

Gens, Wolfgang :

***Skript zur Vorlesung "Automatische Steuerung in der
Elektrotechnik (ASE)" für Studenten der FR 14007 der TH
Ilmenau***

Zuerst erschienen als:

Skript zur Vorlesung "Automatische Steuerung in der Elektrotechnik (ASE)" für Studenten der FR 14007 der TH Ilmenau / Wolfgang Gens
Ilmenau : Tech. Hochsch., 1977. - 167 S. : graph. Darst.

Skript zur Vorlesung "Automatische Steuerung in der Elektrotechnik (ASE)" für Studenten der FR 14007 der TH Ilmenau

Bearbeiter: Doz. Dr.-Ing. W. Gens

Stand: Sept. 1977

1. Einführung

1.1. Allgemeine Bemerkungen

- Ziel der Lehrveranstaltung

Vermittlung von Kenntnissen zur Analyse und Synthese einfacher, vorangepaßter automatischer Steuerungen in der energieorientierten Elektrotechnik. Den Schwerpunkt bilden Steuerungen, in die elektrische Energiewandler einbezogen sind.

- Wesentliche Voraussetzungen

Mathematik:

Komplexe Rechnung, lineare Differentialgleichungen, Laplace-Transformation.

Technische Kybernetik:

Grundbegriffe, Übertragungsverhalten der Elementarglieder, mathematische Beschreibung und Verhalten einschleifiger Regelkreise bei Führung und Störung, Grundlagen des Entwurfs von Regelkreisen nach statischen und dynamischen Gesichtspunkten.

Leistungselektronik:

Prinzipielle Wirkungsweise und statische Steuerkennlinien netzgelöschter Stromrichteranordnungen bei verschiedenen Lastarten.

Informationselektronik:

Verhalten beschalteter Gleichstrom-Differenzverstärker (Operationsverstärker).

Elektromechanische Energiewandlung:

Betriebsverhalten von Gleichstrommaschinen, Bewegungsgleichung für rotierende Antriebssysteme.

1.2. Automatisierungstechnik und automatische Steuerung

- Begriffsbestimmung (siehe Vorlesung "Systemanalyse/ Technische Kybernetik")
- + Automatisierungstechnik ist die Verknüpfung von Stoff- und Energietechnik mit der Informationstechnik
- + Automatische Steuerung
 - als Funktion: Weitgehend selbsttätige Beeinflussung gegebener Größen und deren Verhalten in einem technischen System mit dem Ziel, in den Energie- bzw. Stofffluß eines technischen Prozesses zielgerichtet einzugreifen.
 - als Gerätekomplex: Gesamtheit der technischen Einrichtungen zur zielgerichteten Beeinflussung des Energie- bzw. Stoffflusses.
- + Korrelation Automatisierungstechnik - Automatische Steuerung
 - Durch die Automatisierungstechnik werden die vielfältigen Strukturen und Ausführungsformen der automatischen Steuerung so mit den stoff- bzw. energiewandelnden Einrichtungen zu einem technischen Komplex zusammengefügt, daß der weitgehend selbsttätige Ablauf des zugeordneten technologischen Prozesses gewährleistet ist (z. B. Gewährleistung eines vorgegebenen zeitlichen Temperaturverlaufs in einer Erwärmungsanlage).
- Gesellschaftspolitische Ziele
 - + Intensivierung der gesellschaftlichen Produktion
 - + Erhöhung der Arbeitsproduktivität



91=AUT
82 A 176

- + Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen durch Erhöhung des Anteils der geistigen Arbeit, Verbesserung des Arbeitsschutzes und Verringerung der körperlichen Belastung in der Produktionsphäre.
- Technische Ziele (Untersetzung der gesellschaftspolitischen Ziele)
 - + Sicherung des rationellen Einsatzes der Elektroenergie durch zweckmäßige Steuerung der Wandlung der elektrischen Energie in andere Energieformen (z. B. in mechanische, thermische oder chemische Energie) einschl. ihrer Dosierung.
 - + Schaffung hochproduktiver technologischer Verfahren (z. B. automatisierte Walzstraßen, Schachtförderanlagen, Lokomotiven und Triebfahrzeuge, numerische Werkzeugmaschinen).
 - + Realisierung von spezifischen Prozessen in einer für den Menschen unzuträglichen Umgebung (z. B. Kernkraftwerk, Raumfahrt, chemische Industrie).

1.3. Wesentliche Aufgaben der Funktionselemente einer automatischen Steuerung in der energieorientierten Elektrotechnik und deren signalbezogene Verknüpfung

1.3.1. Funktionselemente und ihre Aufgaben

- Gesamtsystem, Teilsystem

Als Gesamtsystem soll das technische System bezeichnet werden, in dem ein technologischer Prozeß abläuft. Es besteht je nach der notwendigen Auflösung bei der Betrachtung aus mehr oder weniger vielen Teilsystemen. Gegenstand der Vorlesung ASE sind zu steuernde elektrotechnische Teilsysteme.

- elektrotechnisches Teilsystem

Auf Bild 1 ist die Verknüpfung der Elemente dargestellt, die ein steuerbares elektrotechnisches Teilsystem bilden.

