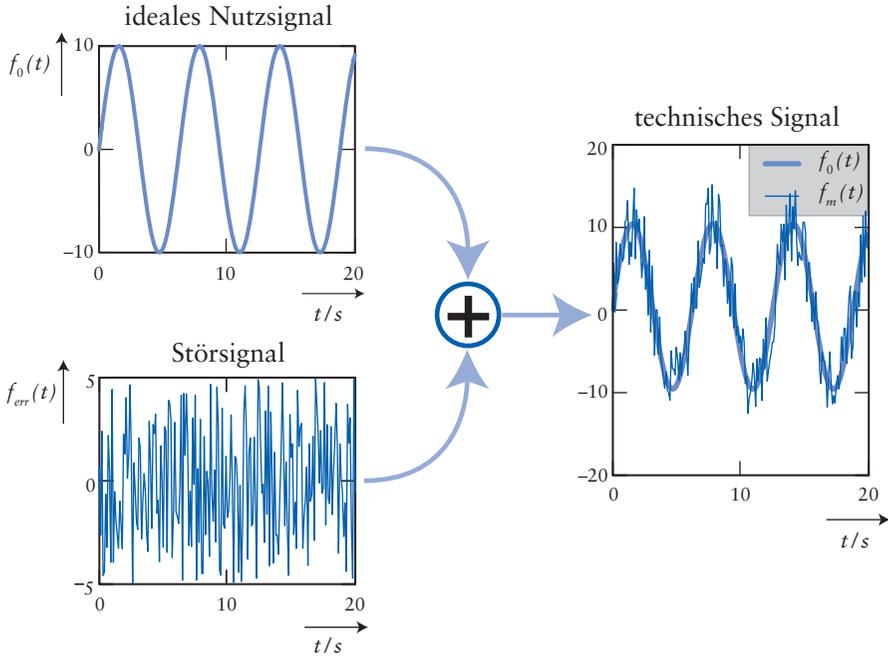


Bild 2.5 Beispiel für ein technisches Signal

Weitere Unterscheidungsmerkmale von Signalen sind in Bild 2.6 dargestellt.

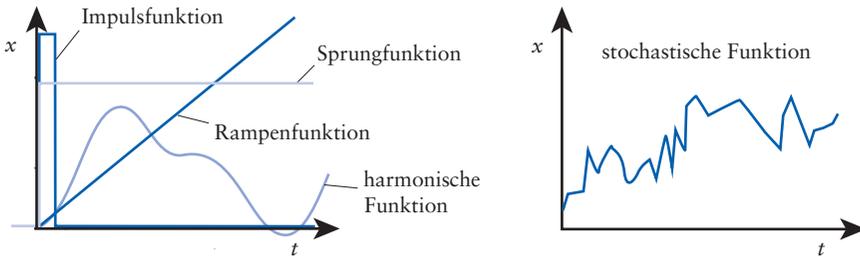


Bild 2.6 Signalgrundformen

3 Systemeigenschaften

Lässt sich das Verhalten eines Systems aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten analytisch erfassen oder anhand von Messungen bestimmen und in eine mathematische Beschreibungsform bringen, dann stellen die mathematischen Gleichungen das **mathematische Modell** des Systems dar. Mathematische Modelle werden gebildet z.B. durch:

- Differentialgleichungen oder
- algebraische bzw. logische Gleichungen.

3.1 Dynamisches und statisches Verhalten von Systemen

Man unterscheidet bei Systemen gewöhnlich zwischen dynamischem und statischem Verhalten.

Dynamisches Verhalten, auch Zeitverhalten genannt, beschreibt den zeitlichen Verlauf der Systemausgangsgröße $x_a(t)$ bei vorgegebener Systemeingangsgröße $x_e(t)$. Als Beispiel ist in Bild 3.1 die Antwort $x_a(t)$ eines Systems auf eine sprunghafte Veränderung der Eingangsgröße $x_e(t)$ wiedergegeben. In diesem Beispiel beschreibt $x_a(t)$ den zeitlichen Übergang von einem stationären Anfangszustand zur Zeit $t \rightarrow 0$ in einen stationären Endzustand (theoretisch für $t \rightarrow \infty$) $x_a(\infty)$.

