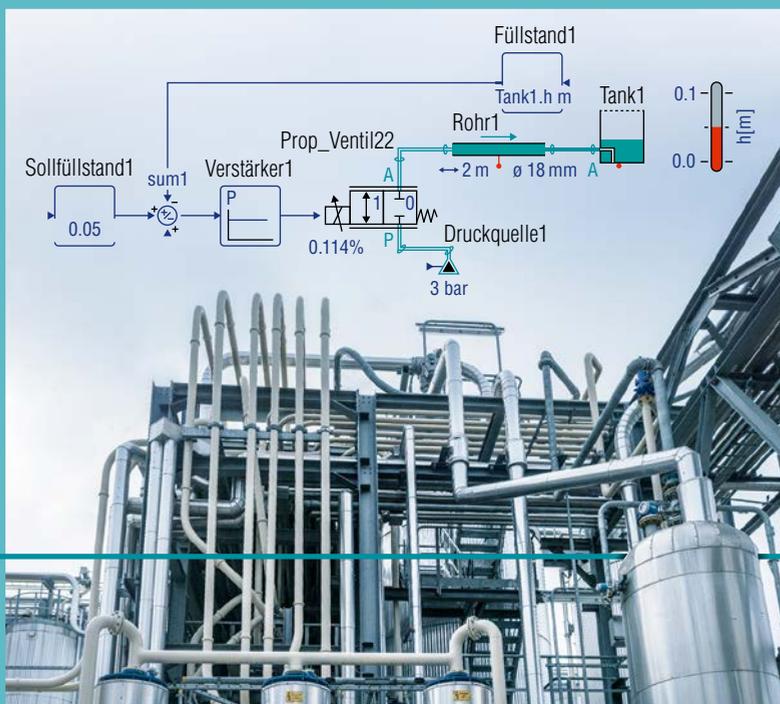


Denis Fritzsche



# Regelungstechnik mit SimulationX

Ein multimedialer Einstieg mit 40 Videotutorials



HANSER

### **Disclaimer zur Barrierefreiheit**

Der Carl Hanser Verlag unternimmt große Anstrengungen, um seine Produkte barrierefrei zu machen. Dazu gehört auch, dass Bilder oder Tabellen für blinde und sehbehinderte Menschen zugänglich gemacht werden. Dies geschieht durch zusätzliche beschreibende Texte (Alternativtexte), die in den Daten integriert sind. Die Alternativtexte können von assistiven Technologien (z. B. Screenreadern) vorgelesen werden. Bei der Erstellung dieser Texte kommt eine KI zum Einsatz. Die inhaltliche Verantwortung liegt weiterhin bei den Lektor:innen und Autor:innen.

Fritzsche  
**Regelungstechnik mit SimulationX**



**Ihr Plus - digitale Zusatzinhalte!**

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial.

Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-y475t-a297c

*plus.hanser-fachbuch.de*



**Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

*www.hanser-fachbuch.de/newsletter*



Denis Fritzsche

# **Regelungstechnik mit SimulationX**

Ein multimedialer Einstieg mit 40 Videotutorials

HANSER

Über den Autor:

*Dipl.-Ing. Dipl.-Päd. Denis Fritzsche*, Richard-Hartmann-Schule, Chemnitz



Print-ISBN: 978-3-446-48325-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-48363-7

Die allgemein verwendeten Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benützt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor.

© 2025 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München  
Kolbergerstraße 22 | 81679 München | [info@hanser.de](mailto:info@hanser.de)  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: © [gettyimages.de](http://gettyimages.de)/Monty Rakusen

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Grundbegriffe .....	1
1.2 Wirkungsplan .....	2
1.3 Steuern vs. Regeln .....	4
1.3.1 Steuerungsschema .....	4
1.3.2 Regelungsschema .....	7
1.3.3 Allgemeiner Charakter der Regelung .....	11
<b>2 Mathematische Grundlagen der Regelungstechnik</b> .....	<b>13</b>
2.1 Arbeiten mit Wirkungsplänen .....	13
2.2 Anwendung der Vereinfachungsregeln auf den Regelkreis .....	20
2.2.1 Beseitigung der Messeinrichtung .....	20
2.2.2 Führungsgrößenregelung .....	22
2.2.3 Versorgungsstörgrößenregelung .....	23
2.2.4 Laststörgrößenregelung .....	25
2.2.5 Regelung mit mehreren Eingängen .....	26
2.2.6 Wirkungspläne von zeitabhängigen Systemen .....	27
2.3 Übertragungsfunktion .....	33
2.3.1 Aufstellen der Übertragungsfunktion mithilfe komplexer Widerstände .....	33
2.3.2 Aufstellen der Übertragungsfunktion über die Differentialgleichung .....	36

2.3.3	Allgemeine Übertragungsfunktion .....	43
2.3.4	Reglernormalform .....	44
2.4	Testfunktionen .....	49
2.5	Standardelemente .....	53
2.5.1	Lineare Standardelemente .....	54
2.5.2	Sonderfall: $PT_2$ -Glied .....	56
2.6	Bestimmung der Zeitverläufe mithilfe der Laplace-Transformation .....	62
2.6.1	Reaktion eines rückgekoppelten Tiefpasses auf eine Rampe .....	66
2.6.2	Weg-Reaktion eines Feder-Masse-Dämpfungssystems auf einen Kraftimpuls .....	67
2.6.3	Spannungsverlauf der Kondensatorspannung eines RSK bei einem Eingangsspannungssprung .....	70
2.7	Totzeitelement .....	73
<b>3</b>	<b>Grafische Darstellung von Übertragungsfunktionen .....</b>	<b>75</b>
3.1	Vorbetrachtung zu den grafischen Darstellungen .....	75
3.2	Nyquist-Ortskurven .....	79
3.3	Bode-Diagramme .....	83
3.3.1	Bode-Diagramm des $PT_1$ -Gliedes .....	83
3.3.2	Bode-Diagramm des PD-Gliedes .....	88
3.3.3	Bode-Diagramm des I-Gliedes .....	89
3.3.4	Bode-Diagramm des D-Gliedes .....	90
3.3.5	Zeichnen des Bode-Diagramms von komplexen Systemen .....	91
3.3.6	Bode-Diagramm von schwingenden $PT_2$ -Strecken .....	92
3.3.7	Bode-Diagramm des $T_{tot}$ -Gliedes .....	96
3.3.7.1	Erstellen des Bode-Diagramms von totzeitbehafteten Systemen mit SimulationX .....	97
3.3.7.2	Padé-Approximation .....	98
<b>4</b>	<b>Streckenidentifikation .....</b>	<b>101</b>
4.1	Vorbetrachtung zur Streckenidentifikation .....	101
4.2	Streckenidentifikation von Systemen mit Ausgleich .....	102
4.3	Streckenidentifikation von Systemen ohne Ausgleich .....	108

<b>5</b>	<b>Statikbetrachtung von Regelkreisen</b> .....	<b>113</b>
5.1	Vorbetrachtung .....	113
5.2	Berechnung der bleibenden Regelabweichung .....	115
5.2.1	Berechnung der bleibenden Regelabweichung bei einer Führungsgrößenregelung .....	116
5.2.2	Berechnung der bleibenden Regelabweichung bei einer Störgrößenregelung .....	117
5.2.3	Berechnung der Regelabweichung bei Regelkreisen mit integralem Anteil .....	119
<b>6</b>	<b>Regler</b> .....	<b>127</b>
6.1	P-Regler .....	127
6.2	PD-Regler .....	128
6.3	I-Regler .....	130
6.4	PI-Regler .....	131
6.4.1	Klassischer PI-Regler .....	131
6.4.2	PI-Regler ohne Integration .....	134
6.5	PID-Regler .....	135
6.5.1	PID-Regler in additiver Form .....	135
6.5.2	PID-Regler in multiplikativer Form .....	137
6.5.3	Umrechnung der Parameter eines PID-Reglers von der additiven in die multiplikative Form und umgekehrt .....	138
<b>7</b>	<b>Reglereinstellungen</b> .....	<b>141</b>
7.1	Online-Faustformelverfahren zur Reglereinstellung .....	142
7.1.1	Schwingungsverfahren nach Ziegler und Nichols .....	142
7.1.2	Einstellregeln von Åström und Hägglund nach der Relay-Feedback-Methode .....	144
7.1.3	Setpoint-Overshoot-Methode .....	146
7.2	Offline-Faustformelverfahren zur Reglereinstellung .....	149
7.2.1	Offline-Verfahren nach Ziegler und Nichols .....	149
7.2.2	Verfahren nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) .....	151
7.2.3	Verfahren nach Kuhn (T-Summen-Regel) .....	157
7.2.3.1	Streckennäherung .....	158
7.2.3.2	Reglerbemessung .....	159
7.2.3.3	Identifikation von $K_s$ und $T_\Sigma$ .....	162

