

Institut für Regelungstechnik
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Abel

Umdruck zur Vorlesung

Mess- und Regelungstechnik
und Ergänzungen (Höhere Regelungstechnik)

31. Auflage 2007

Nachdruck und Vervielfältigung nicht gestattet



Anschrift:

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen
Steinbachstraße 54 (Herwart-Opitz-Haus)
52074 Aachen

Telefon: 0241/80-27500
Telefax: 0241/80-22296
e-mail: secretary@irt.rwth-aachen.de
web: www.irt.rwth-aachen.de

Herausgeber:

© Aachener Forschungsgesellschaft Regelungstechnik e.V. (AFR)
Steinbachstraße 54B/211 (Herwart-Opitz-Haus)
52074 Aachen

Vorwort

Der vorliegende Umdruck enthält den Stoff der Vorlesung „Mess- und Regelungstechnik“ und Ergänzungen dazu. Auswahl und Darstellung des Stoffes wurden soweit wie möglich am derzeitigen Lehrangebot speziell für den Studiengang Maschinenbau der RWTH Aachen orientiert, in dem „Mess- und Regelungstechnik“ ein Pflichtfach ist. Der Umdruck ist als Arbeitsunterlage für das Studium geschrieben. Er ersetzt nicht die aktive Teilnahme an Vorlesungen und Übungen, in denen der Stoff erläutert, vertieft und zur Lösung einschlägiger Aufgaben angewandt wird.

Die Ergänzungen sind für Leser gedacht, die sich in weiterführenden Lehrveranstaltungen, im Zusammenhang mit Studien- und Diplomarbeiten oder während ihrer späteren Tätigkeit intensiver mit der Regelungstechnik befassen möchten. Der Ergänzungsstoff wird in der Vorlesung „Höhere Regelungstechnik“ (HRT) behandelt und ist im Umdruck durch ein „E“ nach der Seitenzahl gekennzeichnet.

Die vorliegende 31. Auflage des Umdrucks unterscheidet sich im Wesentlichen von der 30. Auflage durch die Hinzunahme eines Kapitels zu Ereignisdiskreten Systemen. Diese Ergänzung erfolgt in Hinblick auf die auch in der Vorlesung geplante Aufnahme dieses Lehrinhaltes, die im Rahmen der Umstellung des Studiengangs Maschinenbau vom Diplom auf das Bachelor/Mastersystem vorgenommen werden wird. Da die Ereignisdiskreten Systeme jedoch noch nicht Bestandteil des Vorlesungsstoffs sind, ist das Kapitel durch ein „E“ nach der Seitenzahl gekennzeichnet.

Auch im nunmehr siebten Jahr als Fachvertreter für Regelungstechnik in der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen ist es nach wie vor mein Wunsch und Ziel, in dieser Tätigkeit neben den fachlichen Notwendigkeiten auch etwas von meiner Begeisterung für die Regelungstechnik zu vermitteln. Vor dem Hintergrund, dass die vergleichsweise umfangreiche mathematische Theorie der Regelungstechnik eine große Hürde für viele Studierende (und deren Begeisterung) darstellt, macht es aus meiner Sicht Sinn, zeitgemäße Rechnerwerkzeuge wie die der MATLAB-Programmfamilie bereits in der Lehre zu verankern, wobei die mit diesen Programmen umgesetzten Verfahren natürlich unabhängig davon verstanden und dazu auch einmal von Hand angewandt werden

müssen. Die große Verbreitung, die diese Rechnerwerkzeuge in der Industrie – nicht nur im Bereich der Regelungstechnik – gefunden haben, spricht weiterhin dafür, sich als Studierender diese Qualifikation anzueignen. In Zusammenarbeit mit The MathWorks, dem Hersteller dieser Programme, wurde daher die Vorlesung „Mess- und Regelungstechnik“ um ein von den Studierenden freiwillig nutzbares Zusatzangebot erweitert, welches an den Übungen der Lehrveranstaltung orientierte, ausführbare und kommentierte Selbstlernkurse sowie den kostengünstigen Erwerb zugeschnittener Lizenzen einschließt. Weitere Informationen dazu enthält die Homepage www.irt.rwth-aachen.de des Instituts für Regelungstechnik der RWTH Aachen.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Regelungstechnik gilt mein Dank für ihre stete Mitarbeit an der Weiterentwicklung dieses Umdrucks und des entsprechenden Lehrangebots. Den Studierenden des Maschinenbaus an der RWTH Aachen danke ich für das entgegen gebrachte Interesse und hoffe, dass sie neben der zu absolvierenden Studienleistung aus dem Fach auch neue Erkenntnisse und Betrachtungsweisen gewinnen, die ihnen für die weiteren beruflichen Aufgaben von Nutzen sind. Die Herausgabe des Umdrucks besorgte wieder die Aachener Forschungsgesellschaft Regelungstechnik e.V.

