



Leseprobe

Hans-Werner Philippsen

Einstieg in die Regelungstechnik

Vorgehensmodell für den praktischen Reglerentwurf

ISBN (Buch): 978-3-446-43261-1

ISBN (E-Book): 978-3-446-44394-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43261-1>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur zweiten Auflage

Die vorliegende zweite Auflage wendet sich an Bachelor-Studierende ingenieurwissenschaftlicher Studiengänge, die das Fach Regelungstechnik als Pflicht- oder Wahlmodul studieren. Darüber hinaus wurde das Buch für den praktisch tätigen Ingenieur konzipiert. Ziel ist es, einen praxisnahen und einfachen Einstieg in die Regelungstechnik zu ermöglichen. Aus diesem Grunde wurden weitere Beispiele hinzugefügt, Kapitel neu geordnet, Zeichnungen erneuert und an einigen Stellen der Text überarbeitet sowie Fehler korrigiert.

Als roter Faden des Buches dient das Vorgehensmodell Reglerentwurf, das an den Beginn gestellt wurde. Mit dem Vorgehensmodell und mit Hilfe einer Checkliste wird der Leser durch das Fachgebiet geführt, wobei das Lernen und die praktische Anwendung des Wissens gefördert werden. Zur weiteren Vorbereitung auf eine erfolgreiche Berufspraxis wurde ein Kapitel über die Projektierung technischer Regelungen aufgenommen. Die im Rahmen dieses Buches häufige Verwendung von Wirkungsplänen dient der vereinfachten Darstellung abstrakter Zusammenhänge.

Die Regelungstechnik ist ein Fachgebiet mit einer sehr langen Geschichte. Seit den ersten industriellen Anwendungen im 18. Jahrhundert und den ersten theoretischen Arbeiten Mitte des 19. Jahrhunderts kann bis heute eine reichhaltige Entwicklung festgestellt werden. Aus diesem Grunde haben Fachbücher der Regelungstechnik oft einen erheblichen Umfang und sind durch einen großen mathematischen Anteil geprägt. Ein Lehrbuch Regelungstechnik sollte m. E. die Studierenden in die Lage versetzen, möglichst schnell mit einfachen Mitteln ausgehend vom Prozess zum eingestellten Regler zu kommen. Im Rahmen eines Einstiegs in das Fachgebiet kann nicht die gesamte Breite des Stoffes theoretisch untermauert werden. Das ist für eine erfolgreiche praktische Tätigkeit auch nicht erforderlich, da die meisten technischen Regelungen ohne großen mathematischen Aufwand realisierbar sind.

Ich danke Frau Jacob, Frau Kaufmann und Frau Werner vom Hanser Verlag für die sehr gute Zusammenarbeit.

Viel Erfolg bei der Erarbeitung des Fachgebietes!

Hans-Werner Philippsen

Bremen, im Februar 2015

URL der Internetseite mit weiteren Informationen und Videos regelungstechnischer Projekte: www.informatik.hs-bremen.de/regelungstechnik/

Inhalt

1	Einführung	13
1.1	Das Prinzip der Steuerung	14
1.2	Das Prinzip der Regelung	14
1.3	Signale und Komponenten des Regelkreises	15
1.4	Klassifikation von Regelungen	16
1.5	Regelungsstrategien	17
1.6	„Günstige“ Einstellung eines Reglers	19
1.7	Vereinfachtes Vorgehensmodell Reglerentwurf	22
2	Mathematische Modelle	27
2.1	Der Wirkungsplan	27
2.2	Elementare Übertragungsglieder	28
2.2.1	Proportionalglied (P-Glied)	29
2.2.2	Integrierendes Glied (I-Glied)	30
2.2.3	Differenzierendes Glied (D-Glied)	32
2.2.4	Totzeitglied (T_t -Glied)	33
2.3	Wirkungsplan – Elemente der Elektrotechnik	35
2.4	Statisches Übertragungsverhalten	38
2.4.1	Statische Kennlinien linearer und nicht linearer Übertragungsglieder	42
2.4.2	Statisches Verhalten von Regelkreisen	44
2.5	Dynamisches Verhalten linearer Übertragungsglieder	45
2.5.1	Beschreibung des dynamischen Verhaltens durch Differenzialgleichungen	49
2.5.1.1	Lösung der Differenzialgleichung mit Hilfe eines Simulators	49
2.5.1.2	Analytische Lösung einer DGL bei sprunghafter Änderung des Eingangs	50
2.5.1.3	Lösung der Differenzialgleichung mit Hilfe der Laplace-Transformation	52
2.5.2	Regeln für das Rechnen mit Übertragungsfunktionen	56
2.5.3	Anfangswert- und Endwertsätze	58
2.5.4	Frequenzgang	62
2.5.4.1	Berechnung und Messung des Frequenzgangs	62
2.5.4.2	Darstellung des Frequenzgangs in der Ortskurve	65
2.5.4.3	Darstellung des Frequenzgangs im Bode-Diagramm ...	67
2.6	Mathematische Signalmodelle	69