7.3	Reglereinstellungsverfahren bei guter Streckenkenntnis .....	164
7.3.1	Reglereinstellung nach Reinisch (Betragsoptimum Typ 1) .....	164
7.3.2	Verfahren nach dem symmetrischen Optimum .....	172
<b>8</b>	<b>Stabilitätsbetrachtung von Regelkreisen .....</b>	<b>179</b>
8.1	Vorbetrachtung .....	179
8.2	Mathematische Stabilitätsdefinition .....	181
8.3	Pol-Nullstellen-Plan .....	183
8.4	Stabilitätsbestimmung des Regelkreises über den offenen Kreis .....	185
8.4.1	Grundlage des Bode- bzw. Nyquist-Stabilitätskriteriums .....	185
8.4.2	Stabilitätsbetrachtungen in Nyquist-Ortskurven .....	189
8.4.2.1	Einfaches Nyquist-Stabilitätskriterium .....	189
8.4.2.2	Erweiterte Dynamikbetrachtung mithilfe der Nyquist-Ortskurve .....	192
8.4.3	Stabilitätsbetrachtungen im Bode-Diagramm .....	194
8.4.3.1	Einfaches Bode-Stabilitätskriterium .....	194
8.4.3.2	Erweiterte Dynamikbetrachtung mithilfe des Bode-Diagramms .....	196
8.5	Nutzung des Bode-Stabilitätskriteriums zur P-Regler-Einstellung .....	198
8.6	Kompensationsverfahren .....	202
<b>9</b>	<b>Regelkreismodifikationen .....</b>	<b>209</b>
9.1	Sanftanlauf .....	209
9.2	PID-Regler in I-PD-Struktur .....	212
9.3	ReDuS-Regler .....	214
9.4	Aufschaltungen .....	218
9.4.1	Berechnung des stationären Regelfehlers .....	219
9.4.2	Führungsgrößenaufschaltung (Vorsteuerung) .....	223
9.4.3	Laststörgrößenaufschaltung .....	227
9.4.4	Versorgungsstörgrößenaufschaltung .....	228
9.5	Kaskadenregelung .....	231
9.5.1	Beispiel: Regelung einer nichtschwingenden $PT_2$ -Strecke .....	232
9.5.2	Beispiel: Drehzahlregelung .....	235

<b>10</b>	<b>Regelungen mit einem Zweipunktregler</b>	<b>245</b>
10.1	Statische Kennlinie	245
10.2	Schaltende Elemente als Zweipunktregler	246
10.3	Berechnung von Regelkreisen mit Zweipunktreglern	249
10.4	Zweipunktreglerparametrierung	252
10.4.1	Einstellung der Schalthysterese	252
10.4.2	Einstellung von Grund- und Hauptlast	252
10.4.3	Leistungsüberschuss	259
<b>11</b>	<b>Lösungen der Übungen</b>	<b>261</b>
11.1	Übung 1 (Abschnitt 1.3.1)	261
11.2	Übung 2 (Abschnitt 1.3.2)	262
11.3	Übung 3 (Abschnitt 2.1)	263
11.4	Übung 4 (Abschnitt 2.2.5)	264
11.5	Übung 5 (Abschnitt 2.2.6)	265
11.6	Übung 6 (Abschnitt 2.3.2)	268
11.7	Übung 7 (Abschnitt 2.3.4)	270
11.8	Übung 8 (Abschnitt 2.5.2)	273
11.9	Übung 9 (Abschnitt 2.6.3)	276
11.10	Übung 10 (Abschnitt 3.3.1)	279
11.11	Übung 11 (Abschnitt 3.3.6)	280
11.12	Übung 12 (Abschnitt 3.3.7.2)	281
11.13	Übung 13 (Abschnitt 4.3)	286
11.14	Übung 14 (Abschnitt 5.2.3)	294
11.15	Übung 15 (Abschnitt 6.4.1)	295
11.16	Übung 16 (Abschnitt 6.4.2)	297
11.17	Übung 17 (Abschnitt 6.5.3)	298
11.18	Übung 18 (Abschnitt 7.1.2)	300
11.19	Übung 19 (Abschnitt 7.1.3)	302
11.20	Übung 20 (Abschnitt 7.2.2)	310
11.21	Übung 21 (Abschnitt 7.2.3.3)	313
11.22	Übung 22 (Abschnitt 7.3.1)	315
11.23	Übung 23 (Abschnitt 7.3.2)	316
11.24	Übung 24 (Abschnitt 8.3)	318
11.25	Übung 25 (Abschnitt 8.4.2.1)	319

11.26 Übung 26 (Abschnitt 8.4.3.1) .....	321
11.27 Übung 27 (Abschnitt 8.4.3.2) .....	323
11.28 Übung 28 (Abschnitt 8.6) .....	324
11.29 Übung 29 (Abschnitt 9.3) .....	328
11.30 Übung 30 (Abschnitt 9.4.1) .....	331
11.31 Übung 31 (Abschnitt 9.5.2) .....	333
11.32 Übung 32 (Abschnitt 10.4.3) .....	336
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>339</b>
<b>Index .....</b>	<b>341</b>



# Vorwort

## **Zur Entstehungsgeschichte dieses Buches**

Der Vorläufer dieses Buches entstand in der Coronazeit. Bedingt durch die damit verbundenen Einschränkungen sah ich mich gezwungen, meine Unterrichtsgestaltung den damaligen Gegebenheiten anzupassen. Infolge dessen erstellte ich eine Vielzahl von Skripten, welche auf die Größe einer Unterrichtseinheit zugeschnitten waren. Sehr schnell wurde der begrenzte Lernerfolg der Schüler und Studierenden bei rein schriftlichen Vorlagen deutlich. Um die Skripte anschaulicher zu gestalten, entschied ich mich, die Grundlagen der Regelungstechnik auf Basis der Simulationssoftware SimulationX zu vermitteln und die schriftlichen Erläuterungen um Videos zu ergänzen, in denen der Einsatz von SimulationX demonstriert wird. Dieses Buch ist die Zusammenführung und Fortentwicklung der initialen Skripte.

## **Zielgruppe und Aufbau dieses Buches**

Das Buch versucht, unter Verwendung von SimulationX einen verständlichen Einstieg in die komplexe Materie der Regelungstechnik zu ermöglichen. Es wendet sich vornehmlich an Fachschüler und Bachelor-Studierende der Elektrotechnik, Automatisierungstechnik und Maschinentechnik, ist aufgrund seiner anwendungsbezogenen Ausrichtung aber auch für Techniker geeignet, die ihr Wissen auffrischen möchten. Jedes Kapitel besteht aus einem theoretischen Teil mit einführenden Erklärungen, aus einem Video mit Hinweisen zur Simulation und aus Übungsaufgaben. Die einzelnen Themengebiete bauen aufeinander auf. Bei thematischen Überschneidungen sind Verweise auf die entsprechenden Kapitel gesetzt. Nach dem Durcharbeiten des Stoffes sollten Sie zur Vertiefung die Übungsaufgaben lösen. Die Lösungen finden Sie in Kapitel 11.

## Kurze Vorstellung von SimulationX

Als Simulationssoftware ist SimulationX in der Lage, das Verhalten von Signalgliedern in Regelkreisen zu berechnen. Dies bedeutet, dass der Zeitverlauf und das Frequenzverhalten eines Signals angezeigt werden können. Das können auch andere Softwaresysteme. Interessant für den rechnergestützten Unterricht ist aber, dass zusätzlich auch konkrete mechatronische Systeme in den Regelkreis eingebunden werden können, was eine realitätsnahe Simulation verschiedenster technischer Aufgabenstellungen ermöglicht. So beinhaltet SimulationX Modellbibliotheken aus den Gebieten der

- Mechanik,
- Antriebstechnik,
- Elektrotechnik,
- Pneumatik/Hydraulik,
- Thermik, sowie
- vielen weiteren Gebieten.



Alle Bilder, die in der Bildunterschrift den Begriff „Screenshot“ enthalten, und alle Diagramme sind mit SimulationX erstellt.

In Anlehnung an SimulationX sind Dezimalzahlen im gesamten Buch nicht mit Komma, sondern mit Punkt dargestellt.



### Video 1: Vorstellung SimulationX

Am Beispiel eines Gleichstrommotors werden in diesem Einführungsvideo die nötigsten Grundfunktionen erklärt, um Simulationen mit SimulationX durchführen zu können.

## Technische Voraussetzungen und Zusatzmaterialien

Der pädagogische Grundgedanke dieses multimedialen Einstiegs liegt darin, sich die einzelnen Inhalte unter Verwendung des Buches, der Simulationssoftware und eines Media-Players zu erschließen. Es hat sich in jüngster Zeit immer mehr zum Standard entwickelt, Laptops oder Tablet-PCs in Vorlesungen, Seminare und Unterrichtseinheiten mitzubringen. Diesem Trend folgend ist das Buch alternativ auch als E-Book für eine rein digitale Nutzung erwerbbar. Für die Nutzung der Software SimulationX ist die kostenfreie Express-Edition ausreichend. Unter [plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de) stehen die Express-Edition, die SimulationX-Modelle der Übungen und die Videos bereit.