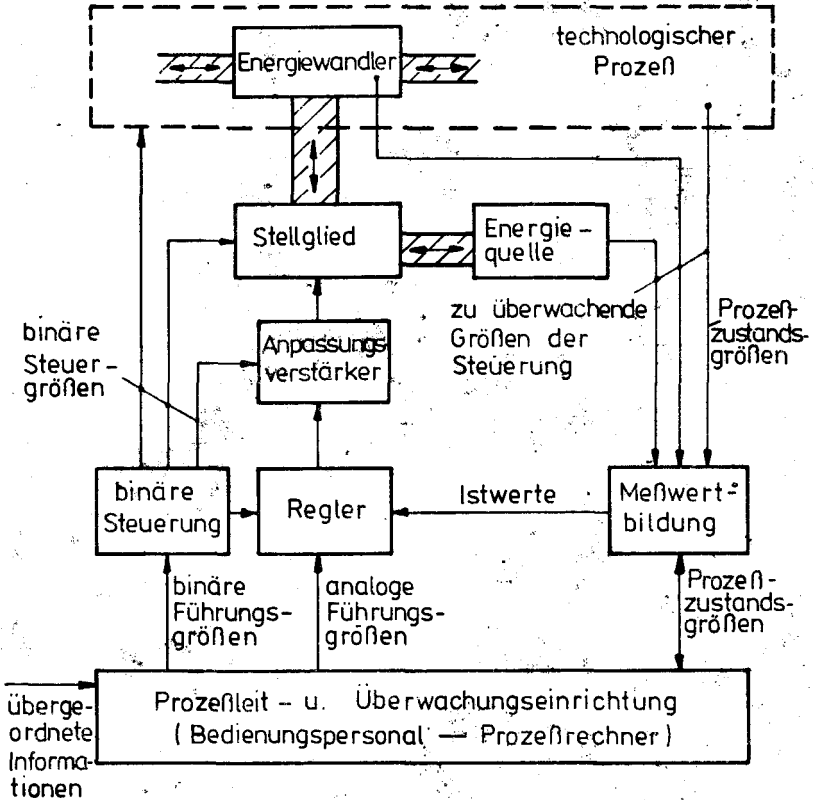


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines elektrotechnischen Systems als Bestandteil eines automatisierten technologischen Prozesses

+ Energiewandler

Er stellt dem technologischen Prozeß die Energie in der gewünschten Form durch Umwandlung elektrischer Energie zur Verfügung, z. B. mechanische Energie durch elektromechanische Wandler

+ Stellglied (Energieumformer)

Er führt dem Energiewandler die elektrische Energie mit den benötigten Parametern zu. Dazu ist die Umformung der gewöhnlich vom ein- oder dreiphasigen Wechselstromnetz bezogenen elektrischen Energie verbunden mit der Steuerung des Energieflusses zwischen Netz und Energiewandler und damit dem technologischen Prozeß erforderlich.

+ Anpassungsverstärker (Interface zur Verbindung von Leistungs- und Informationsteil)

Er stellt das Verbindungs- oder Anpassungsglied zwischen dem energetischen und informationsverarbeitenden Teil des Systems dar und dient der Übertragung von Steuerbefehlen auf das Stellglied.

+ Regler

Er bildet auf der Basis einer programmierten Vorschrift (Regleralgorithmus) aus den Informationen, die er über die Einrichtung zur Meßwerterfassung vom technologischen Prozeß erhält und aus denen, die ihm aus der übergeordneten Prozeßleitstelle übermittelt werden, den Steuerbefehl für das Stellglied.

+ Komplexe Meßwerterfassung und -wandlung

Dieser Komplex dient zur Erfassung ausgewählter Größen, die den jeweiligen Zustand des technologischen Prozesses und der Anlage charakterisieren und zur Umwandlung derselben in zumeist elektrische Signale mit genormten Kenngrößen.

+ Binäre Steuerung

Hier werden Steuerbefehle und Meldesignale in Form binärer Signale gebildet. Sie entstehen auf der Basis programmierter Vorschriften durch Verknüpfung von Informationen, die den Prozeß- und Anlagenzustand charakterisieren und die von der Prozeßleiteinrichtung vorgegeben werden. Dieser Komplex hat im wesentlichen Schutz-, Überwachungs- und Anpassungsfunktionen sowohl den technologischen Prozeß als auch die Anlage betreffend zu erfüllen.

+ Prozeßleit- und Überwachungseinrichtung

Sie gewährleistet die ordnungsgemäße Prozeßführung durch Koordinierung aller Steuerbefehle sowohl im normalen als auch gestörten Betriebsfall. Sie bildet die Steuerbefehle aus Informationen, die den Prozeß- und Anlagenzustand widerspiegeln und aus äußeren Vorgaben.

Ihr Aufbau und ihre Funktion werden im wesentlichen von der Kompliziertheit des technologischen Prozesses bestimmt. Ihre Aufgaben können im einfachsten Fall von einer Bedienungsperson wahrgenommen werden. Bei weitgehend automatisierten Prozessen sind vielfach umfangreiche Meß- und Bedienungswarten erforderlich, die mit rechentechnischen Einrichtungen (Prozeßrechnern) ausgerüstet sind. Ein Prozeßrechner kann bei entsprechender Ausrüstung die Aufgaben der Meßwertwandlung, des Reglers sowie der binären Steuerung weitgehend mit übernehmen (on-line-Betrieb). Vielfach dient er jedoch nur zur selbsttätigen Protokollierung des Prozeßablaufs und zur programmierten Verdichtung der Meßdaten mit dem Ziel der Unterstützung des Bedienungspersonals bei der manuellen Prozeßführung (off-line-Betrieb).