Aachen, im September 2007

Dirk Abel

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einführung | 1 |
| 1.1 | Messen, Steuern, Regeln | 1 |
| 1.2 | Grundstruktur des Regelkreises | 5 |
| 1.3 | Wirkungsplan | 6 |
| 2 | Statisches Verhalten | 15 |
| 2.1 | Statisches Verhalten von Übertragungsgliedern | 15 |
| 2.2 | Linearisierung, Abweichungsgrößen | 15 |
| 2.3 | Statisches Verhalten von Regelkreisen | 23 |
| 2.4 | Stellbereich und Regelbereich | 33 |
| 3 | Dynamisches Verhalten von Übertragungsgliedern | 37 |
| 3.1 | Modelle für die Dynamik von Übertragungsgliedern . . | 37 |
| 3.2 | Aufstellen von Differentialgleichungen | 38 |
| 3.3 | Linearisierung nichtlinearer Differentialgleichungen . . | 44 |
| 3.4 | Lösen linearer Differentialgleichungen mit konstanten Ko- effizienten | 46 |
| 3.5 | Laplace-Transformation | 47 |
| 3.5.1 | Transformation von Zeitfunktionen | 47 |
| 3.5.2 | Transformation von Operationen | 50 |
| 3.5.3 | Anwendung zur Lösung linearer Differentialglei- chungen mit konstanten Koeffizienten | 52 |
| 3.6 | Übergangsfunktion, Gewichtsfunktion | 56 |
| 3.7 | Übertragungsfunktion | 59 |
| 3.8 | Grenzwertsätze | 62 |
| 3.9 | Frequenzgang | 63 |
| 3.9.1 | Allgemeines | 63 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.9.2 | Frequenzgang und Differentialgleichung | 64 |
| 3.9.3 | Frequenzgang von Totzeitgliedern | 70 |
| 3.9.4 | Messen von Frequenzgängen | 71 |
| 3.9.5 | Ortskurvendarstellung von Frequenzgängen | 73 |
| 3.9.6 | Bode-Diagramm | 76 |
| 3.10 | Rechenregeln für Frequenzgänge und Übertragungsfunktionen | 81 |
| 3.11 | Faltungsintegral | 86 |
| 3.12 | Zusammenhänge zwischen Zeit- und Frequenzbereich | 90 |
| 4 | Lineare Regelkreisglieder | 95 |
| 4.1 | Allgemeines | 95 |
| 4.2 | Anmerkungen zu den Tabellen | 106 |
| 4.2.1 | P, I, D | 106 |
| 4.2.2 | PI, PD, PID | 106 |
| 4.2.3 | PT_1 , PT_2 , PT_n | 111 |
| 4.2.4 | IT_1 | 119 |
| 4.2.5 | DT_1 | 120 |
| 4.2.6 | PIT_1 | 121 |
| 4.2.7 | PDT_1 , PPT_1 | 121 |
| 4.2.8 | PT_t , $PT_1 T_t$ | 123 |
| 4.2.9 | PA_1 | 123 |
| 4.3 | Minimalphasenglieder, Phasenminimumsysteme | 124 |
| 5 | Reglereinstellung und Stabilität von Regelkreisen | 129 |
| 5.1 | Allgemeines | 129 |
| 5.2 | Beispiele für Regelungen | 130 |
| 5.3 | Gütemaße | 139 |
| 5.4 | Einstellregeln | 142 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.5 | Algebraische Stabilitätskriterien | 145 |
| 5.6 | Stabilitätsprüfung und Reglereinstellung mit dem Frequenzgang des aufgeschnittenen Regelkreises | 155 |
| 5.6.1 | Nyquist-Kriterium | 155 |
| 5.6.2 | Amplituden- und Phasenreserve | 168 |
| 5.6.3 | Reglerauslegung im Bode-Diagramm | 170 |
| 5.7 | Betragsoptimum und Symmetrisches Optimum | 177 E |
| 5.8 | Wurzelortskurven | 184 E |
| 6 | Gerätetechnik | 199 |
| 6.1 | Allgemeines | 199 |
| 6.2 | Regler | 203 |
| 6.2.1 | Regler ohne Hilfsenergie | 203 |
| 6.2.2 | Verstärker mit Rückführung | 206 |
| 6.2.3 | Hydraulische Regler | 209 |
| 6.2.4 | Elektronische Regler | 212 |
| 6.3 | Messgeräte | 218 |
| 6.3.1 | Allgemeines | 218 |
| 6.3.2 | Prinzipien des Messens | 219 |
| 6.3.3 | Ausführungsbeispiele | 222 |
| 6.4 | Stelleinrichtungen | 231 |
| 6.4.1 | Allgemeines | 231 |
| 6.4.2 | Pneumatische Steller | 232 |
| 6.4.3 | Hydraulische Steller | 234 |
| 6.4.4 | Elektrische Steller | 235 |
| 7 | Lineare Abtastregelungen | 237 |
| 7.1 | Allgemeines | 237 |
| 7.2 | Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme | 241 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.3 | Quasikontinuierliche Abtastregelungen | 249 |
| 7.4 | Z-Transformation | 255 E |
| 7.5 | Z-Übertragungsfunktion und Stabilität | 261 E |
| 7.6 | Zeitdiskrete Modelle kontinuierlicher Systeme | 265 E |
| 7.7 | Entwurf zeitdiskreter Regelungen | 272 E |
| 7.7.1 | Allgemeines | 272 E |
| 7.7.2 | Reglerentwurf in der z -Ebene | 273 E |
| 7.7.3 | Regler mit endlicher Einstellzeit | 276 E |
| 8 | Vermaschte Regelkreise | 285 |
| 8.1 | Allgemeines | 285 |
| 8.2 | Vorregelung | 286 |
| 8.3 | Störgrößenaufschaltung | 287 |
| 8.4 | Hilfsstellgröße | 289 |
| 8.5 | Hilfsregelgröße | 291 |
| 8.6 | Kaskadenregelung | 293 |
| 8.7 | Vorsteuerung und Führungsgrößenfilter | 295 |
| 8.8 | Mehrgrößenregelungen | 297 |
| 9 | Zustandsraum | 303 |
| 9.1 | Allgemeines | 303 |
| 9.2 | Aufstellen der Zustandsgleichungen | 306 |
| 9.3 | Lösung der Zustandsraumgleichungen | 313 |
| 9.4 | Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit | 318 |
| 9.5 | Stabilität und Regelung im Zustandsraum | 319 |
| 9.5.1 | Stabilität und Zustandsrückführung | 319 |
| 9.5.2 | Polvorgabe | 320 |
| 9.5.3 | Optimale Zustandsregelung | 323 E |
| 9.6 | Schätzung des Zustandsvektors | 325 E |

| | |
|---|--------------|
| 9.7 Zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung | 327 E |
| 10 Modellgestützte Prädiktive Regelung | 331 E |
| 10.1 Allgemeines | 331 E |
| 10.2 Formulierung des Optimierungsproblems | 332 E |
| 10.3 Lineare MPR | 335 E |
| 10.3.1 Varianten linearer MPR | 335 E |
| 10.3.2 Aufstellen der Kostenfunktion | 338 E |
| 10.3.3 Lösung des Optimierungsproblems | 340 E |
| 10.3.4 Einstellparameter | 345 E |
| 10.3.5 Stabilität | 347 E |
| 10.3.6 Stationäre Genauigkeit | 349 E |
| 10.4 Nichtlineare Prädiktive Regelung | 352 E |
| 11 Robuste Regelung | 361 E |
| 11.1 Einleitung | 361 E |
| 11.1.1 Steuerung | 361 E |
| 11.1.2 Regelung | 362 E |
| 11.1.3 Begriffe | 362 E |
| 11.1.4 Ziele des Reglerentwurfs und Sollverhalten | 363 E |
| 11.1.5 Methoden der robusten Regelung | 363 E |
| 11.1.6 Modellungenauigkeiten und Modellunsicherheiten | 364 E |
| 11.2 Parameterraumverfahren | 364 E |
| 11.2.1 Voraussetzungen | 365 E |
| 11.2.2 Erster Schritt: Reglersynthese | 366 E |
| 11.2.3 Zweiter Schritt: Regelkreisanalyse | 366 E |
| 11.2.4 Ermittlung stabiler Mengen mit dem Parameter- raumverfahren | 367 E |
| 11.3 Anwendung: Robuste Einstellung für PID-Regler | 369 E |