Nach diesen einleitenden Worten wünsche ich Ihnen nun viel Spaß beim Durcharbeiten des Buches!

Lichtenau, Februar 2025

Denis Fritzsche

# 1

## Einleitung

In diesem Kapitel wird mithilfe der regelungstechnischen Grundbegriffe und der Verwendung von Wirkungsplänen der grundlegende Aufbau von Regelkreisen vorgestellt.

### 1.1 Grundbegriffe

Als universelle Wissenschaft ist die Regelungstechnik bemüht, auch allgemeingültige und allgemeinverständliche Begriffe zu verwenden. Die wichtigsten Basisbegriffe werden nachfolgend betrachtet.

**Signal:** Ein Signal ist eine konkrete physikalische Größe  $x$  (z. B. Spannung, Druck, Geschwindigkeit), welche sich über die Zeit ändert. Das Signal  $x(t)$  ist der Träger einer Information.

**Störung:** Eine Störung tritt auf, wenn ein Signal durch äußere Einflüsse verändert wird. Dies heißt nicht, dass bei einer Störung etwas zerstört wurde. Eine Störung liegt beispielsweise dann vor, wenn sich eine Last ändert, die Umgebungstemperatur steigt oder die Versorgungsspannung schwankt.

**System:** Ein System ist eine abgegrenzte Menge von Anlagen, welche zueinander in Beziehung stehen.

Zur Klassifikation unterscheidet man folgende Systeme:

- energieumsetzende Systeme, z. B. Motoren, Generatoren, Heizungen, Mensch
- stoffumsetzende Systeme, z. B. verfahrenstechnische Anlagen, Umformer, Transportanlagen, Mensch
- informationsumsetzende Systeme, z. B. Messgeräte, Computer, Mensch

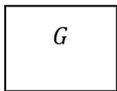
Jedes System grenzt sich durch Ein- und Ausgangssignale von der Umwelt ab.

**Stellglied:** Ein Stellglied ist ein System innerhalb einer Regelung, welches gezielt in den Stoff- und Energiestrom eingreift. Stellglieder sind beispielsweise Ventile, Stromrichter und Verstärker.

**Strecke:** Eine Strecke ist das System in einer Regelung, auf das bewusst über die Eingangsgröße eingewirkt wird, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Strecken sind beispielsweise Behälter, Räume und Antriebe.

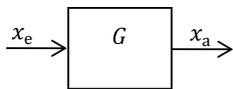
## 1.2 Wirkungsplan

In der Regelungstechnik erfolgt die Beschreibung der Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Systeme untereinander über Wirkungspläne bzw. Signalfusspläne. Jedes einzelne System innerhalb einer Regelung wird als Block dargestellt, und die inneren Zusammenhänge bzw. Eigenschaften werden in Form einer Übertragungsfunktion  $G$  mathematisch beschrieben (Bild 1.1).



**Bild 1.1**  
Übertragungsblock

Abgegrenzt ist das System durch die jeweiligen Ein- und Ausgangssignale, welche als Signallinien dargestellt werden (Bild 1.2).



**Bild 1.2**  
Übertragungsblock mit Signallinien

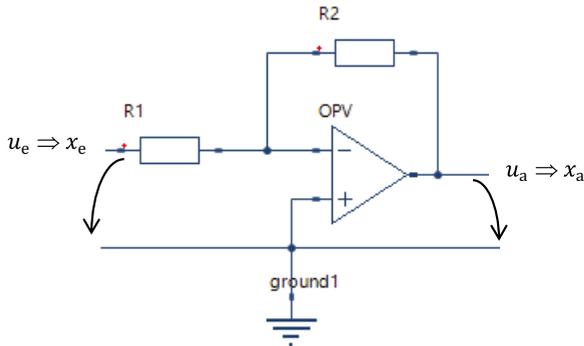
Dabei gilt:

$$x_a = G \cdot x_e \text{ bzw. } G = \frac{x_a}{x_e}$$

### Beispiel: Invertierender Verstärker

Es gilt:  $u_a = G \cdot u_e$  und  $G = -\frac{R_2}{R_1}$

Das Zusammenwirken mehrerer einzelner Systemkomponenten wird in Form eines Wirkungsplans dargestellt. Beispielhaft soll dazu der innere Zusammenhang eines invertierenden Verstärkers genutzt werden (Schaltung siehe Bild 1.3).



**Bild 1.3** Screenshot der OPV-Schaltung eines invertierenden Verstärkers

Natürlich gilt immer das ohmsche Gesetz. Mit unendlichem Eingangswiderstand und unendlicher Verstärkung des OPV gilt aber auch:

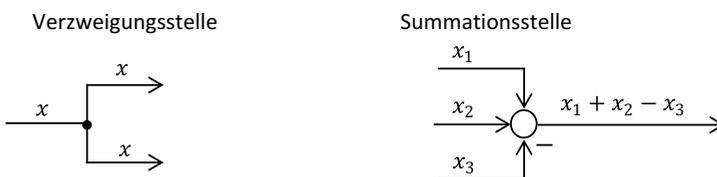
$$u_e = u_{R1}; u_a = u_{R2}; i_{R1} = -i_{R2}$$

Damit lässt sich der Wirkungsplan in Bild 1.4 erstellen.



**Bild 1.4** Wirkungsplan eines invertierenden Verstärkers

Des Weiteren gibt es Verzweigungs- und Summationsstellen (Bild 1.5). Damit lassen sich auch komplexere Zusammenhänge grafisch darstellen.



**Bild 1.5** Verknüpfungselemente



### Video 2: Wirkungspläne

Anhand mehrerer Beispiele wird in diesem Video die Allgemeingültigkeit der Beschreibung durch Wirkungspläne aufgezeigt.

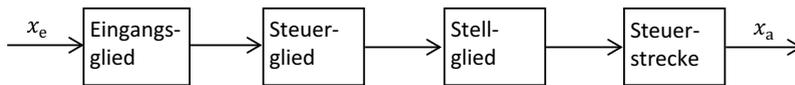
## 1.3 Steuern vs. Regeln

Zum Verständnis von regelungstechnischen Prozessen ist es hilfreich, sich zuerst die Funktionsweise von Steuerungen klarzumachen. Danach können, ausgehend von den Einschränkungen der Steuerungen, die Funktionsweise und die Vorzüge von Regelungen aufgezeigt werden.

### 1.3.1 Steuerungsschema

Steuerungen werden in Wirkungsplänen immer als sequenzielle Kette dargestellt. Ein oder mehrere Eingangssignale gehen auf die jeweiligen Eingangsglieder. Deren Ausgänge werden im Steuerglied verknüpft bzw. verarbeitet. Das Ausgangssignal des Steuergliedes geht auf das Stellglied, und die Ausgangsgröße des Stellgliedes ist wiederum das Eingangssignal der Steuerstrecke.

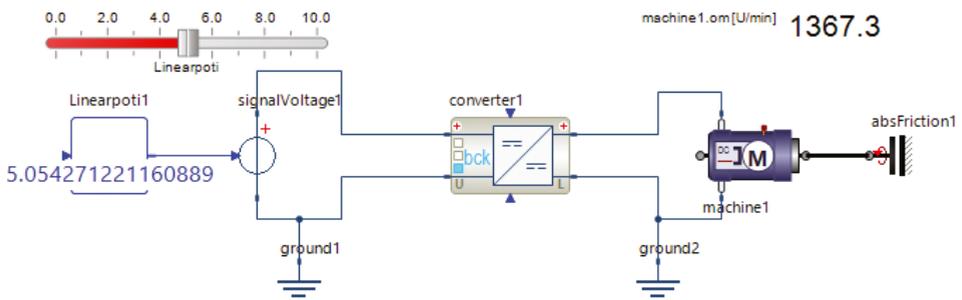
Der allgemeine Wirkungsplan einer Steuerung mit einem Eingang hat damit die Struktur aus Bild 1.6. Jeder technische Aufbau, der dem allgemeinen Wirkungsplan mit seinen vier Blöcken entspricht, kann als Steuerung bezeichnet werden. Dies soll an drei Beispielen verdeutlicht werden.



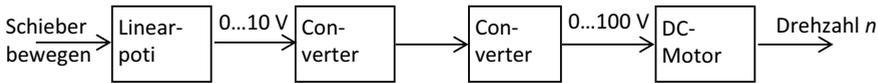
**Bild 1.6** Allgemeiner Wirkungsplan

#### Beispiel 1: Drehzahlsteuerung (siehe *1\_ST\_Drehzahl\_DCM.isx*)

Die Schieberbewegung als Eingangssignal wird vom Eingangsglied in eine niedrige Spannung umgewandelt. Der Converter verarbeitet diese Spannung und gibt als Stellglied die hohe Spannung an den Motor weiter (Bild 1.7 und Bild 1.8).