1.3.2. Signalbezogene Verknüpfung der Funktionselemente

Die signalbezogene Verknüpfung der Funktionselemente einer automatischen Steuerung ist grundsätzlich in einer offenen oder einer geschlossenen Struktur möglich.

- Steuerkette (Vorwärtssteuerung)

Steuerung des Energiewandlers über eine offene Wirkungskette, d. h. es findet keine Rückmeldung des zeitlichen Verlaufs der gesteuerten Größe zum Eingang hin statt. Die steuernde und gesteuerte Größe sind nur in Vorwärtsrichtung miteinander gekoppelt.

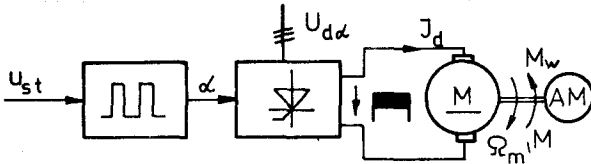


Bild 2: Offene Steuerkette am Beispiel eines gesteuerten Gleichstrommotors (u_{st} - steuernde Größe, Ω_m - gesteuerte Größe)

- Regelung

Steuerung des Energiewandlers mit Rückmeldung des zeitlichen Verlaufs mindestens einer seinen Betriebszustand charakterisierenden Größe zwecks fortlaufenden Vergleichs derselben mit der zugeordneten Führungsgröße. Es entsteht ein geschlossener Wirkungskreis, der Regelkreis. Nachfolgend werden nur vorangepaßte Regelkreise behandelt.

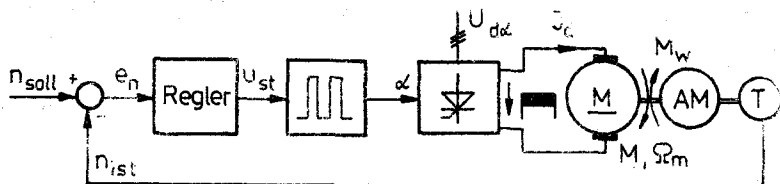


Bild 3: Regelung am Beispiel eines drehzahlgeregelten Gleichstrommotors

(ω_m - Regelgröße, n_{soll} - Führungsgröße)

- Strecke und Einrichtung

Der Teil einer automatischen Steuerung, der aufgabengemäß durch die Steuerung beeinflusst werden soll, wird als Steuer- bzw. Regelstrecke bezeichnet. Bei automatischen Steuerungen der Elektrotechnik wird der Energiewandler und das Stellglied zur Strecke gehörig betrachtet. Die Gesamtheit der Funktionselemente der Anlage, mit der die aufgabengemäße Beeinflussung der Regelstrecke vollzogen wird, bezeichnet man als Steuer- bzw. Regeleinrichtung.

1.4. Schwerpunkte bei der Realisierung einer automatischen Steuerung

1.4.1. Für die Realisierung eines automatisierten technologischen Prozesses wesentliche Aspekte

- gesellschaftlich - sozialer Aspekt

Einschätzung der politischen Bedeutung des Vorhabens, Auswirkung auf die Umwelt und das Bedienungspersonal.

- **ökonomischer Aspekt**
Vergleich von Aufwand und zu erwartendem Nutzen.
- **technologischer Aspekt**
Beurteilung der Automatisierbarkeit des technologischen Verfahrens, Veränderung desselben in Richtung einer größeren Automatisierungsfreundlichkeit.
- **kybernetischer Aspekt**
Wahl der Steuerungsstruktur mit dem Ziel der Gewährleistung eines selbsttätigen Prozeßablaufs bei Einhaltung der vorgegebenen technischen und ökonomischen Parameter.
- **technischer Aspekt**
Wahl der technischen Mittel zur Realisierung des Automatisierungsvorhabens, konstruktive Ausführung, Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit.

Die Gesamtheit der Aspekte bildet eine Einheit. Kein Aspekt allein darf einem Systementwurf zugrunde gelegt werden. Die Realisierung einer im Hinblick auf die entscheidenden Aspekte optimalen automatischen Steuerung kann nur das Ergebnis einer engen abgestimmten Gemeinschaftsarbeit von Fachleuten sein, die das System unter dem jeweiligen Aspekt beurteilen können.

1.4.2. Zeitlicher Ablauf des Entstehens einer automatischen Steuerung

Im Rahmen der Lehrveranstaltung ASE interessiert der Ablauf bei der Realisierung einer automatischen Steuerung. Folgende 6 Phasen sind wesentlich.

- **1. Phase**
Festlegung der notwendigen Funktionen der Steuerung zur Realisierung der technologischen Zielstellung. Es müssen die Anforderungen an die Steuer- bzw. Regelstrecke und damit ihr grundsätzlicher Aufbau festgelegt werden.

- 2. Phase

Festlegung der Prozeßgrößen zur Erfassung der Zustände des technologischen Prozesses, die vom gesteuerten elektrischen System aufgabengemäß beeinflußt werden sollen. Festlegung der Steuergrößen, die von außen, d. h. vom übergeordneten System vorzugeben sind. Auf der Basis der externen und internen Prozeßinformationen muß eine optimale Prozeßführung und -überwachung einschließlich des sicheren Schutzes der Anlage und ihres Bedienungspersonals gewährleistet werden.

