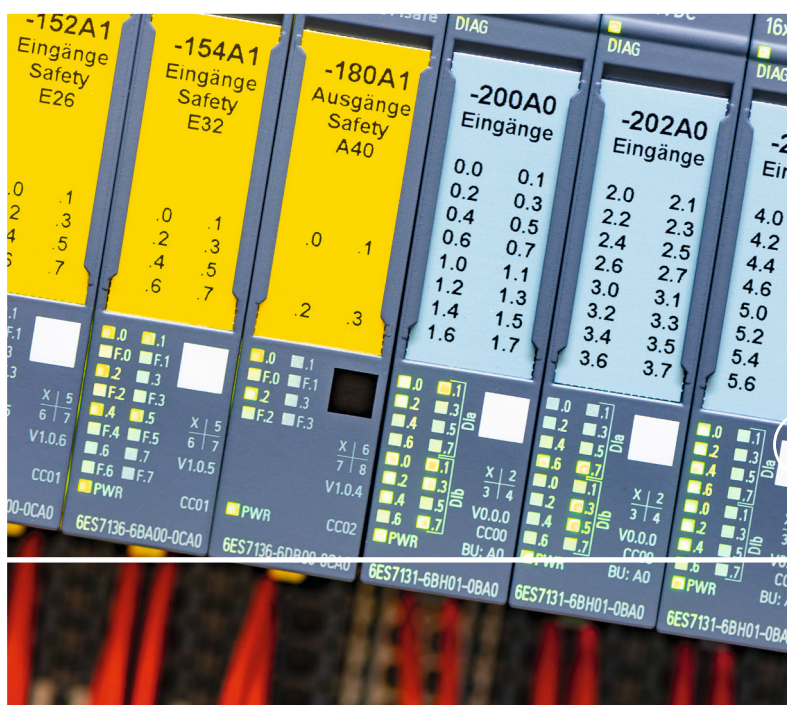


Thomas Beier
Petra Wurl



Regelungstechnik

Basiswissen, Grundlagen, Beispiele



3., aktualisierte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-zj8af-4bvuc

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben 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

Thomas Beier, Petra Wurl

Regelungstechnik

Basiswissen, Grundlagen, Beispiele

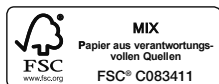
3., aktualisierte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Dr.-Ing. Thomas Beier, Staatliche Technikerschule Berlin

Dipl.-Ing. Petra Wurl, Staatliche Technikerschule Berlin



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) 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(en, Herausgeber) 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 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 benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: Max Kostopoulos, unter Verwendung von Grafiken von © stock.adobe.com/getty

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47277-8

E-Book-ISBN 978-3-446-47403-1

Vorwort zur 3. Auflage

Die Autoren freuen sich über die Möglichkeit, mit der 3. Auflage noch kleine Fehler beseitigen zu können. Wir haben viele positive Rückmeldungen bekommen. Als Zielgruppe waren ursprünglich Studierende an Technikerschulen vorgesehen, doch hat sich gezeigt, dass das Buch auch als Einstiegsliteratur und Prüfungsvorbereitung an den Fachhochschulen benutzt wird. Das Buch enthält die allgemeinen Grundlagen der Regelungstechnik ohne große Anforderungen an die Mathematik. Es ist ein Anwendungsbuch der Regelungstechnik in der 3. Auflage. Die einzelnen Abschnitte des Buches wurden sehr aufmerksam gelesen und wir haben die konstruktiven Anregungen und Vorschläge in die 3. Auflage einfließen lassen. Das Buch wurde an einigen Stellen erweitert. Den Autoren war es wichtig, neben den Grundlagen zu den Operationsverstärkern auch die Modellierung eines Systems 2. Ordnung aufzunehmen. Die Themen vermaschte Regelkreise und digitale Regler wurden durch Beispiele erweitert. Wir möchten die Leser weiter ermutigen, uns Anregungen und konstruktive Kritik mitzuteilen. Bei unseren Studierenden bedanken wir uns für das akribische Fehlersuchen und Finden. Bedanken möchten wir uns auch wieder für die sehr gute Zusammenarbeit mit dem Lektorat des Hanser Verlags.

Berlin, Januar 2022

Petra Wurl, Thomas Beier

Inhalt

1	Einführung in die Regelungstechnik	11
1.1	Grundbegriffe der Regelungstechnik	12
1.1.1	Steuern oder Regeln?	12
1.1.2	Die Größen des Regelkreises	14
1.1.3	Die Regelkreisglieder	16
1.2	Darstellung von Regelkreisen	19
1.2.1	Das Übertragungsglied	19
1.2.2	Der elementare Regelkreis	24
1.2.3	Darstellung in Fließbildern	30
1.3	Der Operationsverstärker als Bauelement in der Regelungstechnik	32
1.3.1	Der invertierende Verstärker	35
1.3.2	Der nicht invertierende Verstärker	35
1.3.3	Der Impedanzwandler	36
1.3.4	Der Summierer	37
1.3.5	Der Differenzverstärker	37
1.3.6	Der Integrierer	39
1.3.7	Der Differenzierer	39
1.3.8	Der Tiefpass	40
1.4	Übungen	41
2	Das stationäre Verhalten von Regelkreisen	43
2.1	Die Kreisverstärkung	44
2.2	Das Führungsverhalten	46
2.3	Der stationäre Regelfehler	49
2.4	Das Störverhalten	51
2.4.1	Störgrößen im Vorwärtszweig	52
2.4.2	Störgrößen in der Rückführung	56
2.5	Übungen	59
3	Untersuchung von Übertragungsgliedern	61
3.1	Das Bode-Diagramm	63
3.2	Reihenschaltung von Frequenzgängen	69

3.3	Übertragungsfunktion	74
3.4	Ortskurve	74
3.5	Untersuchung im Zeitbereich	78
3.6	Die Laplace-Transformation	80
3.7	Modellbildung und Simulation	84
3.8	Übungen	87
4	Regelstrecken	88
4.1	Regelstrecken mit Ausgleich	88
4.1.1	Regelstrecken mit Ausgleich ohne Verzögerung	89
4.1.2	Verzögerungsglieder erster Ordnung	92
4.1.3	Verzögerungsglieder höherer Ordnung	99
4.1.4	Verzögerungsglieder zweiter Ordnung	108
4.1.5	Regelstrecken mit Totzeitverhalten	113
4.2	Regelstrecken ohne Ausgleich	117
4.2.1	Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung	117
4.2.2	Regelstrecken ohne Ausgleich mit Verzögerung	124
4.3	Zusammengesetzte Regelstrecken	128
4.4	Übungen	131
5	Regel Einrichtungen	134
5.1	Regler mit Proportionalverhalten	135
5.2	Regler mit integralem Verhalten	138
5.3	Regler mit PI-Verhalten	141
5.4	Regler mit PD-Verhalten	146
5.5	Der PID-Regler	151
5.6	Übungen	158
6	Anforderungen an einen Regelkreis	160
6.1	Stabilität von Regelkreisen	160
6.2	Übungen	169
7	Bestimmung von Reglern	171
7.1	Integrale Gütekriterien	172
7.2	Praktische Entwurfsverfahren	174
7.2.1	Frequenzkennlinienverfahren	175
7.2.2	Kompensationsverfahren	179
7.2.2.1	Entwurf mit einem PI-Regler	180
7.2.2.2	Entwurf mit einem PID-Regler	183