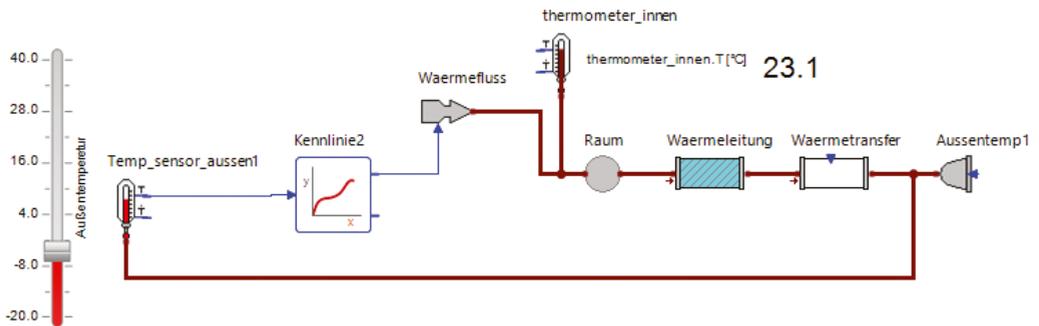
**Bild 1.7** Screenshot von *1\_ST\_Drehzahl\_DCM.isx*



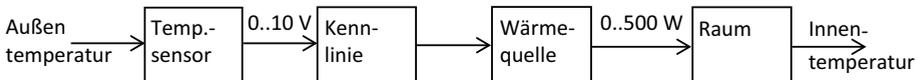
**Bild 1.8** Wirkungsplan von *1\_ST\_Drehzahl\_DCM*

### Beispiel 2: Temperatursteuerung (siehe *2\_ST\_Temperatur\_Raum.isx*)

Eingangsgröße ist die Außentemperatur, welche über einen Sensor in eine Spannung umgesetzt wird. In einer Elektronik wird mithilfe einer Kennlinie dieses Spannungssignal in den nötigen Wärmebedarf gewandelt. Die Wärmequelle als Stellglied erzeugt die erforderliche Wärmemenge. In Abhängigkeit vom Raum entsteht damit die Innentemperatur (Bild 1.9 und Bild 1.10).



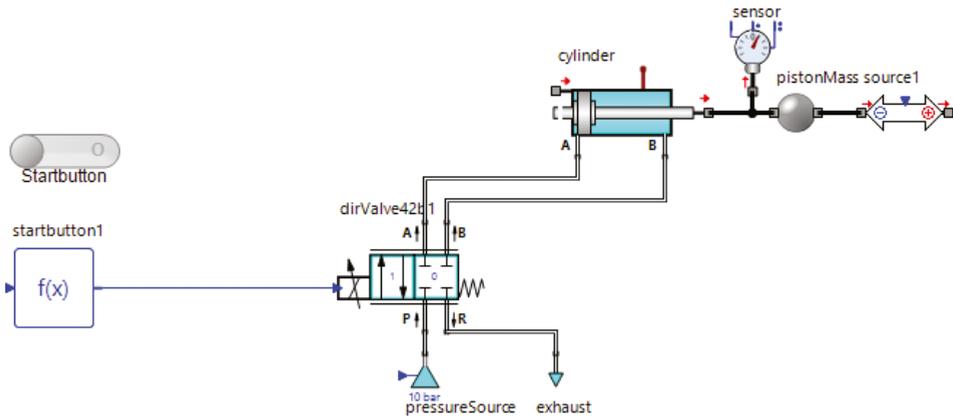
**Bild 1.9** Screenshot von *2\_ST\_Temperatur\_Raum.isx*



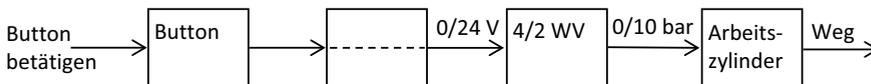
**Bild 1.10** Wirkungsplan von *2\_ST\_Temperatur\_Raum*

### Beispiel 3: Steuerung eines Pneumatikzylinders (siehe *3\_ST\_Bewegung\_Pneumatikzyl.isx*)

Mit Betätigung des Startbuttons (Eingangssignal) wird ein Spannungssignal ohne weitere Verarbeitung direkt auf das 4/2-Wegeventil (4/2 WV) als Stellglied gegeben. Die Ausgangsgröße des Ventils ist der Druck, welcher den Arbeitszylinder ausfahren lässt (Bild 1.11 und Bild 1.12).



**Bild 1.11** Screenshot von *3\_ST\_Bewegung\_Pneumatikzyl.isx*



**Bild 1.12** Wirkungsplan von *3\_ST\_Bewegung\_Pneumatikzyl*

Nach diesen Beispielen folgt nun noch eine allgemeine Einschätzung von Steuerungen. In der Technik spricht man davon, dass Steuerungen nur genügend genau sind. Mit diesem Satz soll ausgedrückt werden, dass Steuerungen nur im Idealfall funktionieren. Zum einen reagieren sie nicht auf Störungen, und zum anderen sind sie nicht robust gegenüber Parameterschwankungen. Mit Parameterschwankung ist die Änderung der physikalischen Beschreibungsgrößen gemeint, wie sie zum Beispiel durch Alterung und Verschleiß auftreten kann.



### Video 3: Steuerungsprobleme

Dass Steuerungen nicht auf Störungen oder Parameterschwankungen reagieren, wird in diesem Video anhand von drei Beispielen demonstriert.

Steuerungen werden also nur dort eingesetzt, wo Störungen und Systemparameterschwankungen vernachlässigt werden können. Dies ist z. B. bei drehzahlfesten Elektromotoren (Asynchron- und Synchronmotoren) und auch bei Temperatursteuerungen wie in Beispiel 2 der Fall. Sie werden in Standardgebäuden wie Supermärkten eingesetzt, da hier schon bei der Konstruktion mögliche Störungen eliminiert werden (keine Fenster) bzw. beim Betrieb keine Rolle spielen (Anzahl der Kunden hat auf Innentemperatur nur geringen Einfluss). Auch bei geringen Anforderungen an die Exaktheit werden Steuerungen eingesetzt. Da pneumatische Arbeitszylinder immer nur auf Anschlag gefahren werden und damit alle Signale nur binärer Natur sein müssen, ist eine Steuerung hier vollkommen ausreichend. Sobald jedoch hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Robustheit gestellt werden, benötigt man eine Regelung.



### Übung 1

Ordnen Sie den Gliedern und Signalen des allgemeinen Wirkungsplans einer Steuerung die konkrete Entsprechung einer Füllstandsteuerung zu (siehe *4\_ST\_Fuellstand\_Tank.isx*, Bild 1.13 und Bild 1.14).

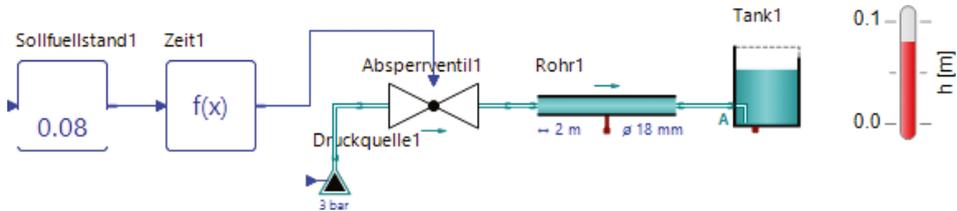


Bild 1.13 Screenshot von *4\_ST\_Fuellstand\_Tank.isx*

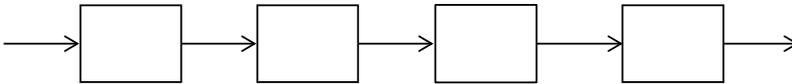


Bild 1.14 Ein leerer Wirkungsplan

## 1.3.2 Regelungsschema



### Video 4: Regelungsbeispiel DCM (siehe auch *1\_Video4\_DCM\_RegelungsBeispiel.isx*)

Der prinzipielle Aufbau eines Regelkreises wird in diesem Video am Beispiel einer Drehzahlregelung schrittweise vorgeführt.

Bei Regelungen wird der gemessene Istwert vom Sollwert subtrahiert. Bei einer Differenz ungleich 0 wird mithilfe eines Reglers und des Stellers eine neue Stellgröße erzeugt, welche den Unterschied zwischen Ein- und Ausgangsgröße der Regelung verschwinden lässt. Die gewünschte Größe wird über einen Sollwertgeber eingegeben. Ein erster allgemeiner Wirkungsplan hat dann die Kreisstruktur von Bild 1.15.