- 3. Phase

Festlegung der Steuerungsstruktur zwecks Verknüpfung der vielfältigen Informationen mit dem Ziel, geeignete Signale für die Steuerung des Systems sowohl im normalen als auch im Havariefall und zur Beurteilung des Prozeßverlaufs zu gewinnen.

- 4. Phase

Gerätetechnische Realisierung. Hier ist der Einsatz von Bausteinsystemen anzustreben. Sonderentwicklungen nur zur Erfüllung spezifischer Forderungen.

- 5. Phase

Erprobung. In dieser Phase müssen sehr sorgfältig die Erprobungsergebnisse ausgewertet werden. Sie sind die Basis für eine gezielte Verbesserung des Systementwurfs.

- 6. Phase

Eingliederung in den Produktionsprozeß.

Die Realisierung eines jeden technischen Systems und damit auch einer automatischen Steuerung ist ein Iterationsprozeß. Er ist dadurch gekennzeichnet, daß einzelne oder mehrere Phasen mehrmals durchlaufen werden müssen bis eine befriedigende Lösung des betreffenden Teilsystems gefunden worden ist. Klarheit in der Aufgabenstellung, hohe fachliche und politische Qualifikation der Bearbeiter und zweckgebundene Zusammensetzung des Bearbeiterkollektivs tragen immer dazu bei, die Entstehungszeit eines technischen Systems zu verkürzen, damit den Gesamtaufwand zu verringern

und eine hohe Qualität zu erreichen.

2. Kurze Wiederholung der Grundbegriffe und Methoden der quantitativen Behandlung des statischen (stationären) und dynamischen Übertragungsverhaltens von Elementen und Systemen automatischer Steuerungen
-

2.1. Übertragungsverhalten

Abhängigkeit der Gesamtheit der Ausgangsgrößen eines Elements (Übertragungsglied, Übertragungssystem) von der Gesamtheit der Eingangsgrößen. Sie ist im technischen Sinne funktionsbedingt und im kybernetischen Sinne strukturbedingt.

- statisches (stationäres) Übertragungsverhalten
Gesamtheit der statischen Werte der verschiedenen Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von der Gesamtheit der statischen Werte einer oder mehrerer Eingangsgrößen.
- dynamisches Übertragungsverhalten
Gesamtheit der zeitlichen Verläufe der Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von den zeitlichen Verläufen der Eingangsgrößen beim Übergang von einem Arbeitspunkt zu einem anderen.

2.2. Quantitative Beschreibung des Übertragungsverhaltens

2.2.1. Die Beschreibung mittels Differentialgleichung

Die grundsätzliche mathematische Beschreibung des Übertragungsverhaltens erfolgt durch die Differentialgleichung (DGL) bzw. das DGL-System.

In der Elektrotechnik treten sehr häufig Teilsysteme auf, deren Übertragungsverhalten sich im Arbeitsbereich, d. h. in dem Bereich, in dem sich die Eingangs- und Ausgangsgrößen aufgabengemäß verändern, durch die DGL

$$a_0 X_a + a_1 \frac{dX_a}{dt} + \dots + \frac{d^m X_a}{dt^m} = b_0 X_e + b_1 \frac{dX_e}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n X_e}{dt^n} \quad (1)$$

bzw. durch ein System solcher DGL beschreiben läßt. Die Koeffizienten weisen folgende Abhängigkeiten auf:

$$\begin{aligned} a_0 \dots a_m &= f(X_a; X_e) && \text{für } \mu \text{ und } \nu \geq 1 \\ b_0 \dots b_n &= f(t, X_a^{(\mu)}, X_e^{(\nu)}) && \text{(ganzzahlig)} \end{aligned}$$

Systeme dieser Art zeichnen sich dadurch aus, daß sowohl ihre statischen Kennlinien $X_a = f(X_e)$ als auch ihre Ausgleichsvorgänge $X_a = f(X_e, t)$, ein stetiges $X_e(t)$ für $t > 0$ vorausgesetzt, einen stetigen Verlauf haben.

2.2.2. Das statische Übertragungsverhalten

Die Beschreibung des statischen Verhaltens, gekennzeichnet durch $X_a^{(\mu)} = 0$ und $X_e^{(\nu)} = 0$ für μ und $\nu \geq 1$ (ganzzahlig), ist mit Hilfe der Kennliniengeometrie möglich. Es werden zu diesem Zweck die Abhängigkeiten

$$X_a = \frac{b_0}{a_0} X_{e1} \quad (\text{für } X_{e2} \dots X_{en} = \text{konst.}, \text{ sofern mehrere Eingangsgrößen, die statischen Änderungen unterliegen, wirksam sind})$$

graphisch dargestellt, miteinander kombiniert und ausgewertet (Bild 4).