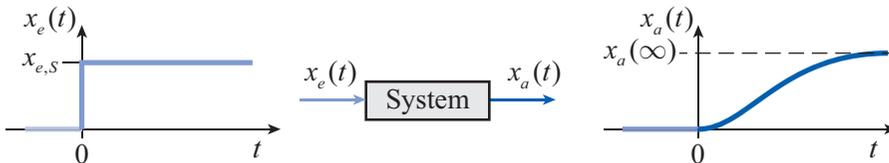


Bild 3.1 Beispiel für das dynamische Verhalten eines Systems

Variiert man nun die Sprunghöhe $x_{e,S} = konst.$ und trägt die sich einstellenden stationären Endwerte der Ausgangsgröße $x_{a,S} = x_a(t \rightarrow \infty)$ über $x_{e,S}$ auf, so erhält man die statische Kennlinie

$$x_{a,S} = f(x_{e,S}) \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Das **statische Verhalten** beschreibt die Abhängigkeit der sich einstellenden stationären Endwerte der Ausgangsgröße von stationären Werten der Eingangsgröße.

Bild 3.2 zeigt ein Beispiel für dynamisches und für statisches Verhalten eines Systems, das aufgrund der gekrümmten Kennlinie ein nichtlineares Verhalten aufweist.

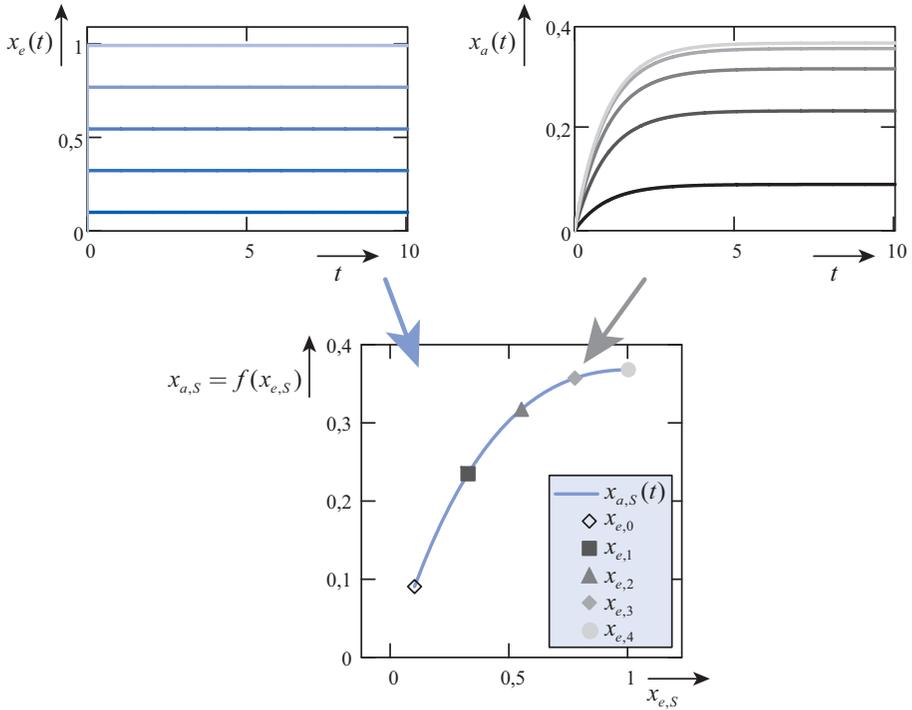


Bild 3.2 Beispiel für dynamisches und statisches Verhalten eines Systems

3.2 Lineare und nichtlineare Systeme

Lässt man auf den Eingang eines Systems nacheinander n beliebige Eingangsgrößen $x_{e,i}(t)$ einwirken und bestimmt die Systemantworten $x_{a,i}(t)$, so ergibt sich die Systemantwort auf die Summe der n Systemantworten $x_{a,i}(t)$. Diese Eigenschaft wird als **Superpositionsprinzip** bezeichnet, und es gilt:

$$\sum_{i=1}^n k_i \cdot x_{a,i}(t) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot f(x_{e,i}(t)) = f\left(\sum_{i=1}^n k_i \cdot x_{e,i}\right) \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Ist diese Eigenschaft erfüllt, dann wird das System als linear bezeichnet, andernfalls als nichtlinear.



Beispiel

Für das Proportionalelement

$$x_a = K_p \cdot x_e$$

gilt das Verstärkungsprinzip