7.2.3	Betragsoptimum	186
7.2.3.1	Ansatz des Betragsoptimums nach Typ 1.....	187
7.2.3.2	Ansatz des Betragsoptimums nach Typ 2.....	193
7.2.4	Allgemeine Optimierung nach dem Dämpfungsgrad	195
7.2.5	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum für Prozessstrecken	199
7.2.6	Symmetrisches Optimum	201
7.2.7	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	206
7.2.7.1	Reglerbestimmung an der Stabilitätsgrenze	206
7.2.7.2	Reglerbestimmung mittels Sprungantwort nach Ziegler und Nichols	209
7.2.8	Reglerbestimmung mittels Sprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick (CHR)	211
7.3	Vermaschte Regelkreise	213
7.3.1	Störgrößenaufschaltung	213
7.3.2	Vorregelung	215
7.3.3	Regelung mit Hilfsstellgröße	216
7.3.4	Kaskadenregelung	217
7.4	Übungen	220
8	Unstetige Regler	222
8.1	Zweipunktregler	223
8.2	Zweipunktregler mit P-T ₁ - und Totzeitglied	229
8.3	Zweipunktregler mit Regelstrecken höherer Ordnung	233
8.4	Optimierung von Zweipunktreglern	235
8.4.1	Zweipunktregler mit Rückführung	235
8.4.2	Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung	236
8.5	Dreipunktregler	238
8.6	Übungen	244
9	Digitale Regler	246
9.1	Realisierung eines idealen PID-Reglers	249
9.1.1	P-Anteil	249
9.1.2	I-Anteil	250
9.1.3	D-Anteil	251
9.1.4	PID-Algorithmus	252
9.2	Der Bildbereich für Abtastsysteme	254
9.3	Der reale PID-Algorithmus	257
9.4	Wahl der Abtastperiode	259
9.5	Einstellregeln	259
9.6	Übungen	260

10	Lösungen zu den Übungen	261
10.1	Einführung in die Regelungstechnik.....	261
10.2	Das stationäre Verhalten von Regelkreisen	261
10.3	Untersuchung von Übertragungsgliedern	263
10.4	Regelstrecken	266
10.5	Regeleinrichtungen	267
10.6	Anforderungen an einen Regelkreis.....	270
10.7	Bestimmung von Reglern.....	272
10.8	Unstetige Regler	276
10.9	Digitale Regler.....	278
	Verwendete Formelzeichen	280
	Literatur	283
	Index	285

Ergänzendes Material auf <https://plus.hanser-fachbuch.de>:

- Weiterführung zur komplexen Rechnung
- ausführliche Musterlösungen

1

Einführung in die Regelungstechnik

Nach dem Durcharbeiten dieses Kapitels können Sie diese und weitere Fragen beantworten:

- Was unterscheidet eine Steuerung von einer Regelung?
- Welche Baugruppen gehören zu einem Regelkreis?
- Wie werden die Kenngrößen in der Regelungstechnik bezeichnet?
- Welche Darstellungsformen sind in der Regelungstechnik üblich?

Regelungsvorgänge spielen in der „Natur“ und in der Technik eine große Rolle. Eine Größe soll hierbei gezielt beeinflusst werden.

Ein Beispiel aus dem Bereich Natur ist unsere Körpertemperatur. Unabhängig von der Umgebungstemperatur und der körperlichen Verfassung soll sie nahezu konstant bleiben.

In der Technik kann die Temperatur in einem Rührkessel betrachtet werden. Auch hier soll die Temperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur und von einer eventuellen Schwankung der zu erwärmenden Produktmenge sein.

Der Eingriff in den Ablauf könnte von Hand erfolgen. Mit der technischen Entwicklung wurden diese Vorgänge aber weitgehend automatisiert. Laufen die Vorgänge in rechnergeregelten Produktionsprozessen ab, spricht man von Prozessautomatisierung.

Unter einem Prozess versteht man die Umwandlung, den Transport bzw. die Speicherung von Materie, Energie bzw. Information. Das bedeutet, dass es sich bei jedem Arbeitsablauf um einen Prozess handelt.

Soll ein Material zu einem bestimmten Produkt verarbeitet werden, wird der Arbeitsablauf ständig überwacht. Diese Arbeit übernehmen Sensoren. Sie erfassen bestimmte physikalische

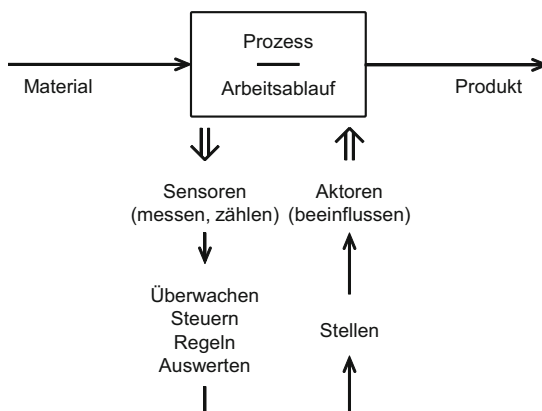


Bild 1.1 Der Prozess

Größen. Damit ist es möglich, den Ablauf zu kontrollieren oder zu dokumentieren. Wird dabei erkannt, dass ein weiterer Arbeitsschritt folgen soll, kann steuernd oder regelnd eingegriffen werden. Dazu müssen Geräte verstellt werden. Diese Aufgabe übernehmen Aktoren. Sie beeinflussen den Arbeitsablauf. Für einen Prozess sind damit bestimmte Techniken notwendig.

Prozessautomatisierung:

- Messtechnik
- Steuerungstechnik
- Regelungstechnik
- Informationstechnik

■ 1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik

1.1.1 Steuern oder Regeln?

In der Regelungstechnik können die Begriffe „Steuern“ und „Regeln“ klar voneinander getrennt werden. Das soll am Beispiel der Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors verdeutlicht werden.

Forderung: Ein Gleichstrommotor soll mit einer bestimmten Drehzahl n_{Soll} laufen.

1. Dem Gleichstrommotor wird eine konstante Erregerspannung U_E zur Verfügung gestellt. Außerdem wird der Motor an eine Spannung U_A angeschlossen. Die Drehzahl der Gleichstrommaschine ist direkt abhängig von dieser Ankerspannung. Sie ist damit eine Eingangsgröße.
2. Der Motor dreht sich dann mit einer bestimmten Geschwindigkeit. Er hat jetzt eine bestimmte Drehzahl. Das ist die geforderte Ausgangsgröße n_{Soll} .
3. Werden unterschiedliche Drehzahlen am Ausgang gefordert, ist die einfachste Möglichkeit, die Drehzahl zu verändern, die Ankerspannung über einen Anlasser zu beeinflussen.
4. Die Eingangsgröße für diesen Spannungsteiler ist eine feste Betriebsspannung U_B .
5. Schwankt diese Betriebsspannung ΔU_B oder ändert sich die Belastung des Motors ΔM_L , wirkt sich das auf die Drehzahl aus. Diese Störungen bewirken eine Drehzahländerung Δn .