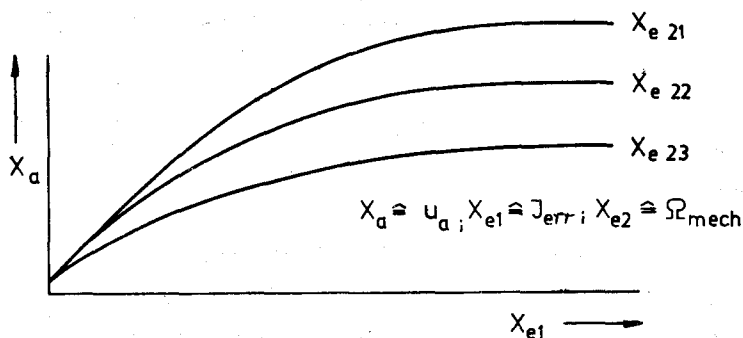


Bild 4: Statisches Kennlinienfeld eines Übertragungsgliedes (fremderregter Gleichstromgenerator)

Die kennliniengeometrische Betrachtung ist zweckmäßig, da sich infolge $a_0, b_0 = f(X_a; X_e)$ nichtlineare Funktionen ergeben, die in der Regel für den Ingenieur nicht ausreichend einfach analytisch formulierbar sind. Lediglich für den Sonderfall des linearen Systems ergeben sich lineare Kennlinien, da a_0 und b_0 für den gesamten Arbeitsbereich gültige Konstanten, d. h. nicht von X_a und X_e abhängig sind.

Das statische Übertragungsverhalten ist von Interesse, wenn es darum geht, den verfügbaren Aussteuerbereich des einzelnen Übertragungsgliedes oder ihrer Gesamtheit in der Vielfalt der Verbindungsmöglichkeiten (Steuerkette, Regelkreis) sowie den beherrschbaren Störbereich zu bestimmen. Überlegungen dieser Art müssen angestellt werden, wenn die betriebsmäßigen Beanspruchungen der Elemente eines Steuerungssystems im Rahmen eines Entwurfs oder der Kontrolle einer ausgeführten Anlage ermittelt werden müssen.

2.2.3. Das dynamische Übertragungsverhalten

Die Beschreibung des dynamischen Übertragungsverhaltens mit dem Ziel der Berechnung von Ausgleichsvorgängen, die sich über den gesamten Arbeitsbereich des Systems erstrecken, ist wegen $(a_0 \dots a_m, b_0 \dots b_n = f(X_a, X_e))$ nicht in einfacher Weise möglich. Eine für viele praktische Erfordernisse genügend aussagefähige Beschreibungsform erhält man durch Linearisierung der DGL (Gl. 1) bzw. des DGL-Systems. Sie besteht darin, daß für jeden Arbeitspunkt (X_{a0}, X_{e0}) innerhalb des Arbeitsbereiches des Systems eine DGL formuliert wird. Der Linearisierungsansatz lautet:

$$a_{00}(X_{a0} + x_a) + a_{10} \frac{d(X_{a0} + x_a)}{dt} + \dots + a_{m0} \frac{d^m(X_{a0} + x_a)}{dt^m} =$$

$$b_{00}(X_{e0} + x_e) + b_{10} \frac{d(X_{e0} + x_e)}{dt} + \dots + b_{n0} \frac{d^n(X_{e0} + x_e)}{dt^n}$$

Die Koeffizienten sind von X_{a0} und X_{e0} abhängig, durch die der jeweilige Arbeitspunkt des Systems festgelegt ist.

Es gilt:

$$(a_{00} \dots a_{m0}; b_{00} \dots b_{n0}) = f(X_{a0}; X_{e0})$$

Sie sind im allgemeinen Fall von Arbeitspunkt zu Arbeitspunkt verschieden.

Die Linearisierung bedingt, daß die Änderungen von Ein- und Ausgangsgröße auf eine hinreichend kleine Umgebung des Arbeitspunktes beschränkt bleiben, in der die Koeffizienten in Gl. (2) als konstant angenommen werden können. Diese ist im allgemeinen wesentlich kleiner als der Arbeitsbereich des betrachteten Systems.

Durch Aufspaltung der Gl. (3) erhält man die DGL zur Berechnung des dynamischen Verhaltens in der Umgebung eines Arbeitspunktes

$$\begin{aligned}
 a_{00}x_a + a_{10} \frac{dx_a}{dt} + \dots + a_m \frac{d^m x_a}{dt^m} = \\
 b_{00}x_e + b_{10} \frac{dx_e}{dt} + \dots + b_n \frac{d^n x_e}{dt^n}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

sowie die statische Beziehung

$$x_{e0} = \frac{b_{00}}{a_{00}} x_{a0}$$

durch die der Arbeitspunkt festgelegt ist, in dessen Umgebung Gl. (4) gilt.

Die Linearisierung ist nicht erforderlich für den Sonderfall des zumindest im jeweiligen Arbeitsbereich linearen Systems, da hier alle Koeffizienten der Gl. (3) nicht vom Arbeitspunkt abhängig und damit konstant sind.

Das dynamische Übertragungsverhalten interessiert im Zusammenhang mit Stabilitätsbetrachtungen von geschlossenen Steuerungsstrukturen. Es muß weiterhin quantitativ bekannt sein, wenn der zeitliche Verlauf jener Größen, die den Zustand des Systems beim Übergang von einem Arbeitspunkt zu einem anderen beschreiben, benötigt wird. Fragestellungen dieser Art treten auf, wenn z. B. die Dauer von Ausgleichvorgängen, Abweichungen von einem Sollzustand, Beanspruchungen der Systemelemente berechnet werden müssen.

Bei vorgegebenem zeitlichem Verlauf der Eingangsgröße und vorgegebenen Systemparametern, die die Koeffizienten bestimmen, ergibt die Lösung der DGL (4) den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße. Die Untersuchung des dyn. Übertragungsverhaltens durch Lösung der DGL ausschließlich im Zeitbereich ist vergleichsweise zeitaufwändig. Für den Ingenieur wesentlich geeigneter sind die Formen der mathematischen Beschreibung, die ihren Ausgangspunkt in der nach Laplace transformierten DGL haben.