| | | |
|-----------|--|--------------|
| 11.3.1 | Stabilitätsgrenzen bei der Reglersynthese | 370 E |
| 11.3.2 | Stabiles Gebiet in k | 373 E |
| 11.4 | Abbildung weiterer Solleigenschaften | 374 E |
| 12 | Nichtlineare Systeme | 377 |
| 12.1 | Regelungssysteme mit nichtlinearen Übertragungsgliedern | 377 |
| 12.1.1 | Allgemeines | 377 |
| 12.1.2 | Folgeregelungen mit nichtlinearen Übertragungsgliedern | 378 |
| 12.1.3 | Regelungen mit schaltenden Reglern | 381 |
| 12.1.4 | Analyse im Frequenzbereich mittels Beschreibungsfunktionen | 390 E |
| 12.2 | Kenngößen und Klassen nichtlinearer Systeme | 406 E |
| 12.2.1 | Stabilität nichtlinearer Systeme | 406 E |
| 12.2.2 | Flachheit und Vorsteuerungsentwurf | 407 E |
| 12.2.3 | Linearisierbarkeit | 412 E |
| 12.3 | Nichtlineare Regelungen | 414 E |
| 12.3.1 | Regelung mit linearer Fehlerdynamik | 414 E |
| 12.3.2 | Regelung bei Modellunsicherheiten | 415 E |
| 13 | Stochastische Größen | 423 E |
| 13.1 | Allgemeines | 423 E |
| 13.2 | Mittelwerte, Verteilungen | 424 E |
| 13.3 | Korrelationsfunktionen | 427 E |
| 13.4 | Leistungsspektren | 430 E |
| 13.5 | Übertragen stochastischer Größen durch lineare Systeme | 434 E |
| 13.6 | Auslegen von Regelkreisen für stochastische Größen . | 437 E |
| 14 | Ereignisdiskrete Systeme | 441 E |

| | |
|---|------------|
| 14.1 Einführende Übersicht | 441 E |
| 14.2 Ausgewählte Modellformen ereignisdiskreter Systeme . | 443 E |
| 14.2.1 Autonomer Automat | 443 E |
| 14.2.2 Standardautomat | 445 E |
| 14.2.3 E/A-Automat | 446 E |
| 14.2.4 Petri-Netze | 448 E |
| 14.3 Nebenläufige Prozesse | 451 E |
| 14.4 Analyse mittels Graphentheorie | 453 E |
| 14.5 Analyse mittels linearer Algebra | 456 E |
| 14.6 Synthese von Petri-Netzen | 459 E |
| 15 Bezeichnungen | 467 |
| Literaturverzeichnis | 473 |
| Index | 475 |

1 Einführung

1.1 Messen, Steuern, Regeln

Ziel einer Regelung ist i. Allg., bestimmte Größen, meist Ausgangsgrößen technischer Prozesse, an vorgegebene Führungsgrößen anzugleichen. Die zu regelnden Größen sollen sowohl Änderungen der Führungsgrößen möglichst gut folgen als auch von Störungen, die auf den Prozess einwirken, möglichst wenig beeinflusst werden. Die genannten Ziele werden dadurch angestrebt, dass die Regelgrößen gemessen und die Messergebnisse mit den Führungsgrößen verglichen werden. Aus den Differenzen von Führungs- und Regelgrößen werden Eingriffe in den Prozess abgeleitet, die geeignet sind, die Differenzen zu vermindern. Durch diese Rückführung von Ausgangsgrößen auf Eingangsgrößen entstehen geschlossene Wirkungsabläufe, die als Regelkreise bezeichnet werden. Genaue Definitionen von Begriffen und Bezeichnungen in der Regelungs- und Steuerungstechnik finden sich u.a. in der DIN 19226.

Zur Einführung in regelungstechnische Fragestellungen sollen zwei Beispiele betrachtet werden.

Im ersten Beispiel (Bild 1-1) besteht die Aufgabe darin, die Temperatur X eines Wohnraumes auf einem konstanten, vorgegebenen Wert W zu halten. Störungen, wie Änderung der Außentemperatur Z_1 , Öffnen und Schließen von Fenstern und Türen Z_2 , sollen die Temperatur nicht oder nicht wesentlich beeinflussen. Die regelungstechnische Lösung besteht darin, dass die Temperatur X gemessen und das Heizungsventil entsprechend dem Unterschied von gemessenem und vorgegebenem Wert um den Betrag Y verstellt wird. Dies kann von Hand oder automatisch durch den Regler R geschehen.

Bild 1-2 zeigt, wie der durch Bild 1-1 gegebene Sachverhalt in übersichtlicherer und einfacherer Weise dargestellt werden kann.

Dies ist möglich, weil hier nur die wirkungsmäßigen Zusammenhänge interessieren, nicht hingegen die physikalische Realisierung. Aus dieser schematischen Darstellung ist u.a. zu erkennen, dass die Temperatur X über Regler und Heizungsventil sich selbst beeinflusst. Dieser in sich geschlossene Wirkungsablauf ist ein wichtiges Merkmal jeder Regelung.