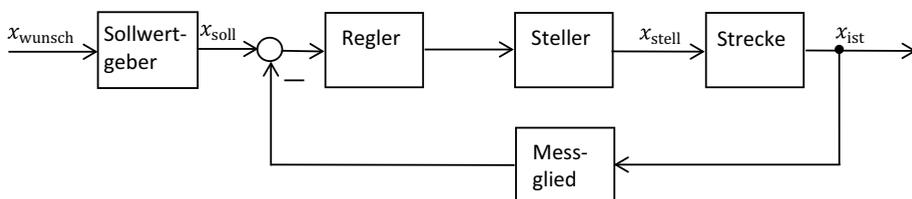
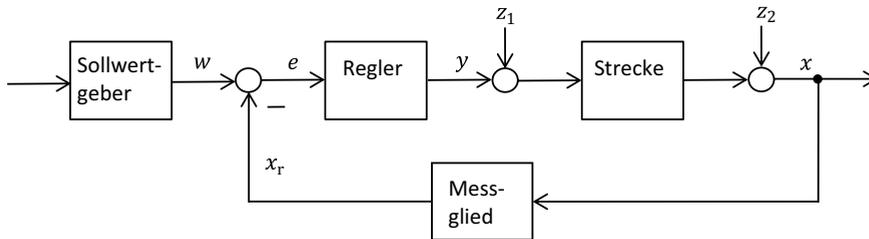


Bild 1.15 Wirkungsplan einer Regelung

Zur einheitlichen Betrachtung und Berechnung von Regelkreisen bekommen die unterschiedlichen Signale eine jeweils eigene Bezeichnung. Außerdem werden die möglichen Störsignale additiv in die Regelung eingebunden. Abschließend geht noch der Steller in den Reglerblock auf. Der finale allgemeine Wirkungsplan eines Regelkreises hat damit die Form von Bild 1.16.



**Bild 1.16** Allgemeiner Wirkungsplan einer Regelung

Die auftretenden Signale werden regelungstechnisch wie folgt bezeichnet:

$w$	Führungsgröße
$x$	Regelgröße
$x_r$	gemessene Regelgröße
$e$	Regeldifferenz/Regelabweichung $e = w - x_r$
$y$	Stellgröße
$z_1$	Versorgungsstörung
$z_2$	Laststörung

Jeder technische Aufbau, der dem allgemeinen Wirkungsplan entspricht, kann als Regelung bezeichnet werden. An den drei nachfolgenden Beispielen soll dies verdeutlicht werden.

### Beispiel 1: Drehzahlregelung (siehe [5\\_RK\\_Drehzahl\\_DCM.isx](#))

Die gemessene Drehzahl wird von der gewünschten Drehzahl subtrahiert. Die entstehende Regelabweichung wird über den Converter in Motorspannung umgesetzt (Bild 1.17 und Bild 1.18). Dabei ist das eingestellte Tastverhältnis als Reglerparameter aufzufassen.

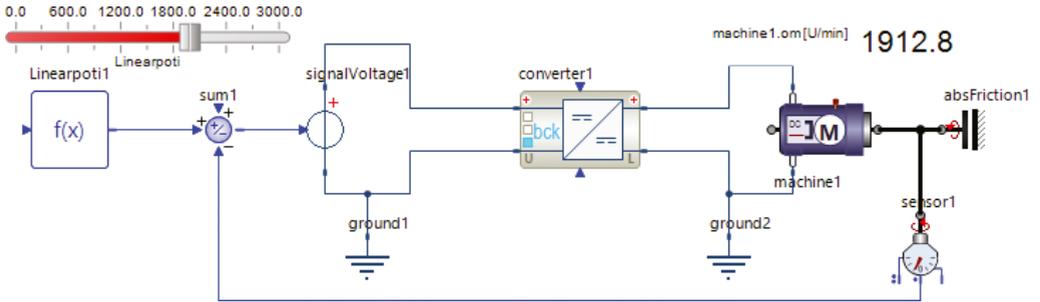


Bild 1.17 Screenshot von 5\_RK\_Drehzahl\_DCM.isx

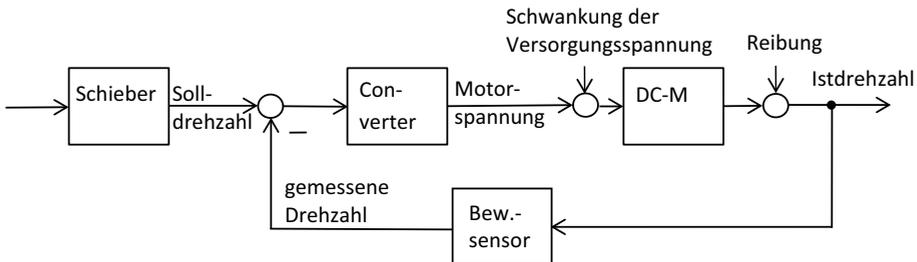


Bild 1.18 Wirkungsplan von 5\_RK\_Drehzahl\_DCM

**Beispiel 2: Temperaturregelung (siehe 6\_RK\_Temperatur\_Raum.isx)**

Die Wunschtemperatur als Führungsgröße wird mit der Raumtemperatur als Regelgröße verglichen. Über eine Verstärkung und eine Umwandlung in Wärme wird ein Wärmestrom als Stellgröße erzeugt, welcher den Raum heizt (Bild 1.19 und Bild 1.20).

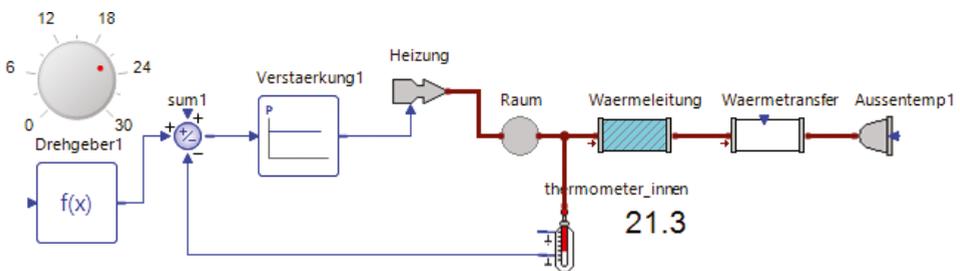
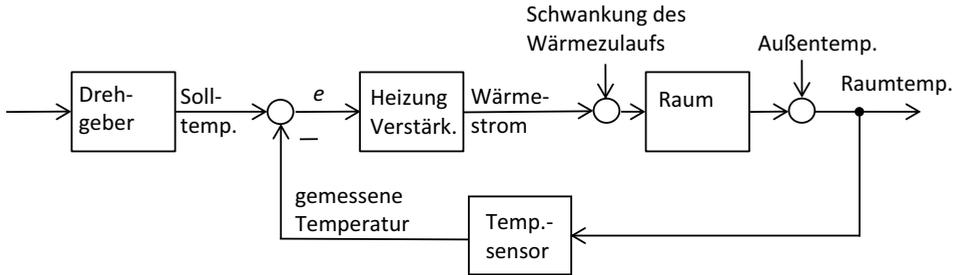


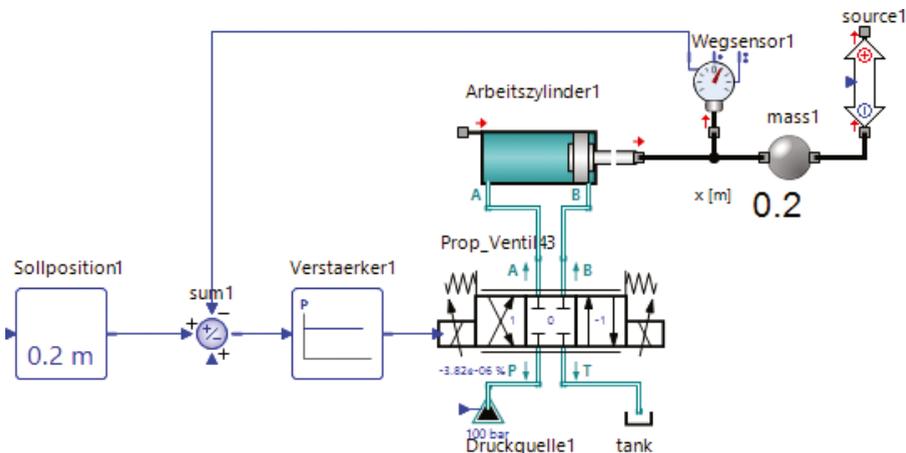
Bild 1.19 Screenshot von 6\_RK\_Temperatur\_Raum.isx



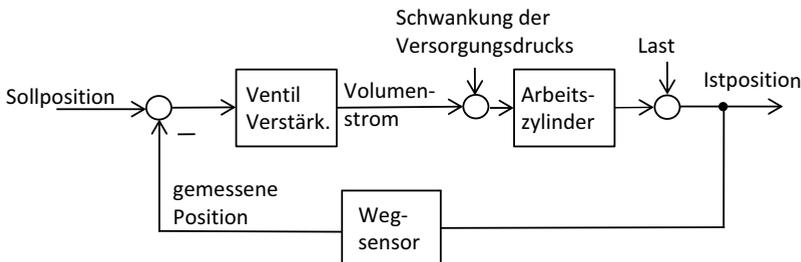
**Bild 1.20** Wirkungsplan von `6_RK_Temperatur_Raum`

### Beispiel 3: Hydraulikzylinderregelung (siehe `7_RK_Bewegung_Hydzykl.isx`)

Bei einer Regelabweichung  $e$  ungleich 0 stellt das Proportionalventil einen Volumenstrom zur Verfügung, welcher so lange fließt, bis sich Führungs- und Regelgröße angeglichen haben ( $e = 0$ ) bzw. die gewünschte Position erreicht ist (Bild 1.21 und Bild 1.22). Auf den Sollwertgeber wurde verzichtet.