Bei der Laplace-Transformation von Gl. (4) wird vorausgesetzt, daß sich das System im Ruhezustand befindet. Damit sind alle Anfangsbedingungen Null und es folgt:

$$a_{00}x_a(p) + a_{10}p x_a(p) + \dots + a_{m0}p^m x_a(p) = b_{00}x_e(p) + b_{10}p x_e(p) + \dots + b_{n0}p^n x_e(p) \quad (5)$$

2.2.3.1. Übertragungsfunktion (ÜTF)

Man bezeichnet den aus Gl. (5) abgeleiteten Quotienten

$$G(p) = \frac{x_a(p)}{x_e(p)} = \frac{b_{00} + b_{10}p + \dots + b_{n0}p^n}{a_{00} + a_{10}p + \dots + a_{m0}p^m} \quad (6)$$

als Übertragungsfunktion. Die ÜTF ist Ausgangspunkt für drei gebräuchliche Verfahren zur quantitativen Beschreibung des dynamischen Übertragungsverhaltens

- Sprungantwort, Übergangsfunktion
- Pol-Nullstellenverteilung
- Frequenzgang, Frequenzkennlinien.

2.2.3.2. Sprungantwort (SPA), Übergangsfunktion (ÜGF)

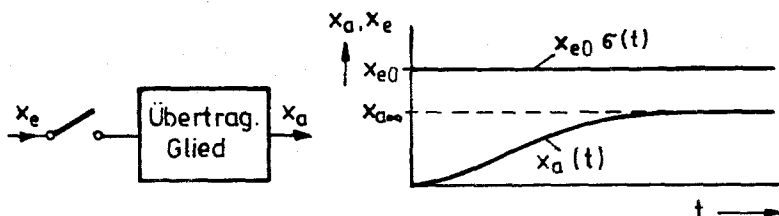


Bild 5 Messung und Verlauf der Sprungantwort

Ausgehend von einem Beharrungszustand $\hat{=}$ Ruhezustand wird der Eingang des zu untersuchenden Systems mit der Sprungfunktion $x_e(t) = x_{e0} G(t)$ beaufschlagt und der zeitliche Verlauf der Ausgangsgröße $x_a(t)$ (Sprungantwort) ermittelt. Die auf x_{e0} bezogene SPA wird als Übergangsfunktion bezeichnet.

- Messung der SPA

Die Messung der SPA wird in der Elektrotechnik häufig angewandt, da sich die Funktion $x_e = x_{e0} G(t)$ z. B. durch Spannungssprünge leicht realisieren läßt. Es ist zu beachten:

- + Entkopplung des zu untersuchenden Übertragungsgliedes von den nach- und vorgeschalteten Übertragungsgliedern
- + Richtung und Betrag der Änderung der Ausgangsgröße bei der Messung.

Die eindeutige Bestimmung von Parametern des Übertragungsgliedes aus der SPA ist nur möglich, wenn dessen Struktur einfach und bekannt ist.

- Berechnung der SPA

Mit dem sprungförmigen Eingangssignal

$$x_{e0} \delta(t) \Leftrightarrow \frac{x_{e0}}{p}$$

folgt die SPA im Laplace-Unterbereich

$$x_a(p) = \frac{x_{e0}(b_{00} + b_{10}p + \dots + b_{n0}p^n)}{p(a_{00} + a_{10}p + \dots + a_{m0}p^m)} = \frac{x_{e0}}{p} G(p) \quad (7)$$

und im Zeitbereich

$$x_a(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{x_{e0}}{p} \frac{b_{00} + b_{10}p + \dots + b_{n0}p^n}{a_{00} + a_{10}p + \dots + a_{m0}p^m} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{x_{e0}}{p} G(p) \right\} \quad (8)$$

Die Rücktransformation erfolgt mittels Korrespondenztabelle, Partialbruchzerlegung oder Faltungintegral.

2.2.3.3. Pol-Nullstellenverteilung

Eine anschauliche und umfassende Interpretation des dynamischen Verhaltens ist möglich, wenn man die Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion berechnet und grafisch darstellt. Die UTF nach Gl. (6) muß zu diesem Zweck in Linearfaktorschreibweise aufgeschrieben werden.

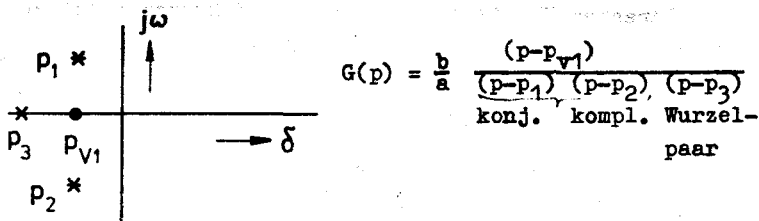


Bild 6: Pol-Nullstellenbild eines Übertragungsgliedes (Beispiel)

Da die Pole $p_1 \dots p_m$ und die Nullstellen $p_{V1} \dots p_{Vn}$ reelle oder komplexe Zahlen sind, werden sie zweckmäßig in der komplexen Ebene dargestellt. Man bezeichnet diese Darstellung als Pol-Nullstellenverteilung des betreffenden Übertragungsgliedes. Die Pole der UTF in Linearfaktorschreibweise erscheinen in der Sprungantwort als Exponenten von e-Funktionen. Bei technisch sinnvollen Übertragungsgliedern und Systemen muß die Ausgangsgröße bei Aufschaltung einer Sprungfunktion auf dem Eingang einem endlichen Beharrungswert zustreben. Das hat zur Voraussetzung, daß alle Pole eines solchen Systems ein Realteil < 0 besitzen, d. h. in der linken Hälfte der komplexen Ebene liegen müssen.