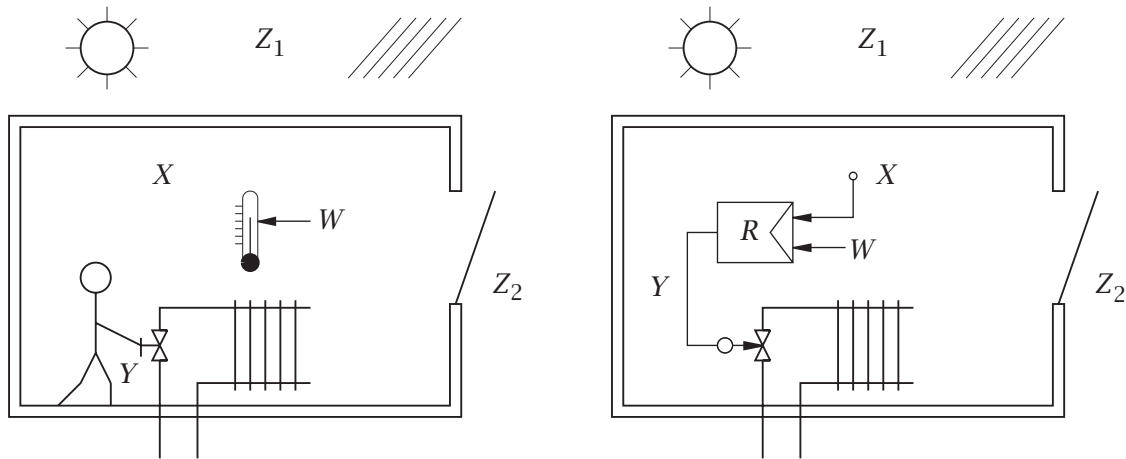


Bild 1-1: Raumtemperaturregelung von Hand und automatisch

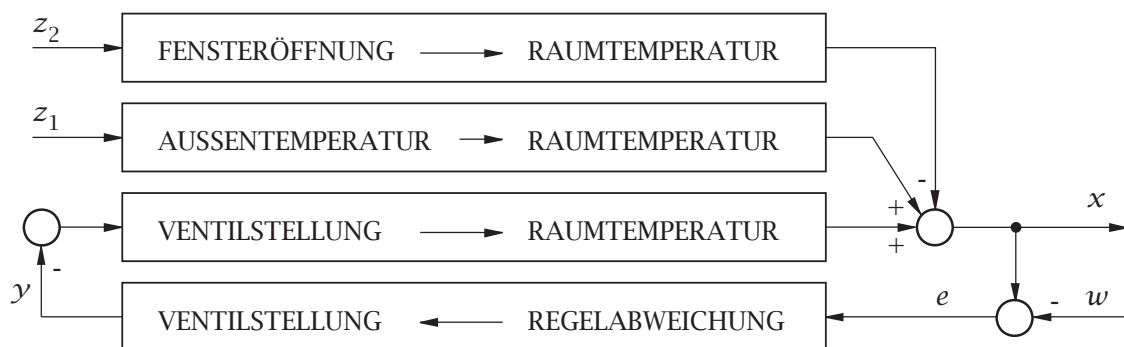


Bild 1-2: Schematische Darstellung der Raumtemperaturregelung

Neben der Regelung der Raumtemperatur entsprechend den Bildern 1-1 und 1-2 ist auch eine Steuerung der Raumtemperatur weit verbreitet (Bilder 1-3, 1-4). Dabei wird z. B. die Außentemperatur Z_1 gemessen und das Heizungsventil durch ein Steuergerät S dieser Temperatur entsprechend eingestellt. Wie die schematische Darstellung in Bild 1-4 zeigt, liegt hier kein in sich geschlossener Wirkungsablauf vor. Außerdem können größere Abweichungen der Temperatur X vom gewünschten Wert auftreten, wenn die nicht erfasste Störgröße Z_2 (hier Öffnen von Fenstern usw.) entsprechende Werte annimmt oder wenn der im Steuergerät S enthaltene funktionale Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Ventilstellung den Eigenschaften von Heizung und Gebäude nicht genau entspricht.

Im zweiten Beispiel (Bild 1-5) besteht die Aufgabe darin, die Dreh-

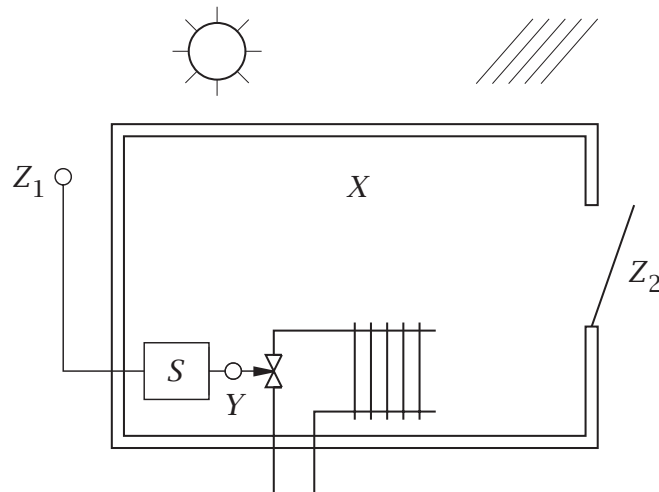


Bild 1-3: Raumtemperatursteuerung

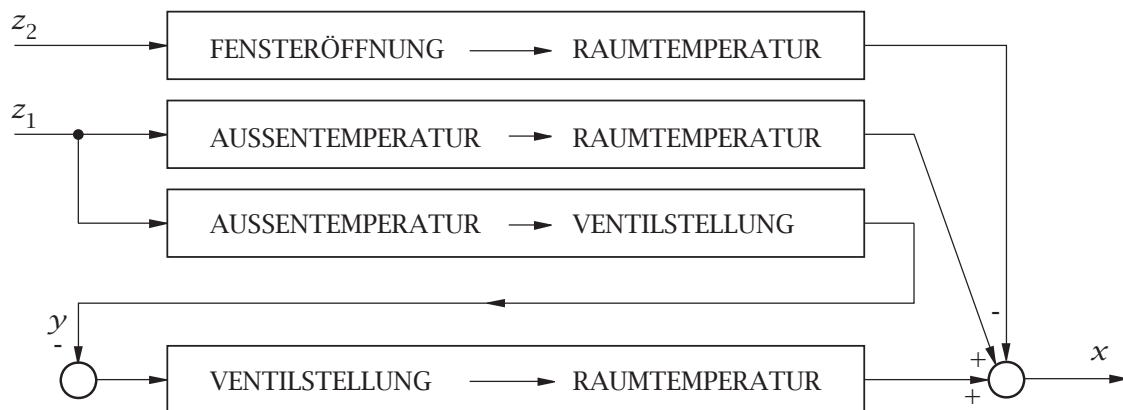


Bild 1-4: Schematische Darstellung der Raumtemperatursteuerung

zahl X einer Dampfturbine auf einem konstanten, vorgegebenen Wert W zu halten, obgleich sie durch Änderungen, etwa des Frischdampfdruckes Z_1 oder des Lastmomentes Z_2 , beeinflusst wird. Die Drehzahl wird durch eine automatische Einrichtung fortlaufend gemessen und mit dem vorgegebenen Wert verglichen. Aus der Abweichung von Führungs- und Regelgröße wird eine zweckentsprechende Verstellung Y des Dampfventils abgeleitet. Dadurch werden alle die Drehzahl beeinflussenden Störungen kompensiert. Bild 1-6 zeigt eine schematische Darstellung der Drehzahlregelung, die der Darstellung der Raumtemperaturregelung in Bild 1-2 weitgehend gleicht.