**Bild 1.21** Screenshot von `7_RK_Bewegung_Hydzykl.isx`

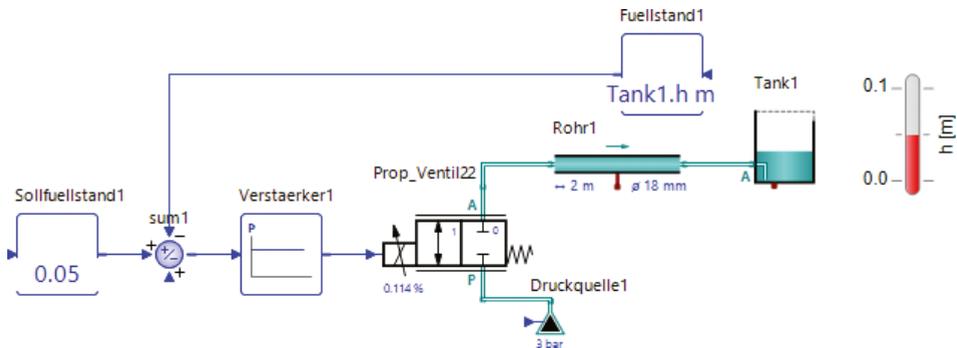


**Bild 1.22** Wirkungsplan von `7_RK_Bewegung_Hydzykl`

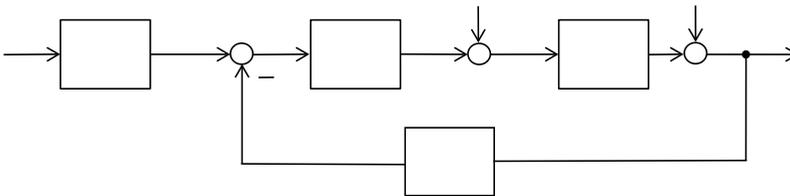


### Übung 2

Ordnen Sie den Gliedern und Signalen des allgemeinen Wirkungsplans einer Regelung die konkrete Entsprechung einer Füllstandsregelung zu (siehe *8\_RK\_Fuellstand\_Tank.isx*, Bild 1.23 und Bild 1.24).



**Bild 1.23** Screenshot von *8\_RK\_Fuellstand\_Tank.isx*



**Bild 1.24** Ein leerer Wirkungsplan

## 1.3.3 Allgemeiner Charakter der Regelung

Ein Blick in die Geschichte zeigt, dass Regelkreise schon seit langer Zeit in technischen Anlagen eingesetzt wurden:

- Antike: Niveauregelung von Wasserständen durch Schwimmer
- 1590: Cornelis Jacobszoon Drebbel – Thermostat im Inkubator für Hühnereier
- 1788: James Watt – Fliehkraftregler im Maschinenbau

Diese Beispiele verdeutlichen, dass schon früh technische Systeme entwickelt wurden, die dem allgemeinen Aufbau von Regelkreisen entsprechen. Doch erst der Amerikaner Norbert Wiener und zeitgleich Hermann Schmidt in Deutschland beschrieben die allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten von regelungstechnischen Systemen, die den vorangehend genannten Anwendungen zugrunde liegen. So können auch

Prozesse und Abläufe nicht technischer Disziplinen über Regelkreise beschrieben werden. Mit folgenden Beispielen soll aufgezeigt werden, dass das Prinzip des Regelkreises universell ist:

<b>Medizin</b>	Beispiel: Regelung der Körpertemperatur
<b>Biologie</b>	Beispiel: Regelung des Wasserhaushalts in Pflanzen
<b>BWL</b>	Beispiel: Marktregulierung
<b>Soziologie</b>	Beispiel: Regulierung des Wahlverhaltens
<b>Verkehrswesen</b>	Beispiel: Regulierung des Straßenverkehrs
<b>u. v. m.</b>	

Eine besondere Stellung nimmt dabei der Mensch als Regler ein. Unter der Prämisse, dass wir nur zwei prinzipielle Führungsgrößen (Ernährung und Vermehrung) haben, lässt sich nahezu unser gesamtes Verhalten über Regelkreise erklären. Jeder Dialog unterliegt den Gesetzmäßigkeiten eines Regelkreises. Egal ob wir gerade Regler oder Strecke sind, es gibt stets eine Führungsgröße (Wunsch zu gefallen, zu überzeugen usw.), der Erfolg wird durch Beobachtung gemessen und die Stellgröße eventuell verändert. Auch unser sonstiges Handeln unterliegt den Prinzipien des Regelkreises. Egal ob wir kochen, Auto fahren oder im Garten arbeiten, immer gibt es eine Wunschgröße (Geschmack, Geschwindigkeit oder Ertrag), den Vergleich mit der Wirklichkeit und den Versuch, die Diskrepanz über die Beeinflussung der Strecke (Topfinhalt, Auto oder Beet) aufzulösen. Wenn man dies konsequent zu Ende denkt, muss der Mensch als rein biologische Maschine verstanden werden, die ohne freien Willen in komplexen Regelkreisen agiert. Das ist für die meisten von uns eine beängstigende Vorstellung, weshalb sich diese Sichtweise auch nicht durchgesetzt hat.

# 2

## Mathematische Grundlagen der Regelungstechnik

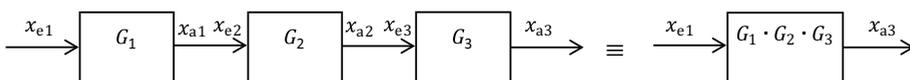
Um in der Regelungstechnik Berechnungen zur Reglerdimensionierung durchführen zu können, braucht es einige spezielle mathematische Kenntnisse, die in diesem Kapitel vermittelt werden.

### 2.1 Arbeiten mit Wirkungsplänen

Wirkungspläne sind die grundlegende, grafisch abstrakte Beschreibungsform in der Regelungstechnik. Wirkungspläne können über Vereinfachungsregeln umgezeichnet und zusammengefasst werden. Die wichtigsten werden nachfolgend dargelegt und hergeleitet.

#### Regel 1: Multiplikation

Übertragungsglieder in Reihe können multipliziert werden (Bild 2.1).



**Bild 2.1** Vereinfachungsregel der Reihenschaltung

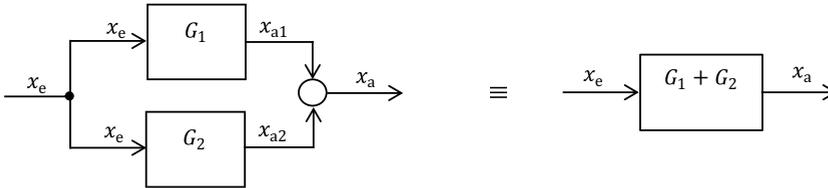
$$x_{a1} = x_{e2} = G_1 \cdot x_{e1}$$

$$x_{a2} = x_{e3} = G_2 \cdot x_{e2} = G_2 \cdot G_1 \cdot x_{e1}$$

$$x_{a3} = G_3 \cdot x_{e3} = G_3 \cdot G_2 \cdot G_1 \cdot x_{e1}$$

**Regel 2: Addition**

Übertragungsglieder, die mit Summationspunkt verbunden sind, können addiert werden (Bild 2.2).

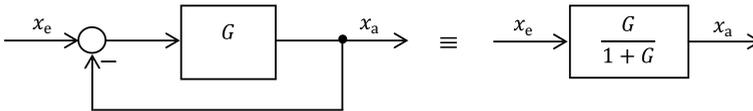


**Bild 2.2** Vereinfachungsregel der Parallelschaltung

$$x_a = x_{a1} + x_{a2} = G_1 \cdot x_e + G_2 \cdot x_e = (G_1 + G_2) \cdot x_e$$

**Regel 3: einfache Rückkopplung auflösen**

Ein rückgekoppeltes Übertragungsglied kann vereinfacht werden (Bild 2.3).



**Bild 2.3** Vereinfachungsregel der Rückkopplung

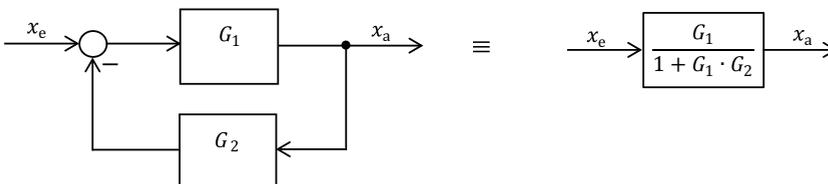
$$x_a = G \cdot (x_e - x_a)$$

$$x_a + G \cdot x_a = G \cdot x_e$$

$$x_a = \frac{G}{1 + G} \cdot x_e$$

**Regel 4: Rückkopplung mit zusätzlichem Glied im Rückführzweig auflösen**

Ein rückgekoppeltes Übertragungsglied, das ein weiteres Übertragungsglied im Rückführzweig hat, kann vereinfacht werden (Bild 2.4).