Technische Bedeutung haben außerdem solche Übertragungsglieder, die einen Einfach- oder Mehrfachpol im Ursprung der komplexen Ebene besitzen (I-Glieder).

2.2.3.4. Frequenzgang, Frequenzkennlinien

Bei linearen Übertragungsgliedern und Systemen ist zu verzeichnen, daß sich bei einer Eingangsgröße

$$x_e(t) = \hat{x}_e \cos \omega_1 t$$

im eingeschwungenen oder stationären Zustand eine Ausgangsgröße

$$x_a(t) = \hat{x}_a (\cos \omega_1 t + \varphi)$$

einstellt.

Bei $\hat{x}_e(\omega) = \text{konst}$ sind \hat{x}_a und φ Funktionen von ω . Die mathematische Formulierung dieses Sachverhaltes erfolgt durch den Frequenzgang und die daraus abgeleiteten Frequenzkennlinien.

- Frequenzgang

Er folgt aus der Beziehung

$$G(j\omega) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} G(p) \text{ mit } p = \sigma + j\omega$$

Demnach lautet der Frequenzgang ausgehend von Gl. (6) in allgemeiner Form

$$G(j\omega) = \frac{x_a(j\omega)}{x_e(j\omega)} = \frac{b_{00} + j\omega b_{10} + \dots + (j\omega)^n b_{n0}}{a_{00} + j\omega a_{10} + \dots + (j\omega)^m a_{m0}} \quad (9)$$

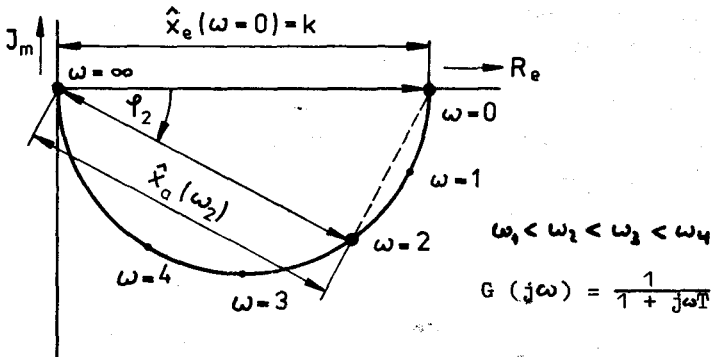


Bild 7: Beispiel für die Frequenzgang-Ortskurve eines Übertragungsgliedes

$G(j\omega)$ wird zweckmäßig als Ortskurve aufgetragen. Die auf Bild 7 dargestellte Ortskurve sagt aus, daß sich bei einer Eingangsgröße $x_e(t) = \hat{x}_e \cos \omega_2 t$ eine Ausgangsgröße $x_a(t) = \hat{x}_a \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ einstellt. Im vorliegenden Beispiel erfährt die Amplitude des Signals beim Durchgang durch das Übertragungsglied eine Dämpfung ($\hat{x}_a < \hat{x}_e$) sowie eine Phasenrückdrehung um φ_2 bezogen auf die Phasenlage von $x_e(\omega t)$.

Zusammenhang zwischen Frequenzgang und Sprungantwort
Über das Fourier-Integral besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen $G(j\omega)$ und der SPA eines Übertragungsgliedes oder eines Systems. Auf diesen wird Bezug genommen, um charakteristische Größen der SPA anhand des Frequenzganges zu bestimmen.

- Frequenzkennlinien

Die Verwendung des Frequenzganges zur Berechnung des dynamischen Übertragungsverhaltens, insbesondere mehrerer auf verschiedene Weise zusammengesetzter Übertragungsglieder, ist umständlich und damit uneffektiv. Wesentlich besser sind hierfür die aus dem Frequenzgang hergeleiteten Frequenzkennlinien (Amplituden- und Phasenkennlinien) geeignet.