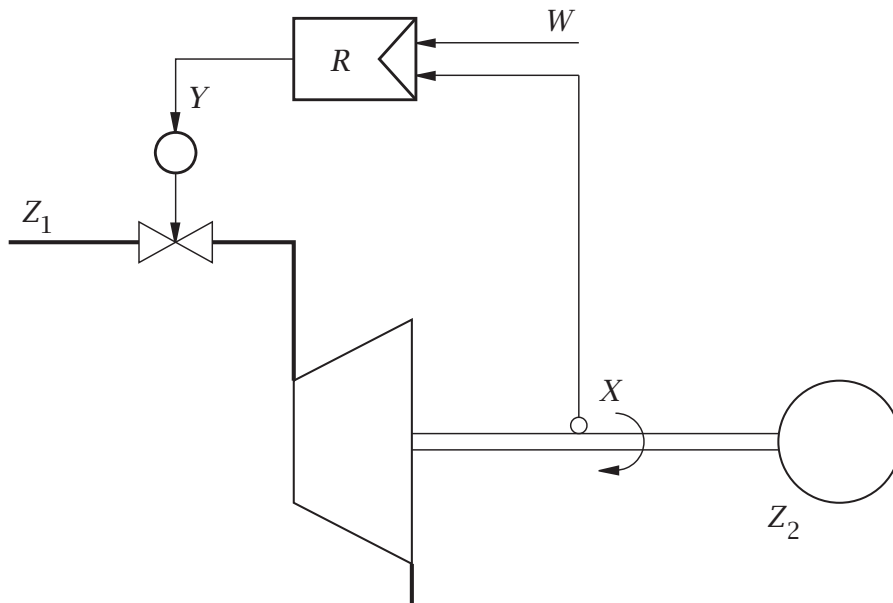


Bild 1-5: Drehzahlregelung

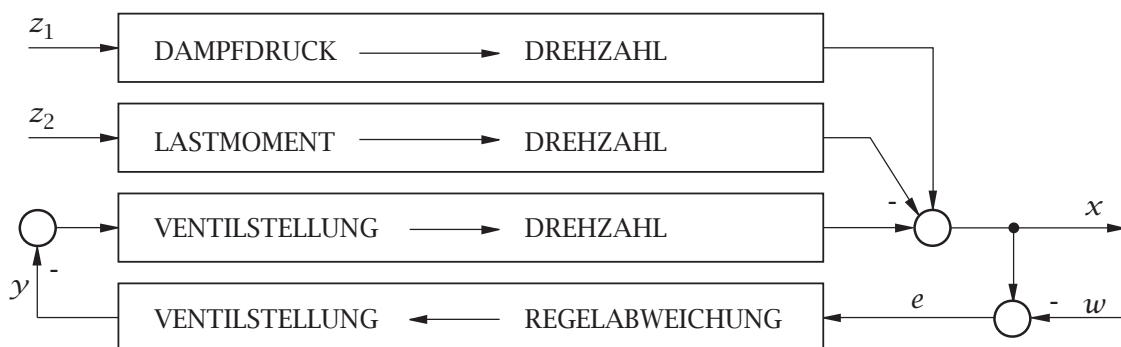


Bild 1-6: Schematische Darstellung der Drehzahlregelung

Weitere technisch wichtige Regelungen sind

- Kursregelungen bei Luft- und Wasserfahrzeugen,
- Lageregelungen bei Luftfahrzeugen,
- Druck-, Temperatur-, Durchfluss-, Konzentrationsregelungen in der Verfahrenstechnik,
- Positionsregelungen bei Werkzeugmaschinen.

Trotz der sehr unterschiedlichen Aufgaben haben alle Regelungen ei-

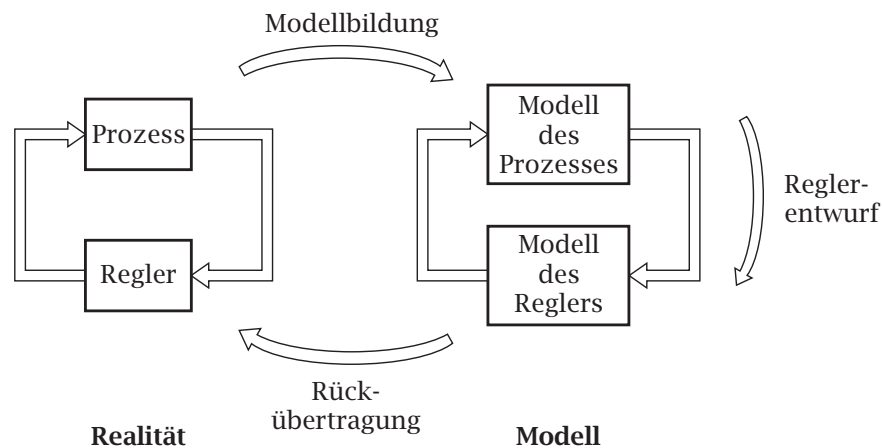


Bild 1-7: Lösung technischer Probleme mit Modellen

ne ähnliche Struktur. Diese Struktur wird erkennbar, wenn man eine geeignete abstrahierende Darstellung wählt, z. B. den in der Regelungstechnik häufig benutzten Wirkungsplan.

Aus dem in sich geschlossenen Wirkungsablauf von Regelungen entsteht eine Reihe von Problemen, die allen Anwendungsfällen gemeinsam sind. Daher hat sich eine einheitliche Theorie der Regelung als zweckmäßiges Werkzeug erwiesen. Um diese Theorie benutzen zu können, muss das technische Problem in einer ihr gemäßen Weise beschrieben werden. Solche Beschreibungen werden Modelle genannt, weil sie nur einen Teil der Eigenschaften des Originals wiedergeben. Ein richtig gewähltes Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es alle jeweils wichtigen Eigenschaften des Originals widerspiegelt. Modelle können die Form von Gleichungssystemen (mathematische Modelle), von physikalischen Ersatzsystemen (elektrische, hydraulische Modelle), von verbalen Beschreibungen usw. haben. Bild 1-7 zeigt schematisch, wie technische Probleme mit Hilfe von Modellen zu lösen sind.

1.2 Grundstruktur des Regelkreises

In Abschnitt 1.1 wurde bereits angesprochen, dass es Merkmale gibt, die alle Regelungen kennzeichnen, beispielsweise der geschlossene Wirkungsablauf. Bild 1-8 zeigt anhand eines Wirkungsplans (vgl. Abschnitt 1.3) die allgemeine Grundstruktur des Regelkreises und führt wichtige Begriffe und Bezeichnungen im Zusammenhang mit Regelungen ein,

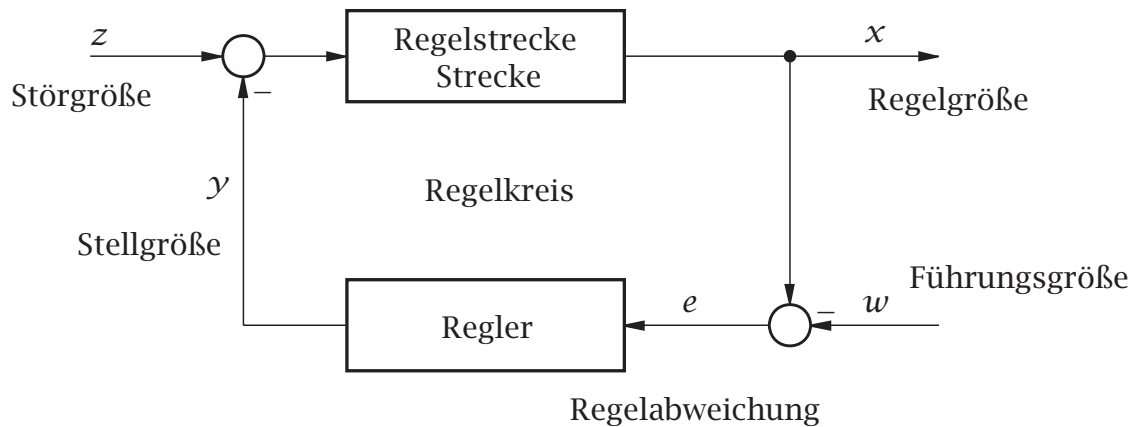


Bild 1-8: Grundstruktur des Regelkreises

wie sie in DIN 19226 „Leittechnik, Regelungstechnik und Steuerungstechnik“ genormt sind.