Bei der Anordnung in dem Bild 1.2 handelt es sich um eine Steuerung.

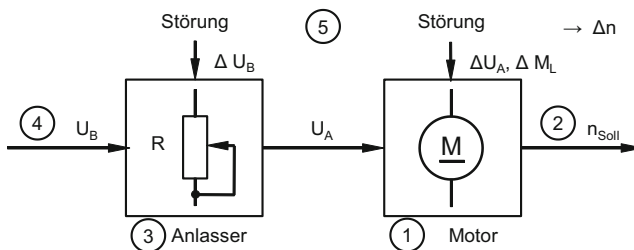


Bild 1.2 Die Steuerung einer Drehzahl



Steuerung

Die Steuerung ist ein offener Wirkungsablauf, bei dem ein Eingangssignal ein Ausgangssignal beeinflusst, Störungen aber nicht ausgeglichen werden.

Die Struktur einer Steuerung ist die Steuerkette aus Bild 1.3. Ein Bestandteil ist die Steuerstrecke. Hierbei handelt es sich um das Objekt, das den gewünschten Prozess realisiert. Außerdem beinhaltet die Steuerkette eine Steuereinrichtung, die in der Lage ist, die Steuerstrecke im geforderten Maß zu beeinflussen.

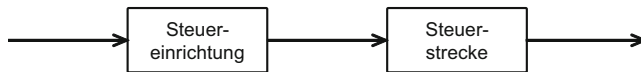


Bild 1.3 Die Steuerkette

Wird eine Aufgabenstellung durch eine Steuerung realisiert, könnte das Ergebnis, z. B. der Drehzahlregelung, den Verlauf in Bild 1.4 zeigen. Die Maschine läuft hoch und die Drehzahl pendelt sich auf einen Endwert ein. Wird der Motor belastet, sinkt die Drehzahl dauerhaft.

Diese Vorgehensweise ist für die Praxis nur sinnvoll, wenn das Verhalten der Strecke möglichst genau bekannt ist und gleich bleibt. Es sollten also keine Störungen zu erwarten sein. Ansonsten wird statt einer Steuerung eine Regelung verwendet. Hierbei wird erwartet, dass die Drehzahl nach einer kurzen Reaktion wieder auf den gewünschten Wert zurückgeht. Außerdem kann durch eine Regelung das Verhalten beim Ändern des Eingangssignals verbessert werden. Der Endwert kann wie im Bild 1.4 dargestellt schneller erreicht werden.

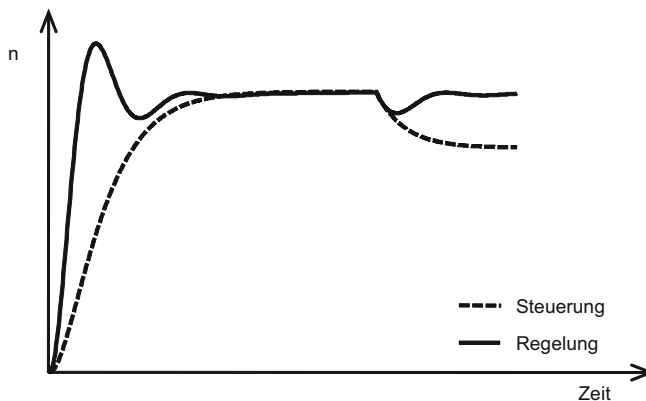


Bild 1.4 Drehzahlverlauf

Um eine Regelung zu realisieren, muss die Ausgangsgröße messtechnisch erfasst werden. Damit ist es möglich, den tatsächlichen Wert mit dem gewünschten zu vergleichen. Anschließend wird nachgeregelt, das heißt das Ergebnis des Vergleichs beeinflusst das Eingangssignal. Die Ausgangsgröße wirkt so auf den Eingang zurück.



Regelung

Bei einer Regelung wird die Ausgangsgröße ständig erfasst, mit dem Sollwert verglichen und auf den Eingang zurückgeführt. Es entsteht ein geschlossener Wirkungsablauf, der Regelkreis.

1.1.2 Die Größen des Regelkreises

Die auftretenden Größen in einem Regelkreis und dessen Bestandteile haben festgelegte Bezeichnungen. Diese sollen wieder am Beispiel einer Drehzahlregelung erläutert werden. Im Bild 1.5 ist das Technologieschema dieser Drehzahlregelung dargestellt. Hier ist keine konkrete Beschriftung zu entnehmen, sondern nur die prinzipielle Funktion. So lässt sich das Zusammenspiel von Ursache und Wirkung eindeutig erkennen.

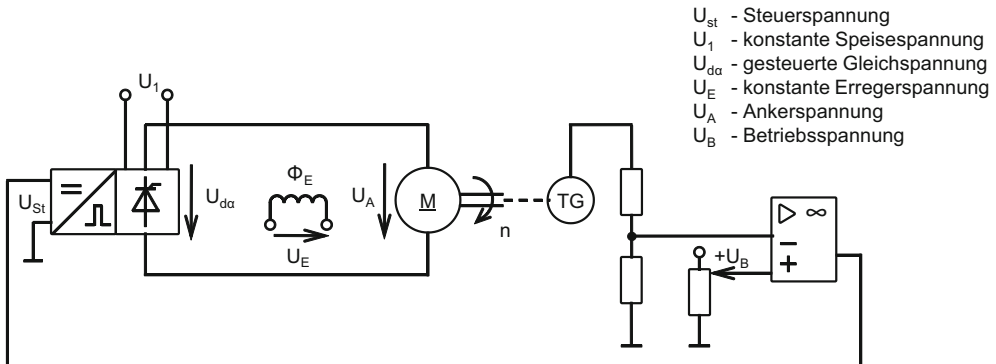


Bild 1.5 Drehzahlregelung

Der Erregerstrom soll auch bei dieser Regelung als konstant angenommen werden. Abgebildet ist eine fremderregte Gleichstrommaschine. Die einzige Eingangsgröße für den Motor ist damit die anliegende Ankerspannung. Heute sind stromrichteragespeiste Antriebe üblich. Hierbei wird eine anliegende Spannung im Mittel durch eine Thyristorschaltung verändert. Die Steuerspannung der Thyristoren wird somit zur Eingangsgröße.

Die Drehzahl ist hier die zu regelnde Größe und wird als **Regelgröße** x bezeichnet.

Die Regelgröße hat zu jedem Zeitpunkt einen tatsächlichen Wert, den Istwert x_i . Damit dieser Wert im Regelkreis weiterverarbeitet werden kann, wird er in eine elektrische Spannung umgewandelt. Das geschieht hier in der Messwerterfassung. Sie besteht aus Tachogenerator und Spannungsteiler. Die so erzeugte Größe wird als **Rückführgröße** r bezeichnet.

In einer Regelung wird ein bestimmter Sollwert x_s gefordert. Der gewünschte Wert wird in Form einer elektrischen Größe, der **Führungsgröße** w , dem Regelkreis zugeführt.

In einer Regelung müssen Soll- und Istwert miteinander verglichen werden. Im betrachteten Beispiel bildet der Differenzverstärker die Differenz von Führungsgröße und Rückführgröße, die **Regeldifferenz** e .