**Bild 2.4** Vereinfachungsregel der Rückkopplung mit Rückführglied

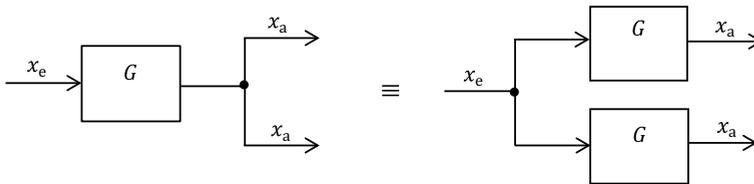
$$x_a = G_1 \cdot (x_e - G_2 \cdot x_a)$$

$$x_a + G_1 \cdot G_2 \cdot x_a = G_1 \cdot x_e$$

$$x_a = \frac{G_1}{1 + G_1 \cdot G_2} \cdot x_e$$

### Regel 5: Verlegung an einer Verzweigungsstelle

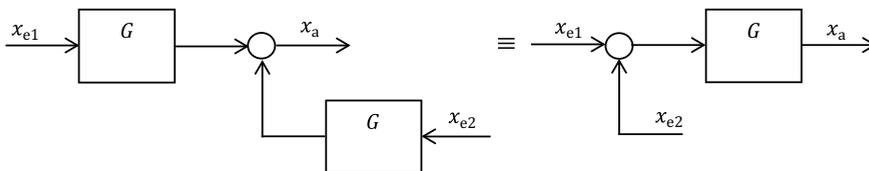
Ein Übertragungsglied vor einer Verzweigungsstelle kann auch in alle Pfade nach der Verzweigungsstelle gezeichnet werden (Bild 2.5).



**Bild 2.5** Vereinfachungsregel der Verlegung der Verzweigung

### Regel 6: Ausklammern

Gleiche Übertragungsglieder vor einer Summationsstelle können auch als ein Glied hinter die Summationsstelle gelegt werden (Bild 2.6).

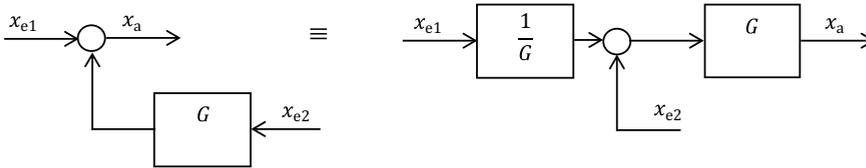


**Bild 2.6** Vereinfachungsregel des Ausklammerns

$$G \cdot x_{e1} + G \cdot x_{e2} = G \cdot (x_{e1} + x_{e2}) = x_a$$

**Regel 7: Ausklammern mit Korrektur**

Ein Übertragungsglied vor einer Summationsstelle kann auch hinter die Summationsstelle gelegt werden, wenn in den anderen Pfad korrigiert wird (Bild 2.7).



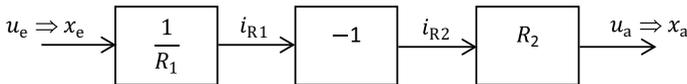
**Bild 2.7** Vereinfachungsregel des Ausklammerns mit Korrektur

$$x_{e1} + G \cdot x_{e2} = G \cdot \left( \frac{1}{G} \cdot x_{e1} + x_{e2} \right) = x_a$$

Die Anwendung der Regeln soll an einigen Beispielen verdeutlicht werden.

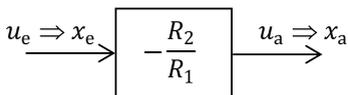
**(1) invertierender Verstärker ( $u_d, i_d = 0$ )**

Bild 2.8 zeigt den Wirkungsplan des invertierenden Verstärkers.



**Bild 2.8** Wirkungsplan des invertierenden Verstärkers

Bild 2.9 zeigt die Anwendung von Regel 1.



**Bild 2.9**

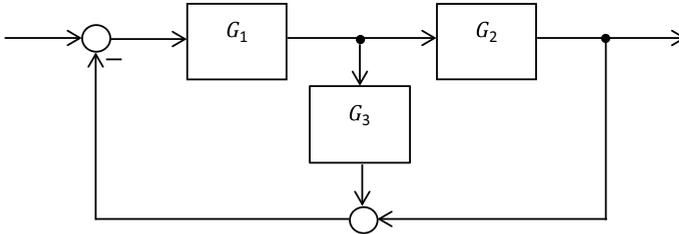
Zusammenfassung des Wirkungsplans des invertierenden Verstärkers

**Video 5: OPV-Schaltung (siehe auch 2\_Video5\_OPV vereinfachen.isx)**

Die Anwendung der Vereinfachungsregeln von Signalflussbildern wird in diesem Video am Beispiel eines realen invertierenden Verstärkers vorgeführt.

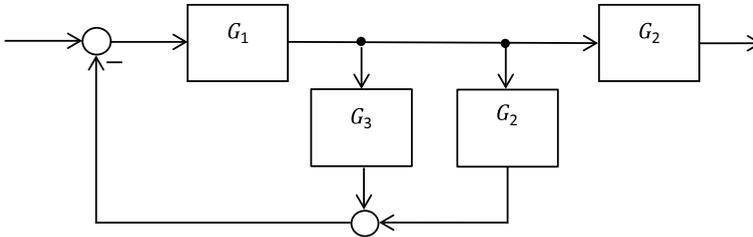
**(2) Verzögerungsglied 2. Ordnung**

Bild 2.10 zeigt den Wirkungsplan eines Tiefpasses (TP) 2. Ordnung.



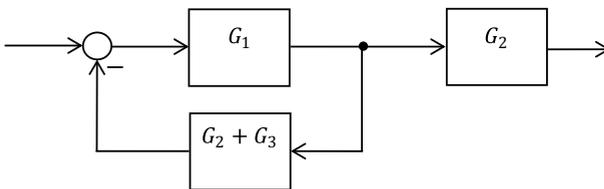
**Bild 2.10** Wirkungsplan des TP 2. Ordnung

Bild 2.11 zeigt die Umsetzung von Regel 5.



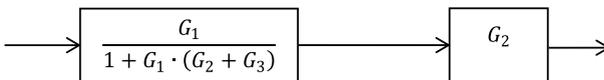
**Bild 2.11** Wirkungsplan des TP 2. Ordnung (umgewandelt 1)

Bild 2.12 zeigt die Umsetzung von Regel 2.



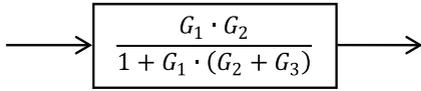
**Bild 2.12** Wirkungsplan des TP 2. Ordnung (umgewandelt 2)

Bild 2.13 zeigt die Umsetzung von Regel 4.



**Bild 2.13** Wirkungsplan des TP 2. Ordnung (umgewandelt 3)

Bild 2.14 zeigt die Umsetzung von Regel 1.

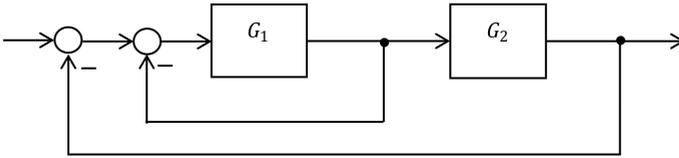


**Bild 2.14**

Wirkungsplan des TP 2. Ordnung (umgewandelt 4)

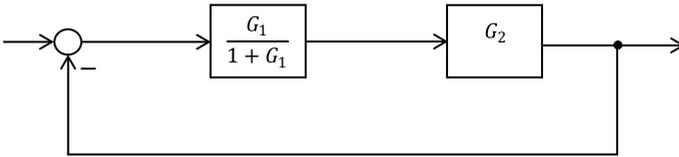
### (3) Kaskade

Bild 2.15 zeigt den Wirkungsplan einer Kaskadenregelung.



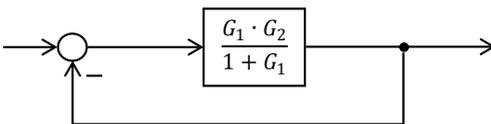
**Bild 2.15** Wirkungsplan einer Kaskade

Bild 2.16 zeigt die Umsetzung von Regel 3 auf den inneren Kreis.



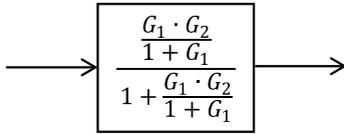
**Bild 2.16** Wirkungsplan einer Kaskade (umgewandelt 1)

Bild 2.17 zeigt die Umsetzung von Regel 1.