Die *Regelgröße* ist die Größe, die auf einem vorgegebenen konstanten oder veränderlichen Wert gehalten werden soll, die Ausgangsgröße der Regelstrecke.

Die *Führungsgröße* ist eine der Regelung von außen zugeführte Größe, der die Regelgröße folgen soll.

Störgröße ist jede Größe, die auf die Regelgröße wirkt, mit Ausnahme der Stellgröße.

Die *Stellgröße* ist die Ausgangsgröße des Reglers und die Größe, durch deren Änderung die Regelgröße über die Regelstrecke beeinflusst werden kann, z. B. um sie der Führungsgröße anzugleichen.

Als *Regelstrecke* wird ein Gerät, eine Anlage usw. bezeichnet, dessen Ausgangsgröße geregelt wird, indem eine oder mehrere Eingangsgrößen verändert werden.

Der *Regler* ist ein Gerät, das Regelgröße und Führungsgröße bzw. Sollwert miteinander vergleicht und aus der Differenz die Stellgröße bildet.

1.3 Wirkungsplan

Der Wirkungsplan ist eine schematische Darstellung der Wirkungszusammenhänge, ähnlich den Bildern 1-2, 1-4 und 1-6, jedoch mit klaren Definitionen und festen Regeln und Bezeichnungen, die in der DIN

19226 festgelegt sind. Er unterscheidet sich von einer Gerätedarstellung u. a. dadurch, dass er nicht Geräte, Anlagenteile o. Ä., sondern wirkungsmäßige Zusammenhänge zwischen Größen beschreibt.

Die Werte der jeweils interessierenden physikalischen Größen werden häufig auch als Signale bezeichnet. Der Wirkungsplan beschreibt daher die in den zugehörigen Geräten, Anlagen usw. ablaufende Signalverarbeitung. Durch diese Beschränkung auf Fragen der Signalverarbeitung ist die Regelungstechnik unabhängig von speziellen Eigenschaften des jeweiligen technischen Problems.

Die Elemente des Wirkungsplans stellen gerichtete Operationen zur Veränderung und Verknüpfung von Signalen dar. Diese Operationen und damit auch die Elemente, die sie veranschaulichen, werden als rückwirkungsfrei angesehen. Rückwirkungsfreiheit bedeutet hier, dass Änderungen der Ausgangsgröße eines Elementes keinen Einfluss auf die zugehörige Eingangsgröße haben.

Im Wirkungsplan wird die Übertragung von Signalen durch einfache Linien mit Angaben der Wirkungsrichtung, die Verzweigung von Signalen mit der Verzweigungsstelle, auch Verzweigungspunkt genannt, und die Addition von Signalen unter Beachtung von Vorzeichen durch die Additionsstelle, auch Summenpunkt genannt, dargestellt. Die Umwandlung und Verknüpfung von Signalen wird durch Rechtecke, Blöcke genannt, wiedergegeben. Durch zusätzliche Angaben in oder an den Blöcken kann die Umwandlung oder Verknüpfung näher bezeichnet werden. Eine Zusammenstellung der Elemente des Wirkungsplans gibt Tabelle 1-1.

Das positive Vorzeichen an Summenpunkten darf i. Allg. fortgelassen werden. In Blöcke wird häufig eine Zeichnung mit der qualitativen Darstellung des Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße eingetragen. Dies kann eine Kennlinie sein (z. B. $y = K \cdot u^2$ in Tabelle 1-1) oder der zeitliche Verlauf der Ausgangsgröße nach einem Sprung der Eingangsgröße (z. B. für $y = K \cdot u$ und $T \cdot \dot{y} + y = K \cdot u$ in Tabelle 1-1).

Als Beispiel soll der Wirkungsplan für die Kurssteuerung eines Schiffes aufgestellt werden (Bild 1-9). Bei ungestörter Fahrt erfährt das Schiff beim Auslenken des Ruders um den Winkel β eine Seitenkraft, die ein linksdrehendes Moment m erzeugt. Dieses Moment ist eine Funktion

des Ruderwinkels; wenn man annehmen darf, dass das Moment Änderungen des Ruderwinkels unverzüglich folgt und diesem näherungsweise proportional ist, kann man den Zusammenhang beider Größen wie in Bild 1-9 durch einen Block darstellen. Das Moment erteilt dem Schiff eine Drehgeschwindigkeit $\dot{\alpha}$. Wegen des Trägheitsmomentes des Schiffes ändert sich diese Drehgeschwindigkeit auch bei sprungförmiger Änderung des Momentes nicht sprungförmig, sondern etwa so wie im mittleren Block im Bild 1-9 wiedergegeben. Eine sprungförmige Änderung der Drehgeschwindigkeit z. B. von null auf einen konstanten Wert hat einen Drehwinkel α zur Folge, der proportional der Zeit beliebig große Werte annehmen kann, wie im letzten Block im Bild 1-9 angedeutet wird.