2.7	Klassifikation von Regelstrecken	70
2.7.1	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P-T ₁ -Glied)	71
2.7.2	Verzögerungsglied n-ter Ordnung (P-T _n -Glied)	72
2.7.3	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P-T ₂ -Glied)	76
2.7.4	Das allgemeine rationale Übertragungsglied	82
2.7.5	Totzeit-Strecke mit Verzögerung	84
2.7.6	Integrale Strecke mit Verzögerung (I-T ₁ -Glied)	85
2.7.7	Strecke ohne Ausgleich: Beispiel Fahrzeuglenkung	86
2.7.8	Strecke mit Ausgleich: Beispiel DC-Motor	91
2.7.9	Nicht lineare Strecke mit Ausgleich: Beispiel Fahrzeug	97
2.7.10	Nicht lineare Strecke mit Ausgleich: Beispiel Tiefsetzsteller	100
2.8	Zustandsraumbeschreibung	103
2.8.1	Einführung Zustandsraum	103
2.8.2	Ähnlichkeitstransformation	110
3	PID-Regler	115
3.1	PI-Regler	115
3.2	PD-Regler	118
3.3	PD-T ₁ -Regler	120
3.4	PID-Regler	122
3.5	PID-T ₁ -Regler	123
3.6	Industrielle PID-Regler	125
3.6.1	Kompaktregler	125
3.6.2	Regler-Software-Baustein	128
4	Reglerentwurf	133
4.1	Stationäres Regelkreisverhalten	134
4.2	Dynamisches Regelkreisverhalten	140
4.3	Stabilität	142
4.4	Frequenzkennlinienverfahren	150
4.5	Kompensationsreglerentwurf	153
4.6	Entwurfsverfahren für PID-Regler	154
4.6.1	PID-Kompensationsregler	154
4.6.2	Das Betragsoptimum	157
4.6.3	Einstellregel nach Ziegler und Nichols	160
4.6.4	T-Summen-Einstellregel	161
4.6.5	Einstellregel von Chien, Hrones und Reswick	163
5	Besondere Strukturen der Regelungstechnik	167
5.1	Störgrößenaufschaltung	167
5.1.1	Statische Störgrößenkompensation	168
5.1.2	Dynamische Störgrößenkompensation	169
5.2	Kaskadenregler	170
5.3	Regelkreis mit Vorfilter und Vorsteuerung	173

5.4	Regler in der Rückführung	176
5.5	Entkopplung von Mehrgrößensystemen	177
5.6	Schaltende Regler	180
5.7	Zustandsregler	185
5.7.1	Struktur eines Zustandsreglers	185
5.7.2	Entwurf Zustandsregler	187
5.8	Beobachter	194
6	Digitale Regelungen	199
6.1	Analog-Digital-Wandlung	203
6.2	Signale des digitalen Regelkreises	206
6.3	Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs	207
6.3.1	Abtasttheorem von Shannon	207
6.3.2	Wahl der Abtastzeit	208
6.3.3	Abtast-Halteglied	209
6.4	Diskretisierung linearer Systeme	212
6.4.1	Diskretisierung P-T ₁ -Glied	213
6.4.2	Diskretisierung I-Glied	214
6.5	Diskretisierte Grundregler	215
6.5.1	Diskretisierter P-Regler	217
6.5.2	Diskretisierter I-Regler	217
6.5.3	Diskretisierter PI-Regler	218
6.5.4	Diskretisierter D-T ₁ -Regler	218
6.6	Regleralgorithmen	219
6.7	Z-Transformation	222
6.8	Z-Übertragungsfunktion	225
6.9	Stabilität zeitdiskreter Systeme	231
6.10	Bilineare Transformation	233
6.11	Entwurf digitaler Regler	236
7	Projektierung automatisierungstechnischer Systeme	243
7.1	Projektphasen bei der Abwicklung von PLT-Projekten	244
7.2	Verfahrensfließschema	246
7.3	EMSR-Stellen-Kreis	248
7.4	Wirkkette	252
7.5	Vorgehensmodell Reglerrealisierung	253
8	Aufgaben und Beispiele	257
8.1	Aufgaben	257
8.1.1	Rechnen mit Wirkungsplänen und Übertragungsfunktionen	257
8.1.2	Elektrische Netzwerke	258
8.1.3	Bestimmung von Kenngrößen	259
8.1.4	Berechnung der Sprungantwort	259
8.1.5	Verhalten von PID-Reglern	259

8.1.6	Berechnung von Regelkreisen	260
8.1.7	Reglerentwurf	260
8.1.8	Diskretisierung von Systemen	261
8.2	Beispiele	261
8.2.1	Temperaturregelstrecke	261
8.2.2	Drehzahlregelung Elektromotor	269
8.2.3	Pendel	274
8.3	Lösungen der Übungsaufgaben	278
A	Anhang A	283
A.1	Laplace-Korrespondenztabelle	283
A.2	Berechnung der Sprungantwort eines P-T ₂ -Gliedes	284
A.3	Bestimmung der Überschwingweite eines P-T ₂ -Gliedes	287
A.4	Reglerentwurf gemäß Betragsoptimum	289
A.5	Fuzzy-Logik	290
A.6	Formelzeichen	291
A.7	Abkürzungen	295
A.8	Checkliste	296
	Literatur	299
	Index	301

1. Anforderungen und technische Randbedingungen ermitteln



2. Ziele des Reglerentwurfs definieren



3. Modellbildung durchführen



4. Reglerstruktur festlegen und Reglerparameter bestimmen



5. Realisierung und Inbetriebnahme

Mathematische Modelle

Ermittlung der Randbedingungen für die Modellbildung (Arbeitspunkt, besondere Betriebszustände ...)