Die Regeldifferenz ist die eigentliche Eingangsgröße des Reglers. Im Regler wird die **Stellgröße** y erzeugt. Sie liefert die Energie, mit der nachgeregelt werden soll. In der Drehzahlregelung wird die Steuerspannung zur Veränderung des Zündwinkels der Thyristoren beeinflusst. So ändert sich die Ankerspannung des Motors und damit die Drehzahl, die Regelgröße. Der Wirkungsablauf ist geschlossen.

Bis hierhin gab es eine Eingangsgröße, die Führungsgröße, und eine Ausgangsgröße, die Regelgröße. Notwendig wird eine Regelung durch das Auftreten einer weiteren Eingangsgröße, der **Störgröße** z .

Unter Störgrößen werden Einflüsse verstanden, die die Regelgröße in unerwünschter Weise beeinflussen.

Im Beispiel der Drehzahlregelung könnten das sein:

- eine Änderung des Lastmoments
- eine Schwankung der Speisespannung der Thyristoren
- die Temperaturbeeinflussung der verwendeten Bauelemente

Damit kann im Bild 1.6 ein Wirkungsplan gezeichnet werden, aus dem die Wirkungsabläufe und die auftretenden Größen hervorgehen.

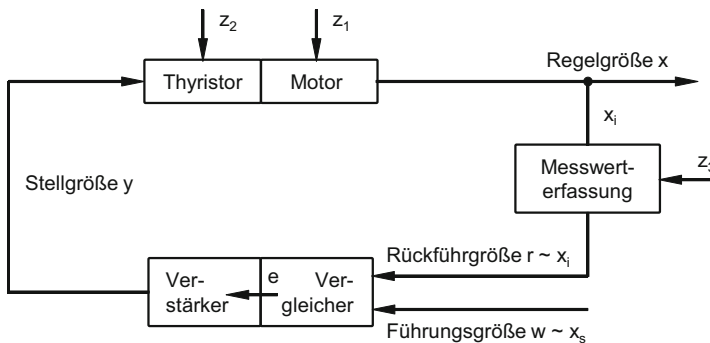


Bild 1.6 Wirkungsplan der Drehzahlregelung

Im Beispiel der Drehzahlregelung treten folgende Größen auf:

- Die Regelgröße x
ist die von der Regelung zu beeinflussende Größe. Sie hat immer einen tatsächlichen Istwert x_i . Die Regelgröße x ist die Ausgangsgröße des Regelkreises.
- Die Rückführgröße r
geht aus der Messung der Regelgröße hervor. Sie entspricht dem Istwert x_i .

$$r \sim x_i$$

- Die Führungsgröße w
ist die Eingangsgröße des Regelkreises. Sie entspricht dem geforderten Sollwert x_s .

$$w \sim x_s$$

Bleibt die Führungsgröße über einen längeren Zeitraum konstant, handelt es sich um eine **Festwertregelung**.

Eine **Folgeregelung** besitzt dagegen einen Sollwert, der laufend verändert wird. So eine Regelung liegt bei einer lastabhängigen Drehzahlregelung einer Aufzugsteuerung vor.

- Die Regeldifferenz e
(e – engl. error) ergibt sich aus der Differenz von Führungsgröße und Rückführgröße. Sie wird durch einen Vergleich gebildet und ist damit die eigentliche Eingangsgröße für den Regler.

$$e = w - r$$

- Die Stellgröße y
überträgt die Wirkung des Reglers auf das zu beeinflussende Objekt.
- Die Störgröße z
beeinflusst die Regelgröße in unerwünschter Weise. Sie ist eine weitere Eingangsgröße des Regelkreises.

1.1.3 Die Regelkreisglieder

Im Wirkungsplan der Drehzahlregelung im Bild 1.6 ist zu erkennen, dass sich der Regelkreis in drei wesentliche Bestandteile zerlegen lässt.

Die Messeinrichtung: Die Messeinrichtung dient der Erfassung der Regelgröße x und der Umformung in ein Ausgangssignal, das sich im Regelkreis weiterverarbeiten lässt.

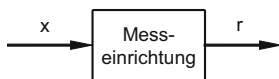


Bild 1.7 Die Messeinrichtung als Regelkreisglied

Die Messwerterfassung hat damit zwei Aufgaben:

Zum einen dient sie zur Aufnahme der Messgröße und zur Umwandlung in ein für den Regler nutzbares Signal. Dabei wird eine Reihe von physikalischen Effekten genutzt. Diese Aufgabe übernimmt ein Sensor oder Messfühler. In der Elektrotechnik unterscheidet man je nach Wahl des betreffenden Fühlers aktive und passive Sensoren. Aktive Sensoren wandeln die nichtelektrische Energie am Eingang in elektrische Energie um. Passive Sensoren ändern dagegen beim Auftreten der Messgröße ihre elektrische Eigenschaft. Hierbei ist elektrische Hilfsenergie notwendig.

Tabelle 1.1 Beispiele für Messwertaufnehmer

Zu messende Größe	Messwertaufnehmer
Drehzahl	Tachogenerator, Inkremental-Drehgeber
Drehmoment	Dehnungsmessstreifen, magnetoelastische Aufnehmer
Weg, Winkel	induktive und kapazitive Aufnehmer, Ultraschallsensoren, optische Aufnehmer
Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer (Metall, PTC und NTC)
Kraft, Druck	Dehnungsmessstreifen, Piezosensor
Strom	Nebenwiderstand, Stromwandler

Zum anderen soll die Messwerterfassung ein Signal erzeugen, das sich gut weiterverarbeiten lässt. In der Analogtechnik wurden dafür Normpegel festgelegt. Hier ist das Ausgangssignal häufig sehr klein. Dann muss es mithilfe eines Umformers auf einen normierten Wert, das Einheitssignal, verstärkt werden.

Wird als Einheitssignal eine Gleichspannung verwendet, liegt der Wertebereich zwischen 0 und 10V. Muss mit eingestreuten Störsignalen gerechnet werden, ist die Verwendung eines Gleichstromes als Einheitssignal sinnvoll. Hier sind zwei Messbereiche möglich. Entweder

kann der Bereich von 0 bis 20 mA oder von 4 bis 20 mA gewählt werden. Der zweite Bereich mit dem lebenden Nullpunkt bietet die Möglichkeit eine Funktionsstörung bei 0 mA sofort zu erkennen. Ist eine große Entfernung durch lange Leitungen zu überbrücken, wird das Ergebnis durch den eingepprägten Strom auch nicht durch einen Spannungsfall auf der langen Leitung verfälscht.

Beispiel 1.1

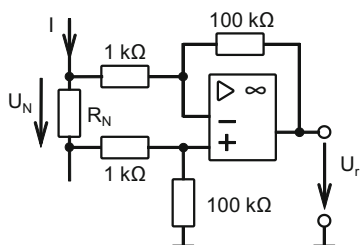


Bild 1.8 Strommessung

Im Bild 1.8 ist eine Strommessung durch einen Nebenwiderstand mit einem Messverstärker realisiert. Welcher Zusammenhang ergibt sich zwischen der zu erfassenden Größe und der Rückführgröße?