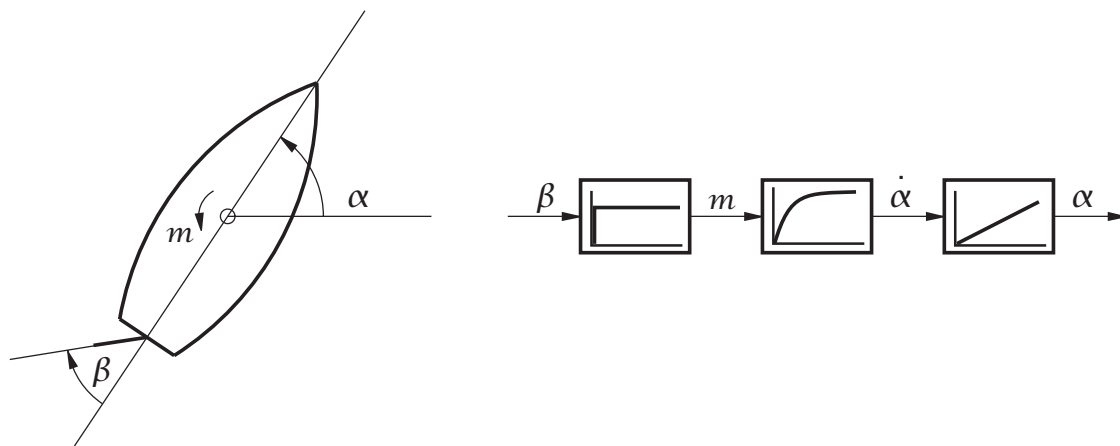


Bild 1-9: Wirkungsplan einer Kurssteuerung

Der Wirkungsplan ist eine der wichtigsten Darstellungsformen regelungstechnischer Aufgaben und Lösungen. Nur korrekte und zuverlässige Wirkungspläne führen zu technisch brauchbaren Lösungen. Beim Aufstellen komplizierterer Wirkungspläne ist dringend zu empfehlen, im Gegensatz zur Verfahrensweise im Beispiel, entgegen der Wirkungsrichtung der Größen vorzugehen, d. h. ausgehend von einer Größe nach deren Ursachen zu fragen und diese Antworten festzuhalten. Dadurch kann man leichter sicherstellen, dass alle auf eine Größe wirkenden Einflüsse erfasst werden.

Die Darstellungsform Wirkungsplan verkörpert die grundsätzliche Betrachtungsweise und auch das wesentliche Ziel des Faches Regelungs-


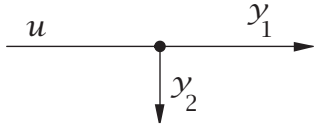
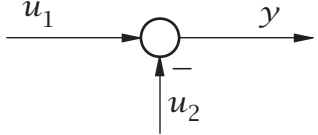


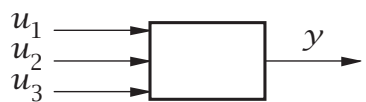
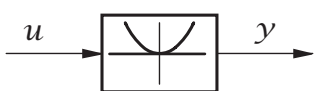
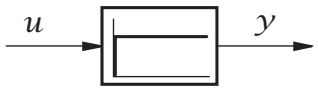

| Bezeichnung | Symbol | Funktion |
|---|--|-----------------------------------|
| Wirkungslinie Signalübertragung |  | $y = u$ |
| Verzweigungsstelle Verzweigungspunkt |  | $y_1 = u$ $y_2 = u$ |
| Additionsstelle Summenpunkt |  | $y = u_1 - u_2$ |
| Umkehrpunkt |  | $y = -u$ |
| Übertragungsblock |  | $y = f(u)$ |
| |  | $y = f(u_1, u_2, u_3)$ |
| |  | $y = K \cdot u^2$ |
| |  | $y = K \cdot u$ |
| |  | $T \cdot \dot{y} + y = K \cdot u$ |

Tabelle 1-1: Elemente des Wirkungsplans

technik, nämlich Hilfsmittel bereitzustellen, um dynamische technische Systeme mit komplexer Struktur analysieren, zielgerichtet beeinflussen und auch an deren Gestaltung mitzuwirken zu können. Solche komplexen Strukturen entstehen z. B. in Systemen mit mehreren, auf einander einwirkenden Einflussgrößen oder auch durch interne Rückwirkungen, die oft – aber nicht ausschließlich – auf Regelkreise zurückgehen. Zu Gunsten einer allgemein, d. h. in allen Fachdisziplinen anwendbaren Methodik setzen die entsprechenden Analyse- und Entwurfsverfahren der Regelungstechnik auf einer mathematischen Beschreibung der betrachteten realen Prozesse auf, die von deren spezieller technischer Ausprägung abstrahiert und eine (theoretische und/oder experimentelle) Modellbildung voraussetzt.

Die Modellbildung realer Prozesse verfolgt eigentlich zwei unterscheidbare Ziele: Zum einen das Schaffen einer für die Analyse- und Entwurfsverfahren handhabbaren mathematischen Beschreibung, dabei aber auch das Herausarbeiten der für den hier verfolgten Zweck relevanten Eigenschaften der Prozesse (speziell des Ein-/Ausgangsverhaltens). Oft können bei dieser Abstraktion gegenüber den in den jeweiligen Fachdisziplinen gebräuchlichen Prozessbeschreibungen zulässige Vereinfachungen (u.a. Betrachtung in der Nähe eines Arbeitspunktes, ggf. mit Linearisierungen) vorgenommen werden, wobei jedoch den dynamischen Eigenschaften in der Regel eine größere Bedeutung zukommt. Dieses zeigt die Notwendigkeit auf, dass für das Erlernen und auch für die Anwendung der Regelungstechnik neben dem dazu erforderlichen mathematischen Rüstzeug auch ein Grundwissen in den klassischen Ingenieurdisziplinen Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Elektrotechnik eingebracht werden muss.

Der Wirkungsplan unterstützt die Modellbildung komplexer Systeme, indem eine Zerlegung in Teilsysteme vorgenommen und das daraus resultierende Wirkungsgefüge transparent gemacht wird. Zum Aufstellen von Wirkungsplänen, und zwar im Sinne einer damit empfohlenen top-down-Vorgehensweise, kann der folgende Leitfaden aufgestellt werden:

1. Klärung der Eingangs- und Ausgangsgrößen

Dieses ergibt sich aus der Aufgabenstellung des zu modellierenden technischen Systems, wie einige nachfolgende Beispiele zeigen sollen. Bereits die ersten Vorüberlegungen in Kap. 1.1 zeigten

auf, dass z. B. eine (ungeregelte) Regelstrecke als Eingangsgrößen die Stell- und Störgröße und als Ausgangsgröße die Regelgröße besitzt. Ein als Wirkungsplan abzubildender Regler wird als Eingangsgrößen die Regel- und Führungsgröße und als Ausgangsgröße die Stellgröße aufweisen. Schließlich kennt ein geregeltes System (der geschlossene Regelkreis) als Eingangsgrößen die Stör- und Führungsgröße und als Ausgangsgröße die Regelgröße (vgl. auch Bild 1-8).

2. Zerlegung in Teilsysteme

Bei der Zerlegung eines Gesamtsystems in Teilsysteme wird nach unmittelbaren Ursache-/Wirkungszusammenhängen gesucht, wobei die zuvor empfohlene Methode Anwendung findet, ausgehend von der Ausgangsgröße des Gesamtsystems (und damit der des Wirkungsplans) sukzessive rückwärts vorzugehen, bis schließlich nur noch die in Schritt 1 festgelegten Eingangsgrößen als solche auftreten. Das Ziel besteht darin, ein erstes Wirkungsgefüge von Teilsystemen aufzustellen, aus denen ein Überblick über Struktur, Dynamik und Vorzeichen der Wirkzusammenhänge hervorgeht. Dabei sei angemerkt, dass die im Wirkungsplan vorzusehenden Vorzeichen zur Vermeidung von Doppeldeutigkeiten stets am Summenpunkt, und zwar in Pfeilrichtung rechts vom Pfeil anzutragen sind (nach DIN 19226).