Festlegen der Testfälle

Theoretische Bestimmung und/oder messtechnische Aufnahme der statischen Kennlinie

Ermittlung des Stell- und Regelbereiches

Theoretische und/oder messtechnische Bestimmung des dynamischen Modells der Strecke

Klassifikation des dynamischen Verhaltens

2

Mathematische Modelle

Im ersten Kapitel wurde auf die Notwendigkeit der Modellbildung für einen erfolgreichen Reglerentwurf eingegangen. Die Modellbildung schafft ein Abbild der Wirklichkeit, wobei das Modell zunächst die zu regelnde Strecke betrifft. Ein Modell der Umgebung, d. h. der auf den Regelkreis einwirkenden Größen, vervollständigt die Modellbildung. Dabei handelt es sich um die Führungsgröße(n) und die Störgröße(n), die auch als Signale bezeichnet werden. Auf mathematische Signalmodelle wird im Abschnitt 2.6 eingegangen.

Im Folgenden steht die Modellierung von Regelstrecken bzw. von dynamischen Systemen im Mittelpunkt der Betrachtungen. Bestes Resultat einer Modellbildung stellt ein vollständiges mathematisches Modell dar, das sich sehr gut für den Entwurf eines Reglers eignet. Manchmal gelingt nur die grobe Modellierung der Regelstrecke. Trotzdem kann aufgrund einer groben Klassifikation der Strecke eine sinnvolle Auswahl des Reglertyps erfolgen. Ein Modell kann auf der Grundlage der Physik, Chemie, Biologie ... der Strecke erstellt werden oder auf der Grundlage von Messungen. Im ersten Fall spricht man von theoretischer Modellbildung, im zweiten von experimenteller Modellbildung. Im Rahmen einer Modellbildung hat sich die Anfertigung eines sogenannten Wirkungsplanes bewährt. Diese graphische Darstellung erleichtert das Verständnis der Vorgänge innerhalb der Strecke und des Regelkreises.

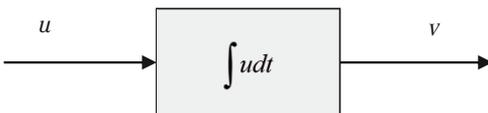
■ 2.1 Der Wirkungsplan

Ausgehend von einem Anlagenplan, Schaltplan oder Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (RI-Fließbild, siehe Kapitel 7) lassen sich die für die Regelungstechnik relevanten Wirkungen mit einem Wirkungsplan darstellen. Ein Wirkungsplan wird oft auch als **Signalflussplan** oder **Blockschaltplan** bezeichnet. Sind mathematische Zusammenhänge bekannt, sind diese vollständig mit einem Wirkungsplan darstellbar. Ein Wirkungsplan hat vier Elemente.

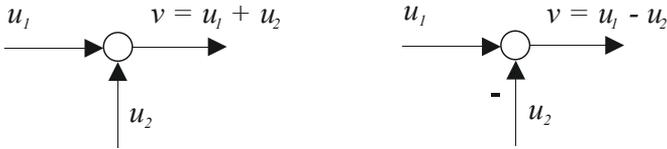
Die **Wirkungslinie** stellt den Weg einer Größe dar.



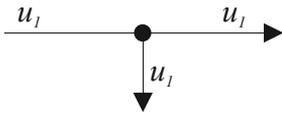
Der **Block** stellt ein System dar, wobei mehrere Ein- und Ausgangsgrößen möglich sind. Jeder Block im Wirkungsplan ist rückwirkungsfrei, d. h. die Ausgangsgröße hat keinen Einfluss auf die Eingangsgröße.



Die **Addition** bildet die Summe mehrerer Größen (Vorzeichen beachten!).



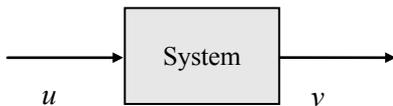
Die **Verzweigung** ist eine Stelle, von der aus ein und dieselbe Größe anderen Blöcken oder Additionen zur Verfügung gestellt wird.



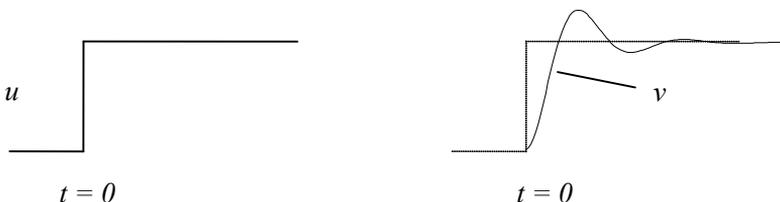
Die Größe teilt sich nicht in Anteile auf, sondern steht den folgenden Blöcken oder Additionen in vollem Umfang zur Verfügung. Die Verzweigungen eines Wirkungsplanes unterscheiden sich daher von z. B. elektrotechnischen Schaltplänen deutlich.