Lösung 1.1

Der Strom ruft am Nebenwiderstand einen Spannungsfall hervor.

$$U_N = I \cdot R_N \quad (1)$$

Dieser Spannungsfall ist gerade die Differenzeingangsspannung für den als Differenzverstärker beschalteten Operationsverstärker.

$$U_a = -\frac{R_f}{R_e} \cdot U_{\text{diff}} \rightarrow U_r = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \cdot U_N$$

Mit der Gleichung (1) ergibt sich der Zusammenhang zwischen der aufgenommenen und der weiterzuverarbeitenden Größe.

$$U_r = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \cdot I \cdot R_N \rightarrow U_r = -100 R_N \cdot I$$

■

Die Regeleinrichtung: Die Regeleinrichtung hat zwei Aufgaben im Regelkreis.

Hier erfolgt der Vergleich zwischen Soll- und Istwert. Die Eingangsgrößen sind die Führungsgröße w und die Rückführgröße r . Die so gewonnene Regeldifferenz e wird anschließend auf einen für ein gutes Regelverhalten sinnvollen Wert verstärkt. Die Ausgangsgröße ist die Stellgröße y .

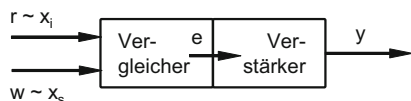
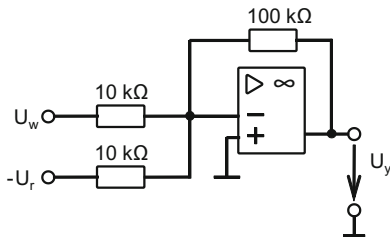


Bild 1.9 Die Regeleinrichtung als Regelkreisglied

Beispiel 1.2**Bild 1.10** Operationsverstärker als Regeleinrichtung

Geben Sie den Zusammenhang zwischen der Ausgangsgröße und den Eingangsgrößen an.

Lösung 1.2

Für den abgebildeten Summiervverstärker aus dem Bild 1.10 lässt sich die Ausgangsspannung wie folgt berechnen.

$$U_a = - \left(\frac{R_f}{R_{e1}} \cdot U_{e1} + \frac{R_f}{R_{e2}} \cdot U_{e2} \right) \rightarrow U_y = - \frac{R_f}{R_e} (U_w - U_r)$$

Damit aus Führungs- und Rückführgröße die Differenz gebildet werden kann, muss eine dieser Größen immer invertiert am Eingang auftreten.

$$U_y = - \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} (U_w - U_r) \rightarrow U_y = -10 (U_w - U_r)$$

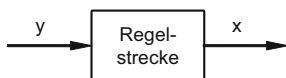
■

Dieses Beispiel gehört zu der Gruppe der stetigen Regler.

Bei **stetigen Regeleinrichtungen** kann die Ausgangsgröße, die Stellgröße y , im Stellbereich Y_h jeden beliebigen Wert annehmen. Die Regelgröße kann damit sehr genau auf einen bestimmten Sollwert eingestellt werden. Der Stellbereich wird durch die verwendete Regeleinrichtung bestimmt. Meist wird auch hier der Normpegel von 10 V gewählt.

Im Gegensatz dazu stehen die **unstetigen Regeleinrichtungen**, die nur wenige Zustände kennen. Ein Zweipunktregler liefert am Ausgang nur jeweils ein Signal für „Ein“ und „Aus“.

Die Regelstrecke: Die Regelstrecke kann in zwei Teile gegliedert werden. Die Eingangsgröße, die Stellgröße y , wird hier in die geforderte Regelgröße x umgeformt.

**Bild 1.11** Die Regelstrecke als Regelkreisglied

Die Regelstrecke ist der aufgabengemäß zu beeinflussende Teil des Regelkreises.

Bei dem Beispiel der Drehzahlregelung aus Bild 1.5 handelt es sich um den Motor. Er erzeugt durch die anliegende Spannung die Drehzahl.

Soll stattdessen die Temperatur in einem Kessel geregelt werden, stellen der Kessel und der benötigte Wärmetauscher die Strecke dar.

Am Eingang der Regelstrecke befindet sich das Stellglied. Es ist ein Bestandteil der Regelstrecke. Das Stellglied hat die Aufgabe, dem zu beeinflussenden Teil des Regelkreises die für die Regelaufgabe notwendige Energie zuzuführen. Liefert die Regeleinrichtung am Ausgang eine Stellgröße im Bereich von 0 bis 10 V, reicht das häufig nicht aus, um die gewünschte Regelgröße zu erzeugen.

Im Beispiel der Drehzahlregelung benötigt der Motor eine höhere Ankerspannung. Hier muss das Stellglied eine Verstärkung bewirken.

Wird die Temperaturregelung betrachtet, würde die Stellgröße allein keine Temperaturänderung erzielen. Hier könnte die Stellgröße auf ein Ventil wirken, das die benötigte Menge an Heizdampf zur Verfügung stellt. In diesem Beispiel liefert das Stellglied auch eine andere Art der Energie.

■ 1.2 Darstellung von Regelkreisen

Ein Regelkreis kann aus vielen Geräten und Baugruppen bestehen. Zur übersichtlichen Darstellung wählt man dazu einen Wirkungsplan. Dabei handelt es sich um die symbolische Darstellung der Wirkungsabläufe in einzelnen Blöcken, die durch Wirkungslinien miteinander verbunden werden.

1.2.1 Das Übertragungsglied

Jede Komponente des Regelkreises wird als Übertragungsglied betrachtet. Die Darstellung erfolgt als Rechteck, an dem die Beziehung zwischen Ein- und Ausgang angegeben werden kann. Ein- und Ausgangsgröße werden als Pfeil in der Signalflussrichtung gezeichnet.

Im Bild 1.12 ist der Übertragungsfaktor oder Übertragungsbeiwert K angefügt. Der Übertragungsbeiwert gibt an, welche Änderung die Ausgangsgröße eines Übertragungsglieds bei Variation der Eingangsgröße erfährt.

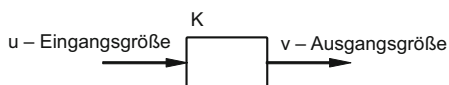


Bild 1.12 Das Übertragungsglied

Die Darstellung und die Bezeichnungen entsprechen der zuständigen DIN EN 60027-6 (Steuerung- und Regelungstechnik) und DIN IEC 60050-351 (Leittechnik).

Verschiedene Übertragungsglieder können unterschiedliche Verhalten aufweisen.

Als Beispiel wird der Spannungsteiler aus dem Bild 1.13 betrachtet. Er dient zur Anpassung von hohen Spannungen.

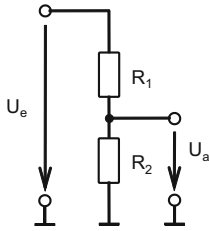


Bild 1.13 Spannungsteiler

Werden in einem Diagramm für verschiedene Eingangsspannungen die Teilspannungen aufgetragen, entsteht folgendes Bild 1.14.