3. Übertragungsverhalten der Teilsysteme

Für viele der in Schritt 2 definierten Teilsysteme wird das im Wirkungsplan abzubildende dynamische Übertragungsverhalten unmittelbar aus der technischen Ausführung des zu modellierenden technischen Systems zu entnehmen sein. Bei den übrigen, weniger trivialen Teilsystemen hilft die Aufstellung der das Übertragungsverhalten beschreibenden Differentialgleichungen weiter, die aus den formalen Beschreibungen der betreffenden Fachdisziplinen hervorgehen (z. B. Energieerhaltungssätze, Gleichgewichtsbeziehungen von Kräften und Drehmomenten, Bewegungsgleichungen, Wärmeübergang und -speicherung, elektrische Netzwerke, Strömungsvorgänge, chemische Reaktionen, etc.).

Der zuvor, speziell in Schritt 3 genannte Zusammenhang von Differentialgleichung und Wirkungsplan soll an Hand eines einfachen mecha-

nischen Beispiels näher betrachtet werden. Dies ist auch als kleiner Vorausblick auf damit zwangsläufig zusammenhängende Inhalte der Kapitel 3 und 4 gedacht und soll daher an dieser Stelle nicht erschöpfend behandelt werden. Als Beispiel diene der in Bild 1-10 skizzierte Einmassenschwinger mit Feder-/Dämpferauflage, dessen Auslenkung y um seine Ruhelage (= Ausgangsgröße) in Folge einer einwirkenden Kraft f (= Eingangsgröße) interessiert.

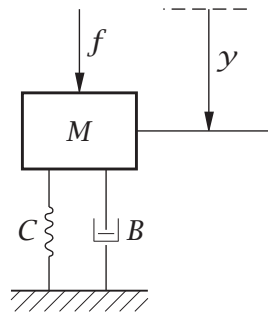


Bild 1-10: Einmassenschwinger

Die Newtonsche Bewegungsgleichung liefert die Differentialgleichung

$$M\ddot{y} + B\dot{y} + Cy = f \quad , \quad (1.1)$$

die nach der Auflösung nach \ddot{y} , der höchsten Ableitung der Ausgangsgröße

$$\ddot{y} = \frac{1}{M} (-B\dot{y} - Cy + f) \quad , \quad (1.2)$$

sofort in den Wirkungsplan in Bild 1-11 übertragen werden kann. Die niedrigeren Ableitungen bis hin zur Ausgangsgröße selbst werden durch Integration gewonnen und stehen somit zum Abgriff und zur Rückführung in die Summenpunkte zur Verfügung.

Wenn die internen Größen des Wirkungsplans, hier die zeitlichen Ableitungen \dot{y} und \ddot{y} , nicht benötigt werden, um z. B. weitere Ausgangsgrößen zu bestimmen, kann auch die in Bild 1-12 gezeigte zusammenfassende Darstellung verwendet werden, die aus der normierten Form einer solchen Differentialgleichung 2. Ordnung nach Gl.(1.3) abgeleitet werden kann. Sie enthält den statischen Übertragungsbeiwert K , den

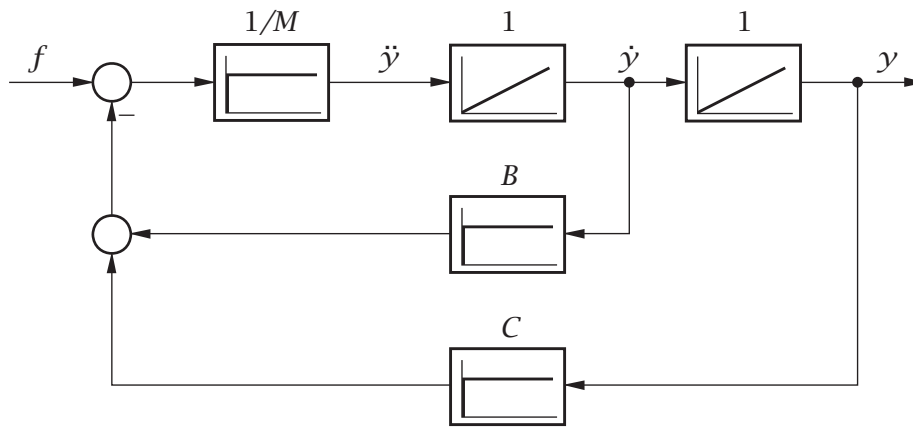


Bild 1-11: Wirkungsplan zur Differentialgleichung (1.1)/(1.2)

Dämpfungsgrad D und die Kennkreisfrequenz ω_0 , die aus dem Koeffizientenvergleich mit Gl.(1.1) hervorgehen.

$$\ddot{y} + 2D\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = K\omega_0^2 f \quad (1.3)$$

Die graphische Darstellung des Wirkungsplans wird dabei auf einen einzigen Übertragungsblock reduziert und die Information über das dynamische Übertragungsverhalten in die damit symbolisierte Differentialgleichung höherer Ordnung sowie in die zugehörigen Koeffizienten K , D und ω_0 verlagert.

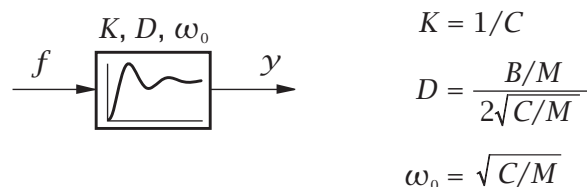


Bild 1-12: Wirkungsplan zur Differentialgleichung (1.3)

Bezüglich des damit dargestellten Übertragungsverhaltens von der Kraft f auf die Auslenkung y sind die beiden Wirkungspläne der Bilder 1-11 und 1-12 als äquivalent anzusehen – schließlich beschreiben sie die äquivalenten Differentialgleichungen (1.1) und (1.3). Ein Unterschied, auch im Nutzen für die Anwendung, ist jedoch darin zu sehen, dass ein ausführlicher Wirkungsplan wie in Bild 1-11 auch den Abgriff interner Größen ermöglicht, die ein zusammengefasster Wirkungsplan wie in Bild 1-12 im Gegensatz dazu nicht bereitstellt.

Im Folgenden werden mit Ausnahme des Kapitels 12 fast ausschließlich lineare Zusammenhänge durch Wirkungspläne dargestellt werden. Daher wird in Tabelle 1-1 als einziges nichtlineares Element das mit einer nichtlinearen Kennlinie aufgeführt. Nichtlineare Zusammenhänge werden meist durch Linearisierung nach Abschnitt 2.2 in lineare, für kleine Abweichungen von einem Arbeitspunkt geltende Zusammenhänge umgewandelt werden.