■ 2.2 Elementare Übertragungsglieder

Ein System mit Ein- und Ausgangsgrößen wird allgemein als **Übertragungsglied** bezeichnet.



Für stabile Systeme gilt: Ist die Eingangsgröße u konstant und beschränkt, dann ist auch die Ausgangsgröße v für $t \rightarrow \infty$ konstant und beschränkt. Die nachfolgende Sprungantwort zeigt beispielhaft ein stabiles Systemverhalten. Die Eingangsgröße ändert sich sprunghaft zum Zeitpunkt $t = 0$. Die Ausgangsgröße folgt der Eingangsgröße verzögert und mit einer abklingenden Schwingung. Die Reaktion der Ausgangsgröße auf einen Sprung wird als Sprungantwort bezeichnet.



Um die Sprungfunktion mathematisch beschreiben zu können, wurde die Einheitssprungfunktion $\sigma(t)$ definiert:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } t \geq 0 \\ 0 & \text{für } t < 0 \end{cases}$$

$\sigma(t)$ kann nur zwei Werte annehmen. Andere Sprunghöhen werden durch Multiplikation von $\sigma(t)$ mit einem Faktor realisiert. Nachfolgend werden elementare Übertragungsglieder vorgestellt, wobei die Erklärung einiger verwendeter Begriffe erst in späteren Kapiteln erfolgen kann. Die Begriffe Übertragungsfunktion und Übergangsfunktion werden im Abschnitt 2.5.1.3 bzw. 2.5 behandelt.

2.2.1 Proportionalglied (P-Glied)

Zeitgleichung	$v(t) = K_p u(t)$	Proportionalbeiwert K_p
Übertragungsfunktion	$G(s) = K_p$	
Frequenzgang	$G(j\omega) = K_p$	
Übergangsfunktion (Sprungantwort)	$h(t) = K_p \sigma(t)$	

Das Proportionalglied verzögert oder verformt das Eingangssignal nicht. $u(t)$ wird in Abhängigkeit von K_p verstärkt, wobei dies idealtypisch für alle Frequenzbereiche gilt. Ein elektronischer Verstärker ist ein Beispiel für ein P-Glied. Über einen großen Frequenzbereich (z. B. von 10 bis 20 kHz) erfolgt eine gleichmäßige Verstärkung. Der Frequenzgang des Verstärkers ist ein Maß für die Qualität. Ein mechanisches Beispiel ist ein Hebel, der im Bild 2.1 abgebildet ist. Die Ein- und Ausgangsgröße des Hebels kann der Weg oder die Kraft sein. Für kleine Winkeländerungen verhält sich der Hebel wie ein P-Glied. Ein Getriebe stellt ein weiteres mechanisches Beispiel für ein P-Glied dar. Der Proportionalbeiwert K_p kann eine Dimension aufweisen (siehe Beispiel Winkelgeber Bild 2.15). Die Blockdarstellung symbolisiert die Sprungantwort des P-Gliedes (Bild 2.2).

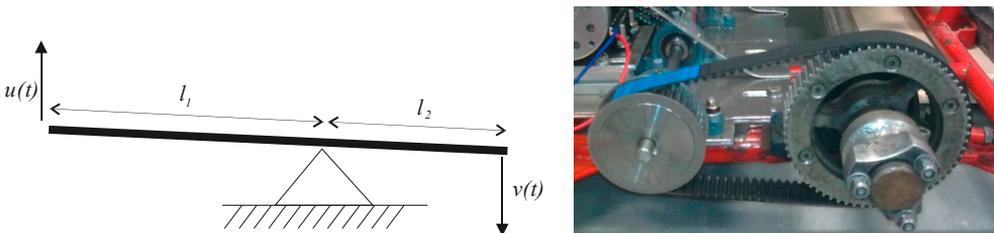


Bild 2.1 Hebel und Riemenscheibengetriebe als Beispiel für ein mechanisches P-Glied

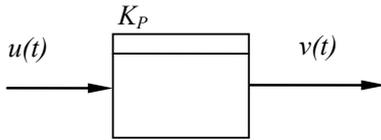


Bild 2.2 Blockdarstellung P-Glied

Betrachten wir den Betrag der Kraftwirkung am Hebel, ergibt sich ein Proportionalbeiwert bzw. eine Verstärkung von:

$$K_p = \frac{l_1}{l_2}$$

Die Wirkung des antreibenden Drehmomentes auf den Abtrieb des Getriebes in Bild 2.1 ist vom Übertragungsverhältnis $T_n = \frac{K_p}{K_i}$ abhängig, wobei r_2 der Radius der antreibenden Riemenscheibe ist. Mit

$$K_p = \frac{1}{ii}$$

kann der Proportionalbeiwert im Fall der Drehzahlübertragung des Getriebes angegeben werden.