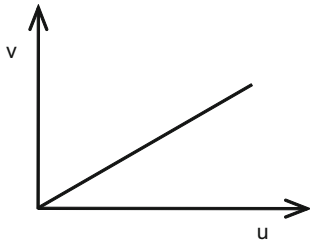


Bild 1.14 Kennlinie für ein lineares Übertragungsglied

Hier entsteht ein fester Zusammenhang zwischen Aus- und Eingang. Das Ergebnis ist eine Gerade, eine lineare Funktion. Es handelt sich hier um ein **lineares Übertragungsverhalten**. Dafür kann an jeder Stelle der gleiche Übertragungsfaktor berechnet werden.

$$K = \frac{v}{u} = \text{konstant}$$

Wird als Beispiel stattdessen eine Raumheizung gewählt, ändert sich der Zusammenhang im Diagramm wie im Bild 1.15 dargestellt.

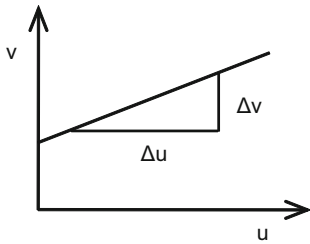


Bild 1.15 Lineares Übertragungsverhalten

Auch wenn noch keine Eingangsgröße u wirksam ist, ist schon eine Anfangstemperatur messbar. Wird angenommen, dass bei halber Ventilöffnung die Hälfte der maximalen Temperaturerhöhung erzielt wird, ist der Zusammenhang wieder linear. Zur Beschreibung müssen dann die Änderungen von Aus- und Eingangsgrößen betrachtet werden.

$$K = \frac{\Delta v}{\Delta u} = \text{konstant}$$

Beispiel 1.3

Für einen Motor ist bekannt, dass er bei einer anliegenden Spannung von 400V mit einer Drehzahl von 1200 min^{-1} läuft. Stellen Sie den Motor als Übertragungsglied dar.

Lösung 1.3

1. Schritt: Festlegung von Ein- und Ausgangsgröße

$$x_e = u = 400 \text{ V} \quad x_a = v = 1200 \text{ min}^{-1}$$

2. Schritt: Bestimmung des Übertragungsfaktors

Da hier nur ein Betriebspunkt bekannt ist, muss vorausgesetzt werden, dass es sich um einen linearen Übertragungsfaktor handelt, der sich direkt berechnen lässt.

$$K = \frac{v}{u} = \frac{1200 \text{ min}^{-1}}{400 \text{ V}} = 3 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$$

Der Übertragungsfaktor behält hier seine Einheit. Dadurch kann direkt der Einfluss der Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße abgelesen werden.

3. Schritt: Darstellung des Übertragungsgliedes

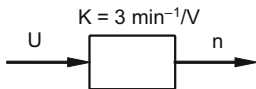


Bild 1.16 Der Motor als Übertragungsglied

Als Beispiel soll nun eine Erregerwicklung für eine Gleichstrommaschine dienen. Der Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße, dem Erregerstrom, und der Ausgangsgröße, der magnetischen Flussdichte, gleicht dem Verlauf einer Magnetisierungskennlinie wie im Bild 1.17. Offensichtlich handelt es sich um ein **nichtlineares Übertragungsverhalten**.

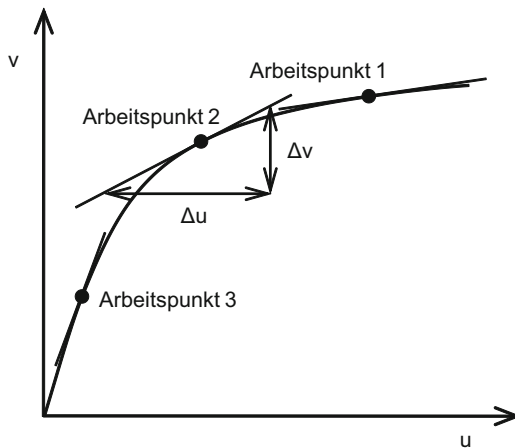


Bild 1.17 Nichtlineares Übertragungsverhalten

In unterschiedlichen Arbeitspunkten ist die Steigung der Kurve, und damit die Änderung am Ausgang unterschiedlich. Dadurch ergibt sich ein dynamischer Übertragungsfaktor. Er bestimmt den Anstieg im jeweiligen Arbeitspunkt.

$$K_{\text{dyn}} = \frac{\Delta v}{\Delta u} \neq \text{konstant}$$

Am Beispiel 1.3 wird deutlich, dass Übertragungsfaktoren Einheiten tragen, wenn am Ein- und Ausgang unterschiedliche physikalische Größen auftreten. Diese Einheiten können vermieden

werden, wenn die Größen auf einen Nennwert oder den Maximalwert mit derselben Dimension bezogen werden.

$$\Delta u \rightarrow \frac{\Delta u}{u_N} \quad \Delta v \rightarrow \frac{\Delta v}{v_N} \quad K = \frac{\Delta v}{\Delta u} \rightarrow K^* = \frac{\Delta v / v_N}{\Delta u / u_N}$$

Damit ergibt sich der normierte Übertragungsfaktor

$$K^* = \frac{\Delta v}{v_N} \cdot \frac{u_N}{\Delta u} = K \cdot \frac{u_N}{v_N}$$

Der Übertragungsfaktor

Übertragungsfaktor für lineares Verhalten

$$K = \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (1.1)$$

Dynamischer Übertragungsfaktor für nichtlineares Übertragungsverhalten im Arbeitspunkt

$$K_{\text{dyn}} = \frac{\Delta v}{\Delta u} \quad (1.2)$$

Normierter Übertragungsfaktor

$$K^* = \frac{\Delta v}{v_N} \cdot \frac{u_N}{\Delta u} = K \cdot \frac{u_N}{v_N} \quad (1.3)$$

Werden mehrere Übertragungsglieder betrachtet, dann werden sie durch Wirkungslinien wie im Bild 1.18 miteinander verbunden. Die Wirkungslinien zeigen die Signalfflussrichtung an und müssen mit einem Richtungspfeil versehen werden.

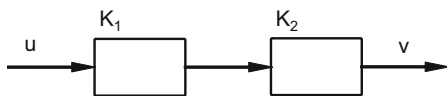


Bild 1.18 Reihenschaltung von Übertragungsgliedern

Wird das gleiche Eingangssignal an mehreren Übertragungsgliedern benötigt, verzweigt sich die Wirkungslinie wie im Bild 1.19.

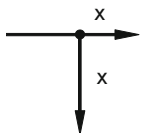


Bild 1.19 Die Verzweigungsstelle

Im Gegensatz dazu dient die Additionsstelle zur Überlagerung mehrerer Signale. Soll ein Vergleich durchgeführt werden, muss ein Signal mit einem negativen Vorzeichen auf die Vergleichsstelle treffen. Dazu sind die beiden Darstellungsformen wie im Bild 1.20 üblich.

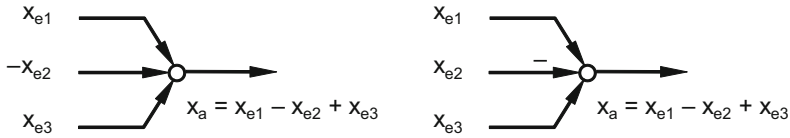


Bild 1.20 Die Additionsstelle

Beispiel 1.4

Der Operationsverstärker aus Bild 1.21 wird als Regeleinrichtung verwendet. Zeichnen Sie den Wirkungsplan und berechnen Sie die Ausgangsgröße.