**Bild 2.17** Wirkungsplan einer Kaskade (umgewandelt 2)

Bild 2.18 zeigt die Umsetzung von Regel 3.

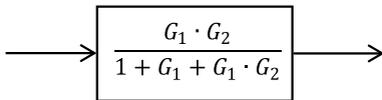


**Bild 2.18**  
Wirkungsplan einer Kaskade (umgewandelt 3)

Bedenken Sie Folgendes:

$$\frac{\frac{a}{b}}{1 + \frac{a}{b}} = \frac{a}{b + a}$$

Bild 2.19 zeigt die Zusammenfassung.

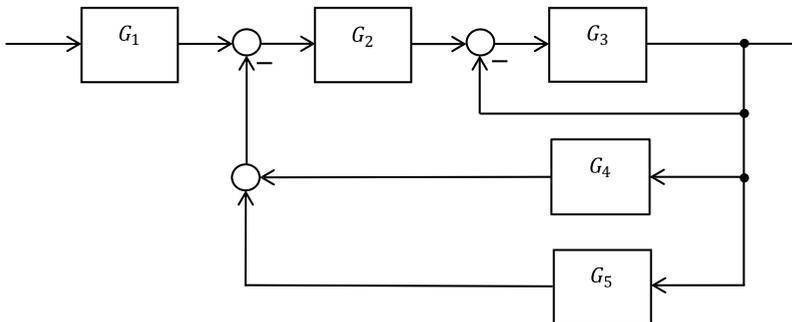


**Bild 2.19**  
Wirkungsplan einer Kaskade (umgewandelt 4)



### Übung 3

Fassen Sie den Wirkungsplan aus Bild 2.20 zusammen (ein Bruchstrich).



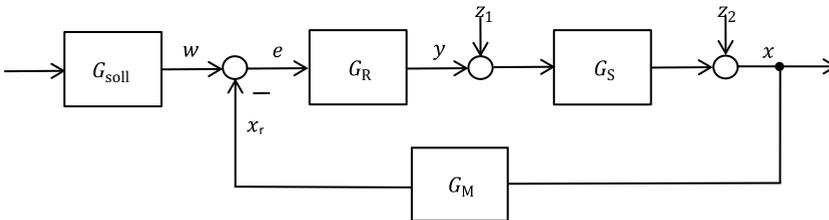
**Bild 2.20** Wirkungsplan

## 2.2 Anwendung der Vereinfachungsregeln auf den Regelkreis

Die Vereinfachungsregeln erlauben es nun, für unterschiedliche Anwendungsfälle grundlegende Vereinfachungen und Berechnungsformeln aufzustellen.

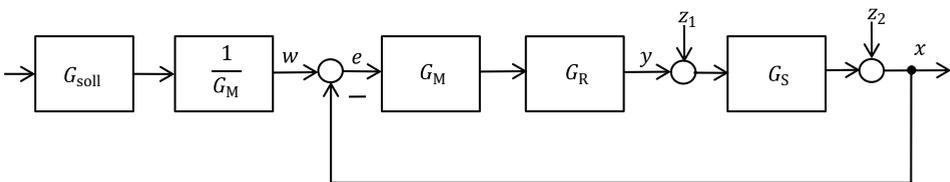
### 2.2.1 Beseitigung der Messeinrichtung

Klassischerweise wird bei der weiteren Betrachtung von Regelkreisen nicht die Messeinrichtung betrachtet, da sie durch Umformung in den Vorwärtszweig aufgeht. Es wird vom Regelkreis aus Bild 2.21 ausgegangen. Die Glieder werden mittels entsprechender Übertragungsfunktionen beschrieben.



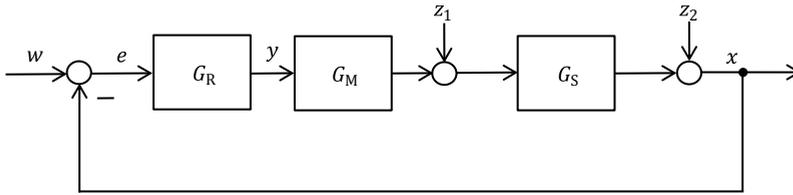
**Bild 2.21** Allgemeiner Wirkungsplan einer Regelung

Nun wird Regel 7 angewendet, und es entsteht Bild 2.22.



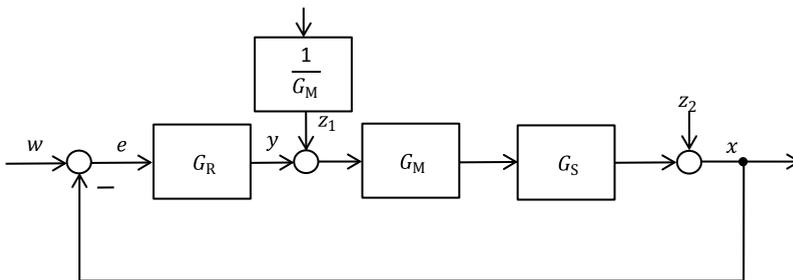
**Bild 2.22** Allgemeiner Wirkungsplan einer Regelung (umgewandelt 1)

Bekommt der Sollwertgeber nun die gleiche Übertragungsfunktion wie die Messeinrichtung, heben sich die beiden Blöcke am Eingang auf. Der Ansatz  $G_{\text{soll}} = G_M$  ist dabei grundsätzlicher Natur, da die Eingangsgrößen einer Summationsstelle nicht nur dieselbe physikalische Größe, sondern auch die gleiche Dimension haben müssen. Zur einheitlichen Darstellung werden die Blöcke von  $G_M$  und  $G_R$  nun getauscht (Bild 2.23).



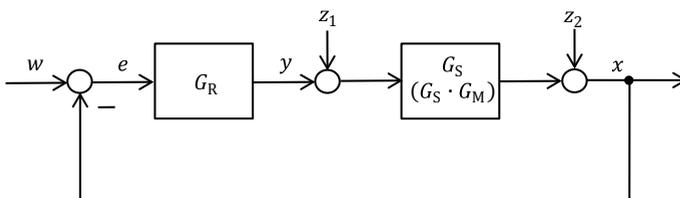
**Bild 2.23** Allgemeiner Wirkungsplan einer Regelung (umgewandelt 2)

Damit der Block  $G_M$  ganz verschwindet, wird er, wie in Bild 2.24 gezeigt, hinter die nächste Summationsstelle geschoben (Regel 7).



**Bild 2.24** Allgemeiner Wirkungsplan einer Regelung (umgewandelt 3)

Da in der Praxis die Störung  $z_1$  direkt einwirkt und nicht gemessen werden muss, kann der Block über  $z_1$  im Normalfall weggelassen werden. Somit kann man den Block  $G_M$  verschwinden lassen, indem man ihn durch Hinzumultiplizieren in den Streckenblock  $G_S$  aufgehen lässt. Für alle weiteren Betrachtungen geht man somit von der in Bild 2.25 dargestellten Regelkreisstruktur aus.

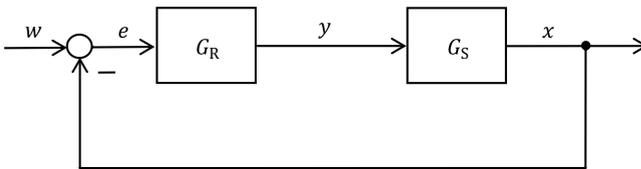


**Bild 2.25** Grundlegende Regelkreisstruktur

## 2.2.2 Führungsgrößenregelung

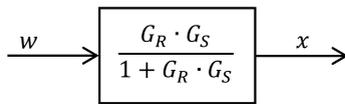
Die Aufgabe einer Führungsgrößenregelung besteht darin, auf eine neue Führungsgröße  $w$  zu reagieren. Die Störungen werden dabei vernachlässigt, bzw. geht man davon aus, dass keine Störungen auftreten. Damit kann der allgemeine Regelkreis wie in Bild 2.25 dargestellt vereinfacht werden.

In der Praxis liegt also eine Führungsgrößenregelung vor, wenn sich die vorgegebene Eingangsgröße  $w$  ändert, das heißt, wenn z. B. eine neue Raumtemperatur gewünscht wird, eine neue Position angefahren werden soll oder ein neuer Füllstand vorgegeben wird.



**Bild 2.26** Grundlegende Regelkreisstruktur einer Führungsgrößenregelung

Nach Anwendung von Regel 1 und Regel 3 auf Bild 2.26 lässt sich der Wirkungsplan wie in Bild 2.27 dargestellt vereinfachen.



**Bild 2.27**

Zusammengefasster Regelkreis ohne  $z_1$  und  $z_2$  t

Damit ist die Übertragungsfunktion einer Führungsgrößenregelung

$$G_w = \frac{x}{w} = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R \cdot G_S}$$

beziehungsweise berechnet sich die Regelgröße einer Führungsgrößenregelung wie folgt:

$$x = \frac{G_R \cdot G_S}{1 + G_R \cdot G_S} \cdot w$$