2.2.2 Integrierendes Glied (I-Glied)

Zeitgleichung	$v(t) = K_i \int_0^t u(t) dt$	Integrierbeiwert K_i Integrationszeitkonstante $T_i = 1/K_i$ (wenn Dimension von u und v gleich)
Übertragungsfunktion	$G(s) = \frac{K_i}{s}$	$G(s) = \frac{1}{sT_i}$
Frequenzgang	$G(j\omega) = \frac{K_i}{j\omega}$	$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega T_i}$
Übergangsfunktion (Sprungantwort)	$h(t) = K_i t \sigma(t)$	$h(t) = \frac{t}{T_i} \sigma(t)$

Der Anfangswert $v(0)$ des Integrators ist zu beachten!

Ein Spindelantrieb (siehe Bild 2.3) weist ein integrales Verhalten auf, wobei die Eingangsgröße die Drehzahl $n(t)$ und die Position $x(t)$ die Ausgangsgröße ist. Der Integrierbeiwert wird durch die Steigung der Spindel bestimmt. Auf die Einheit von K_i ist ein besonderes Augenmerk zu richten, da die Angabe der Steigung üblicherweise in mm pro Umdrehung und die der Drehzahl in Umdrehungen pro Minute erfolgt.

$$x(t) = K_i \int_0^t n(t) dt$$

Der Schlitten verändert seine Position, wenn sich die Spindel dreht. Beim Stillstand hält der Schlitten die Position bei, er speichert den letzten Wert von $x(t)$.

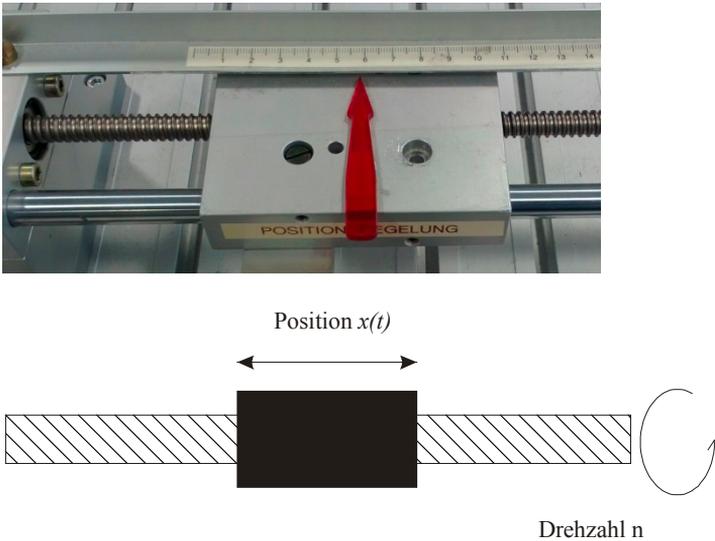


Bild 2.3 Spindeltrieb als Beispiel für ein I-Glied

Die Blockdarstellung des I-Gliedes wird durch die Sprungantwort gekennzeichnet (Bild 2.4).

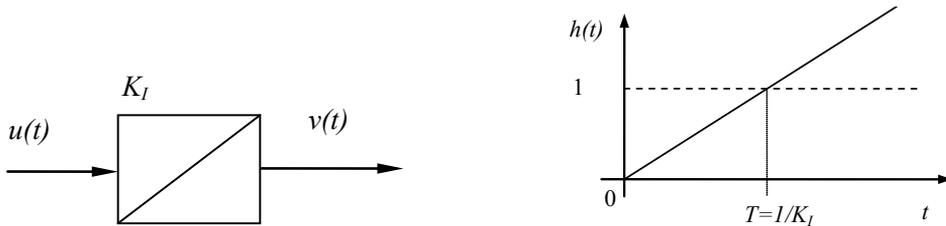


Bild 2.4 Blockdarstellung des Integrators und Sprungantwort

Ein weiteres Beispiel für ein integrierendes Glied stellt ein elektrischer Kondensator dar, wenn der Ladestrom als Eingangsgröße aufgefasst wird. Dann erfolgt die Berechnung der Ladespannung aus dem Integral des Ladestromes (siehe Tabelle 2.1). Ein Integrator weist für Signale mit hoher Frequenz eine große Dämpfung auf, wie das Bode-Diagramm des I-Gliedes im Bild 2.5 zeigt (Erläuterungen dazu im Abschnitt 2.5.4). Ausgehend vom

Frequenzgang $G(j\omega) = \frac{1}{j\omega T_I}$ des Integrators wird der Amplitudengang ermittelt:

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{1}{j\omega T_I} \right| = \frac{1}{\omega T_I} \quad |G(j\omega)|_{dB} = -20 \lg(\omega T_I) = 20 \lg(K_I) - 20 \lg(\omega)$$

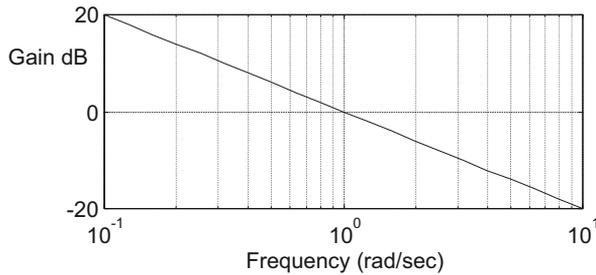


Bild 2.5 Bode-Diagramm des I-Gliedes

Der Amplitudengang fällt im Bode-Diagramm mit konstant 20 dB pro Dekade. Aufgrund des fehlenden Realteils von $G(j\omega)$ ist $\tan(\varphi) = \frac{\text{Im}(G)}{\text{Re}(G)} = -\infty$ und damit der Phasengang konstant $\varphi = \angle G(j\omega) = -90^\circ$