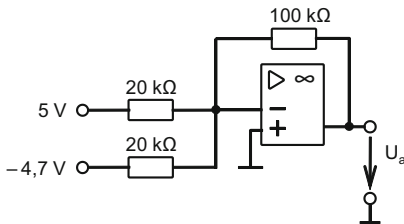


Bild 1.21 Operationsverstärker als Regeleinrichtung

Lösung 1.4

1. Schritt: Der Wirkungsplan

Der Operationsverstärker ist als Summierer beschaltet. Eine Eingangsgröße ist invertiert. Für den Wirkungsplan werden also eine Vergleichsstelle und ein Übertragungsglied für die Verstärkung benötigt. Unter Verwendung der regelungstechnischen Größen folgt der Wirkungsplan aus Bild 1.22.

Der Übertragungsfaktor:

$$K_R = \frac{R_f}{R_e} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} = 5$$

Bei der Berechnung des Übertragungsfaktors für den Wirkungsplan wird das, durch den Invertierer verursachte, Vorzeichen nicht mitgeführt.

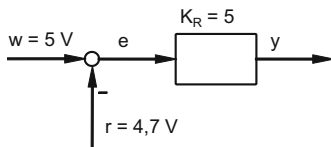


Bild 1.22 Der Wirkungsplan

2. Schritt: Berechnung der Ausgangsgröße

Die Ausgangsgröße ergibt sich durch Berechnung im Wirkungsplan.

$$e = w - r$$

$$e = 5 \text{ V} - 4,7 \text{ V} = 0,3 \text{ V}$$

$$K_R = \frac{v}{u} = \frac{y}{e}$$

$$y = e \cdot K_R = 0,3 \text{ V} \cdot 5 = 1,5 \text{ V}$$

1.2.2 Der elementare Regelkreis

Für die Untersuchung eines Regelkreises ist die Darstellung als Wirkungsplan notwendig. Dazu ist die folgende Vorgehensweise sinnvoll:

- Anordnung der einzelnen Übertragungsglieder
- Festlegung der Verzweigungs- und Additionsstellen
- Bestimmung der einzelnen Übertragungsfaktoren

Beispiel 1.5

Entwerfen Sie von der abgebildeten Stromregelung aus dem Bild 1.23 den Wirkungsplan.

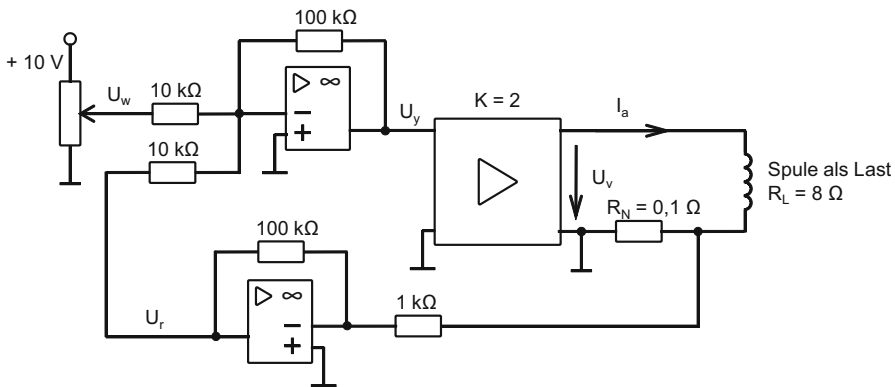


Bild 1.23 Stromregelung

Lösung 1.5

1. Schritt: Festlegung der Regelgröße

Bei dieser Aufgabe handelt es sich um eine Stromregelung. Die Regelgröße ist der Strom I_a .

2. Schritt: Wie wird die Messwerterfassung realisiert?

Der Strom wird in eine Spannung umgewandelt, dazu wurde der Stromkreis um einen Nebenwiderstand R_N erweitert. Es entsteht ein Spannungsfall U_N .

$$u = I_a \quad v = U_N \quad K = \frac{v}{u}$$

$$K_{M1} = \frac{U_N}{I_a} = R_N \quad K_{M1} = 0,1 \Omega \quad (1)$$

Der Spannungsfall U_N ist die Eingangsgröße für den Messverstärker. Der invertierende Verstärker erzeugt die Rückführgröße U_r .

$$u = U_N \quad v = U_r \quad K = \frac{v}{u}$$

$$K_{M2} = \frac{R_f}{R_e} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \quad K_{M2} = 100 \quad (2)$$

3. Schritt: Wie wird die Regeleinrichtung ausgeführt?

Die Regeleinrichtung besteht hier aus einem invertierenden Operationsverstärker, der als Summierer beschaltet ist.

$$u = U_w - U_r \quad v = U_y \quad K = \frac{v}{u}$$

$$K_R = \frac{R_f}{R_e} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \quad K_R = 10 \quad (3)$$

4. Schritt: Woraus setzt sich die Regelstrecke zusammen?

Am Eingang der Regelstrecke liegt das Stellglied. Das ist ein Verstärker, der die Spannung auch invertieren muss.

$$K_{S1} = 2 \quad (4)$$

Da die Ausgangsgröße ein Strom ist, lässt sich der Übertragungsfaktor durch das ohmsche Gesetz bestimmen. Mit einzubeziehen sind alle Widerstände, die den Strom begrenzen.

$$u = U_v \quad v = I_a \quad K = \frac{v}{u}$$

$$K_{S2} = \frac{I_a}{U_v} = \frac{1}{R_L + R_N} = \frac{1}{8 \Omega + 0,1 \Omega} \quad K_{S2} = \frac{1}{8,1 \Omega} \quad (5)$$

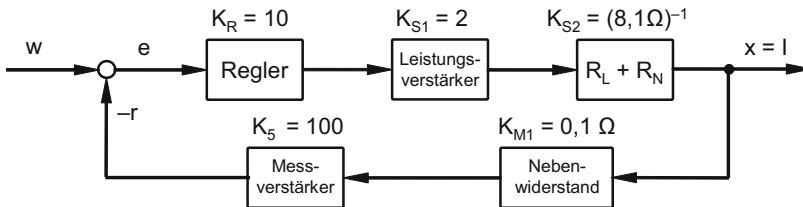
5. Schritt: Mit den bestimmten Größen kann der Signalflussplan gezeichnet werden.

Bild 1.24 Wirkungsplan für die Stromregelung

Am Wirkungsplan aus Bild 1.24 ist zu erkennen, dass es sich hier im Vorwärtszweig und in der Rückführung jeweils um eine Reihenschaltung handelt. In anderen Beispielen könnte das Ergebnis auch eine Parallelschaltung beinhalten. Manchmal ist es notwendig, den Wirkungsplan zu verändern, Additionsstellen und Verzweigungsstellen zu verlegen und Rückführungen zusammenzufassen. Damit wird es möglich, einen übersichtlichen Wirkungsplan zu erstellen, der nur noch aus den wesentlichen Bestandteilen besteht.

Es gelten die folgenden Regeln für die **Vereinfachung von Wirkungsplänen**:

Regel 1: Reihenschaltung

$$K_1 = \frac{x_{a1}}{x_e}$$

$$x_{a1} = K_1 \cdot x_e$$

$$K_2 = \frac{x_{a2}}{x_{a1}}$$

$$x_{a2} = K_2 \cdot x_{a1} = K_1 \cdot K_2 \cdot x_e$$

$$K_3 = \frac{x_a}{x_{a2}}$$

$$x_a = K_3 \cdot x_{a2} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot x_e$$

$$K = \frac{x_a}{x_e}$$

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

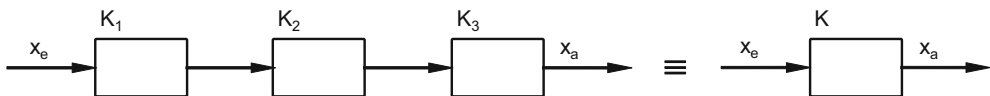


Bild 1.25 Reihenschaltung

Regel 2: Parallelschaltung

$$K_1 = \frac{x_{a1}}{x_e}$$

$$x_{a1} = K_1 \cdot x_e$$

$$K_2 = \frac{x_{a2}}{x_e}$$

$$x_{a2} = K_2 \cdot x_e$$

$$x_a = x_{a1} + x_{a2} = K_1 \cdot x_e + K_2 \cdot x_e$$

$$x_a = x_e \cdot (K_1 + K_2)$$

$$K = \frac{x_a}{x_e}$$

$$K = K_1 + K_2$$

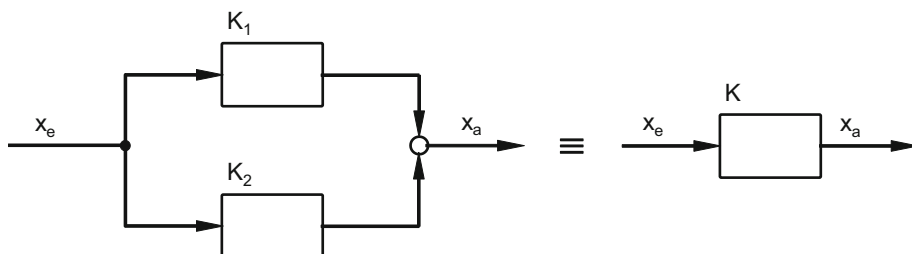


Bild 1.26 Parallelschaltung

Regel 3: Verlegung einer Additionsstelle hinter das Übertragungsglied

$$K = \frac{x_a}{x_e}$$

$$x_e = x_{e1} + x_{e2}$$

$$K = \frac{x_a}{x_{e1} + x_{e2}}$$

$$K = \frac{x_{a1}}{x_{e1}} \quad K = \frac{x_{a2}}{x_{e2}}$$

$$x_a = x_{a1} + x_{a2}$$

$$x_a = K \cdot x_{e1} + K \cdot x_{e2}$$

$$K = \frac{x_a}{x_{e1} + x_{e2}}$$

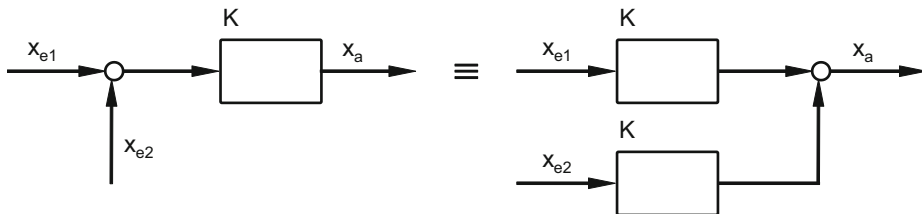


Bild 1.27 Verlegung einer Additionsstelle hinter das Übertragungsglied

Regel 4: Verlegung einer Additionsstelle vor das Übertragungsglied

$$K = \frac{x_{a1}}{x_{e1}}$$

$$x_{a1} = K \cdot x_{e1}$$

$$x_a = x_{a1} + x_{e2}$$

$$x_a = K \cdot x_{e1} + x_{e2}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{x_{a2}}{x_{e2}}$$

$$x_{a2} = \frac{1}{K} \cdot x_{e2}$$

$$x_e = x_{e1} + x_{a2}$$

$$x_a = K \cdot x_e$$

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

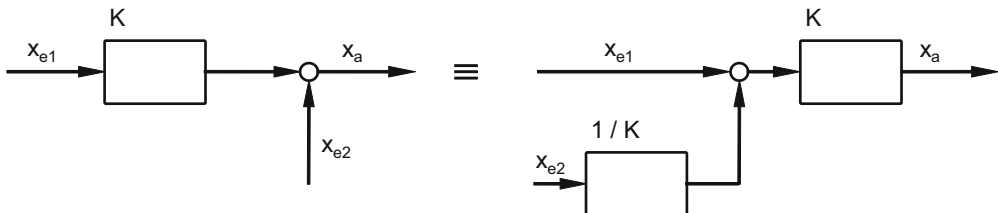


Bild 1.28 Verlegung einer Additionsstelle vor das Übertragungsglied

Regel 5: Verlegung einer Verzweigungsstelle hinter das Übertragungsglied

$$K = \frac{x_a}{x_e}$$

$$x_a = K \cdot x_e$$

$$\frac{1}{K} = \frac{x_e}{x_a}$$

$$x_a = K \cdot x_e$$

$$x_e = \frac{x_a}{K} = \frac{\cancel{K} \cdot x_e}{\cancel{K}}$$

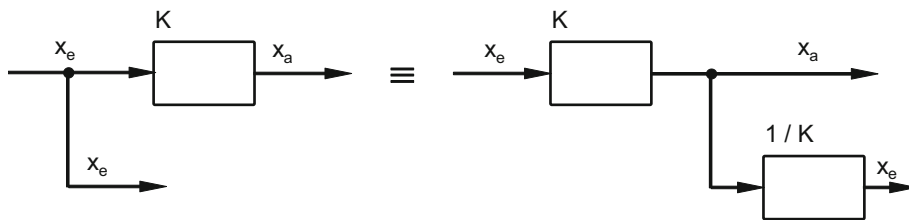


Bild 1.29 Verlegung einer Verzweigungsstelle hinter das Übertragungsglied

Regel 6: Verlegung einer Verzweigungsstelle vor das Übertragungsglied

$$K = \frac{x_a}{x_e}$$

$$K = \frac{x_a}{x_e}$$

$$x_a = K \cdot x_e$$

$$x_a = K \cdot x_e$$

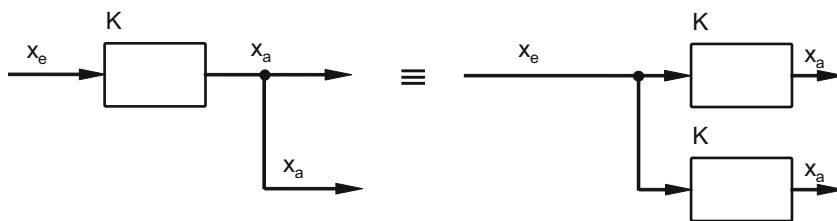


Bild 1.30 Verlegung einer Verzweigungsstelle vor das Übertragungsglied

Regel 7: Beseitigung einer Rückführung

$$K_1 = \frac{x_a}{x_e - x_{a2}}$$

$$K_2 = \frac{x_{a2}}{x_a}$$

$$x_a = K_1 (x_e - x_{a2})$$

$$x_{a2} = K_2 \cdot x_a$$