2.2.3 Differenzierendes Glied (D-Glied)

Zeitgleichung	$v(t) = K_D \frac{du(t)}{dt}$	Differenzierbeiwert K_D $T_D = K_D$ (wenn Dimension von u und v gleich)
Übertragungsfunktion	$G(s) = K_D s$	
Frequenzgang	$G(j\omega) = j\omega K_D$	
Übergangsfunktion (Sprungantwort)	$h(t) = K_D \delta(t)$	$\delta(t)$ Diracimpuls ∞ für $t = 0$ 0 für $t \neq 0$

Das D-Glied ist technisch nicht realisierbar, daher erfolgt stets eine Annäherung des D-Verhaltens. Ein Kondensator wirkt in der elektrotechnischen Schaltung gemäß Bild 2.6 wie ein Differenzierer bzw. differenzierendes Glied, da der Ladestrom der Ableitung der Ladenspannung proportional ist (siehe Tabelle 2.1). Bild 2.7 zeigt die Blockdarstellung und die Sprungantwort des Differenzierers.

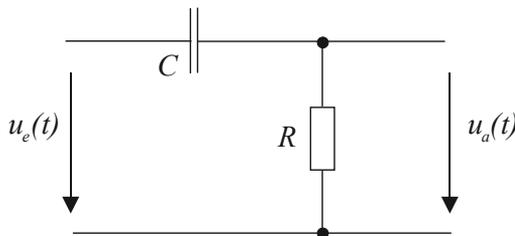


Bild 2.6 Wirkung Kondensator als D-Glied

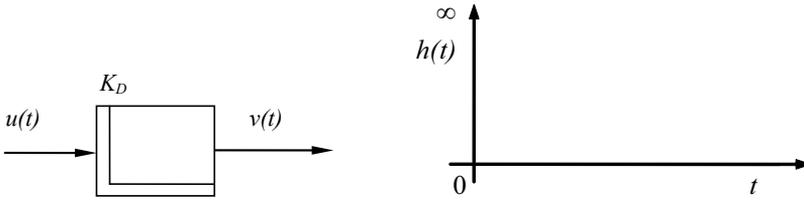


Bild 2.7 Blockdarstellung des Differenzierers und Sprungantwort

Das Bode-Diagramm des D-Gliedes (Bild 2.8) wird wie folgt berechnet: Ausgehend vom Frequenzgang $G(j\omega) = j\omega T_D$ des Differenzierers wird der Amplitudengang ermittelt:

$$|G(j\omega)| = |j\omega T_D| = \omega T_D \quad |G(j\omega)|_{dB} = 20 \lg(\omega T_D) = 20 \lg(T_D) + 20 \lg(\omega)$$

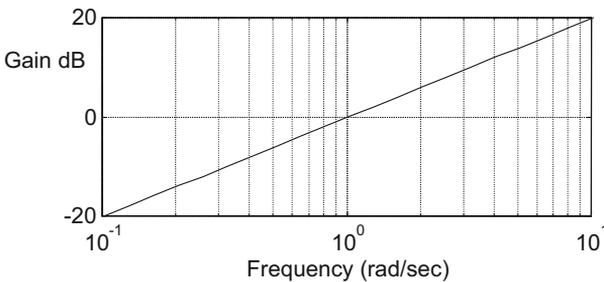


Bild 2.8 Bode-Diagramm des D-Gliedes

Der Amplitudengang steigt im Bode-Diagramm mit konstant 20 dB pro Dekade. Aufgrund des fehlenden Realteils von $G(j\omega)$ ist $\tan(\varphi) = \frac{\text{Im}(G)}{\text{Re}(G)} = +\infty$ und damit der Phasengang konstant $\varphi = \angle G(j\omega) = +90^\circ$

2.2.4 Totzeitglied (T_t -Glieder)

Zeitgleichung	$v(t) = u(t - T_t)$	Totzeit T_t
Übertragungsfunktion	$G(s) = e^{-sT_t}$	
Frequenzgang	$G(j\omega) = e^{-j\omega T_t}$	
Übergangsfunktion (Sprungantwort)	$h(t) = \sigma(t - T_t)$	

Die Blockdarstellung und Sprungantwort des T_t -Gliedes bzw. TZ-Gliedes werden im Bild 2.9 dargestellt. Transportvorgänge sind in der Regel ursächlich für ein Totzeitglied im Regelkreis. Ein Förderband benötigt für den Transport eines Gutes Zeit, die von der Drehzahl des Antriebs abhängig ist. Im Regelkreis wirken sich Totzeiten sehr ungünstig auf das Stabilitätsverhalten aus; siehe Abschnitt 4.3.

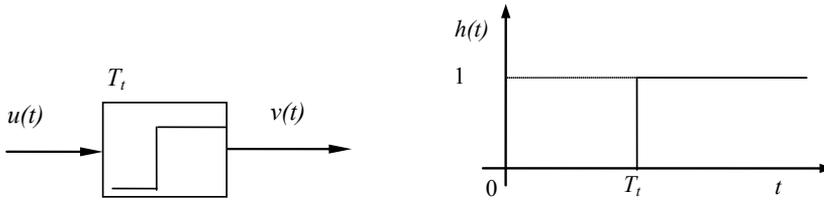


Bild 2.9 Blockdarstellung und Sprungantwort auf Einheitssprung des TZ-Gliedes

Berechnung des Bode-Diagramms des T_t -Gliedes: Der Frequenzgang $G(j\omega) = e^{-j\omega T_t}$ des Totzeitgliedes weist einen konstanten Amplitudengang auf, da:

$$|G(j\omega)| = |e^{-j\omega T_t}| = 1$$

Der Phasengang des Totzeitgliedes ist:

$$G(j\omega) = e^{-j\omega T_t} = \cos(\omega T_t) - j \sin(\omega T_t)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan\left(\frac{\sin(\omega T_t)}{\cos(\omega T_t)}\right) = -\arctan(\tan(\omega T_t))$$

$$\varphi(\omega) = -\omega T_t$$

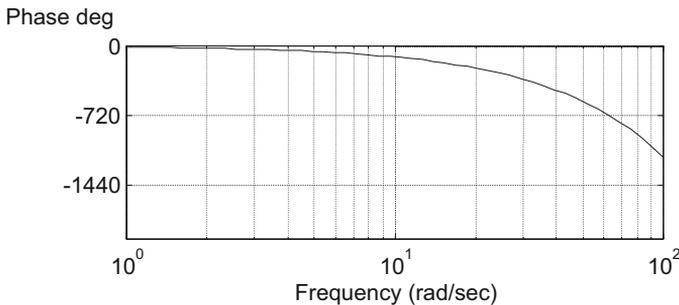


Bild 2.10 Bode-Diagramm des TZ-Gliedes

Das Diagramm im Bild 2.10 zeigt den Phasengang eines TZ-Gliedes mit $T_t = 0,2s$. Die Phasenverschiebung fällt mit der Frequenz.

Index

A

Abtast-Halteglied 210
Abtasttheorem von Shannon 207
Abtastzeit 208
Addition 28
AD-Wandler 199
Aktor 16, 200
allgemeines Übertragungsglied 82
Amplitudengang 67
Amplitudenreserve 149
Anfahrprozedur 43
Anfangswert 61
Anfangswertsatz 61
Anti-Reset-Windup 220
Arbeitsbewegung 181
Arbeitspunkt 43, 262
Ausgangsvektor 105
Ausgleichszeit 73
Ausregelzeit 20
Automatisierungsebenen 243

B

Begrenzer 220
Beobachtbarkeitsmatrix 196
Beobachter 194
Beobachtermodell 194
betragslineare Regelfläche 141
Betragsoptimum 157
Bildbereich 55, 68, 104
bilineare Transformation 233
Block 27
Bode-Diagramm 67
Bode-Verfahren 150

C

charakteristische Gleichung 143

D

Dämpfung 77 f., 80
Dämpfungsgrad 77
D-Anteil 90, 120
DA-Wandler 204
Deadbeat-Regler 236
D-Glied 32
Differenzgleichung 212
Differenzialgleichung 49
differenzierendes Glied 32
digitale Regler 199
Dirac-Impuls 69
Diskretisierung 212
Drehzahlregelung 269
Dreipunktregler 180
D-T₁-Glied 168
D-T₁-Regler 230
Durchgangsmatrix 107
Durchtrittsfrequenz 149
dynamische Entkopplung 179
dynamische Störgrößenkompensation 169
dynamisches Regelkreisverhalten 140
dynamisches Übertragungsverhalten 38
dynamisches Verhalten 45

E

Eigenwert 143
Eingangsmatrix 107
Eingangsvektor 103, 105
Eingrößensystem 177
Einstellregel von Chien, Hrones und Reswick 163
Einstellregel von Ziegler und Nichols 160
Elektromotor 39, 44, 269
Empfindlichkeitsfunktion 151
EMSR-Stellen-Kreis 248
EMSR-Stellenplan 248
Endwert 41, 58
Endwertsatz 59

Entkopplungsfilter 178
Entwurf 21
Ersatzmodell 74

F

Festwertregelungen 16
Fließbild 246
Folgeregelung 16
Formel von Ackermann 191
Frequenzgang 62
Frequenzkennlinienverfahren 150
Führungsgröße 15
Führungsregler 170
Führungsübertragungsfunktion 134
Fuzzy-Logik 18, 290

G

Gegenkopplung 57, 142, 227
Gesamtübertragungsfunktion 56
Geschwindigkeitsalgorithmus 216
Gleichstrom-Elektromotor 39
Gleichstrom-Nebenschlussmotor 91
grenzstabil 78
Grenzstabilität 142
Grundfließschema 247
Grundregelkreis 15

H

Hilfsregelgröße 170
Hysterese 180

I

Identifikation 72, 76
Identifikationsverfahren 76
I-Glied 30, 115, 214
Impulsmomentensatz 98
Induktivität 35
Inneres-Modell-Prinzip 137
instabiles System 142
Integralkriterien 141
integrierendes Glied 31
Istwert 14, 16
I-T₁-Glied 85
ITAE-Kriterium 141

K

Kapazität 35, 51
Kaskadenregelung 170
Kennlinie 38
Kennlinienfeld 42
Kirchhoff 49
Kompaktregler 125
Kompensationsregler 153
komplexe Zeigergröße 63
kritische Verstärkung 147, 160

L

Laplace-Transformation 52
Lastenheft 246
Leittechnik 243
Linearisierung 43

M

mathematisches Modell 49
maximale Überschwingweite 19
Mehrgrößensystem 178
Messort 262
Messrauschen 120 f., 169
Messvektor 105
Mitkopplung 58, 148, 228
Modellbildung 26 f.

N

Nachstellzeit 115
Nennergrad 179
nicht lineare Kennlinie 43
Nullstelle 78, 82
Nyquist-Kriterium 148
Nyquist-Stabilitätskriterium 145

O

offener Kreis 133
ohmscher Widerstand 35
Ortskurve 65

P

Parallelschaltung 57, 227
Partialbruchzerlegung 81, 143, 225, 284

PD-Regler 119
Pendel 274
Phasengang 67
Phasenreserve 149
PID-Kompensationsregler 154
PID-Regler 18, 123
PID- T_1 -Regler 123
PI-Regler 115, 125, 215, 218
PI-Zustandsregler 192
PLT-Projekt 244
Pol 78
Pollage 79
Polüberschuss 153
Polvorgabe 186
Polzuweisung 186
P-Regler 115, 125
Proportionalbeiwert 42, 115
Proportionalglied 29
Prozessleitsystem 125, 248, 254
P- T_1 -Glied 52, 71
P- T_2 -Glied 77
P- T_n -Glied 72
Pulsweitenmodulator 183

Q

quadratische Regelfläche 141
Quantisierung 203
Quantisierungseinheit 203
Quantisierungsfehler 204
Quantisierungsstufe 203

R

Rampenfunktion 54, 69
Regelabweichung 16
Regelbereich 42
Regeldifferenz 16
Regeleinrichtung 16
Regelfaktor 134
Regelfläche 141
Regelgröße 16
Regelkreis 14
Regelstrategien 17
Regelstrecke 16
Regelung 14
Regler 16
Regleralgorithmen 216

Reglerentwurf 133
Regler in der Rückführung 176
Regler-Software-Baustein 128
Reihenschaltung 56, 226
Reihenschwingkreis 49
Resonanzfrequenz 79
Resonanzüberhöhung 79
RI-Fließschema 247
Rückführung 57, 185, 192, 227
Rücktransformation 53, 55

S

schaltende Regler 180
Sensor 16, 23, 200
Sigma-Funktion 46
Signalmodelle 70
SIPART DR21 125
Sollwert 15
speicherprogrammierbare Steuerung 125
Sprungantwort 28
Stabilität 143, 231
Standardregelstrecke 73
stationäre Entkopplung 180
stationäres Regelkreisverhalten 134
statische Kennlinie 38
statische Störgrößenkompensation 168
statischer Regelfaktor 151
statisches Übertragungsverhalten 38
Stellbereich 42
Stellglied 16
Stellgröße 16
Stellungsalgorithmus 216
Steuerfläche 74
Steuerung 14
Störgröße 16
Störgrößenaufschaltung 167
Störgrößenkompensation 167
Störübertragungsfunktion 134
Strecke 14
Strecke mit Ausgleich 70
Strecke ohne Ausgleich 70
Summenzeitkonstante 74
Superpositionsgesetz 38
Systemmatrix 105

T

Temperaturregelstrecke 261
Temperaturregelung 14, 205, 251
Tiefpassfilter 52, 120
Tiefsetzsteller 100
 t_{\max} 81, 189
Toleranzbereich 19
Totzeit 33, 84, 206
Totzeitglied 33
Trapezregel 216
Treppenfunktion 203, 209 f., 222
T-Summen-Einstellregel 161
Tustin-Formel 233

U

Übergangsfunktion 29
Überlagerungsprinzip 38
Übertragungsfunktion 56
Übertragungsglied 28
Übertragungsmatrix 178
Übertragungsverhalten 38

V

Verfahrensfließschema 247
Verkopplung 177
Verzögerungsglied 1. Ordnung 71
Verzögerungsglied 2. Ordnung 76
Verzögerungsglied n. Ordnung 72
Verzugszeit 73

Verzweigung 28
Vorfilter 173, 187
Vorgehensmodell 22, 253
Vorlastkennlinie 44
Vorsteuerung 174
VZ1 71

W

WAGO I/O-System 750 128
Wandelzeit 204
Wendetangente 73
windup 220
Wirkkette 252
Wirkungslinie 27
Wirkungsplan 27
Wurzelortskurve 144

Z

Zählerpolynom 82, 108
Zeigergröße 63
Zeitkonstante 47
Zeitprozentkennwert 75
Zeitverhalten 45
Z-Transformation 223
Z-Übertragungsfunktion 225
Zustandsgröße 103
Zustandsraum 103
Zustandsregler 185
Zweiggrößensystem 177
Zweipunkregler 180