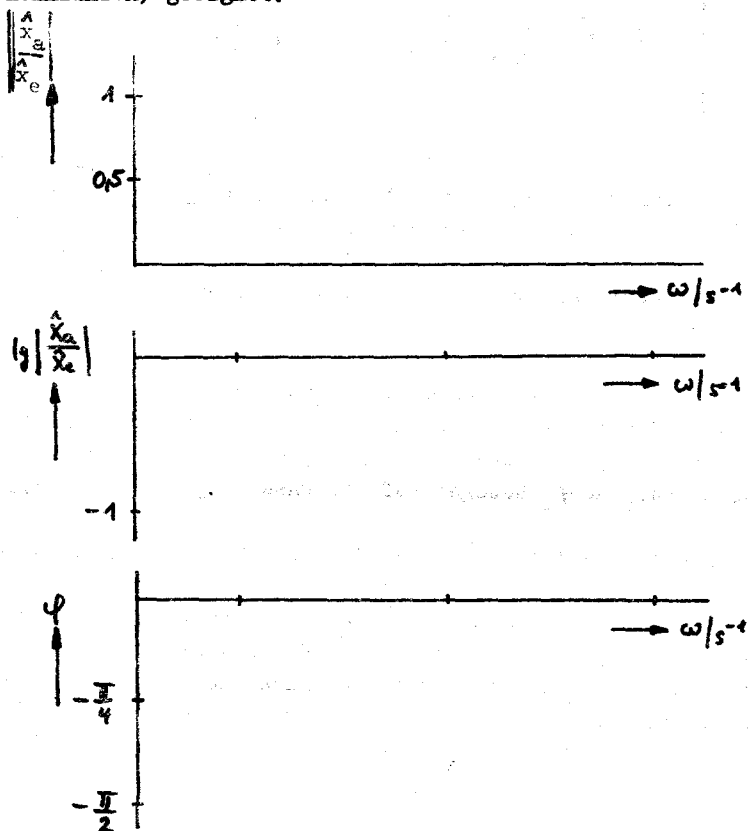


Bild 8: Amplitudenkennlinie (in dekadischer und logarithmischer Darstellung) und Phasenkennlinie entsprechend dem Frequenzgang auf Bild 7

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} = \left| \frac{\hat{x}_a(j\omega)}{\hat{x}_e(j\omega)} \right| e^{j \arg G(j\omega)} \quad (10)$$

In Gl. (10) ist

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{\hat{x}_a(j\omega)}{\hat{x}_e(j\omega)} \right| = \sqrt{[\operatorname{Im} G(j\omega)]^2 + [\operatorname{Re} G(j\omega)]^2} \quad (11)$$

und

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\operatorname{Im} G(j\omega)}{\operatorname{Re} G(j\omega)} \quad (12)$$

Man erkennt, daß $G(j\omega)$ und $\varphi(\omega)$ reelle Funktionen der Veränderlichen ω sind. Es liegt eine grafische Darstellung der Form $|G(j\omega)| = f_1(\omega)$ und $\varphi = f_2(\omega)$ nahe. Man bezeichnet die beiden Kennlinien als Frequenzkennlinien [$f_1(\omega)$ als Amplitudenfrequenzkennlinie (AFK) und $f_2(\omega)$ als Phasenfrequenzkennlinie (PFK)]. Der Vorteil ihrer Anwendung zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens liegt darin, daß die häufig vorkommenden multiplikativen Verknüpfungen von Frequenzgängen (Reihenschaltung von Übertragungsgliedern) sich in einer Summation der logarithmischen AFK und der PFK der einzelnen Übertragungsglieder widerspiegelt. Es gilt für diesen Fall allgemein:

$$G_{\text{ges}}(j\omega) = \frac{k G_1(j\omega) G_2(j\omega) \dots G_n(j\omega)}{G_1^*(j\omega) G_2^*(j\omega) \dots G_m^*(j\omega)}$$

$$|G_{\text{ges}}(j\omega)| e^{j\varphi_{\text{ges}}} = \frac{k |G_1(j\omega)| \cdot |G_2(j\omega)| \dots |G_n(j\omega)|}{|G_1^*(j\omega)| \cdot |G_2^*(j\omega)| \dots |G_m^*(j\omega)|} \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n - \varphi_1^* - \varphi_2^* - \dots - \varphi_m^*)}$$

$$L_{\text{ges}}(\omega) = \lg G_{\text{ges}}(j\omega) = \lg k + \lg |G_1(j\omega)| + \lg |G_2(j\omega)| \\ + \dots + \lg |G_n(j\omega)| - \quad (13)$$

$$- \lg |G_1^*(j\omega)| - \lg |G_2^*(j\omega)| - \dots - \lg |G_m^*(j\omega)|$$

$$\varphi_{\text{ges}}(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) + \dots + \varphi_n(\omega) - \varphi_1^*(\omega) - \varphi_2^*(\omega) - \dots - \varphi_m^*(\omega) \quad (14)$$

Bei Übertragungsgliedern mit Phasenminimum-Eigenschaften ist die PFK eindeutig aus der AFK herleitbar. Das Erkennen dieser Eigenschaften eines Übertragungsgliedes ist Gegenstand der Behandlung spezieller Übertragungsglieder der Elektrotechnik.

Da die AFK und PFK eindeutig aus dem Frequenzgang herleitbar sind, besteht auch zwischen diesen und dem Verlauf der Sprungantwort ein eindeutiger Zusammenhang.

3. Das Übertragungsverhalten ausgewählter elektrotechnischer Funktionseinheiten in automatischen Steuerungen

Von besonderem Interesse ist das Übertragungsverhalten folgender elektrotechnischer Funktionseinheiten

- Energiewandler
- Stellglieder (oder Energieumformer)
- Meßglieder
- Anpassungsglieder

Im Rahmen der Lehrveranstaltung ASE soll für ausgewählte Funktionseinheiten das statische und das dynamische Übertragungsverhalten untersucht werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen.

Für jede Funktionseinheit werden das Ersatzschaltbild angegeben und die steuernden Größen (Eingangsgößen) sowie die gesteuerten Größen (Ausgangsgößen), die in der praktischen Anwendung von besonderem Interesse sind, festgelegt. Anschließend werden die für den gesamten Arbeitsbereich der Funktionseinheit gültigen DGL angegeben und diese in einem angenommenen Arbeitspunkt linearisiert. Die Linearisierung ergibt die algebraischen Gleichungen, die das statische Übertragungsverhalten sowie die DGL, die das dynamische Übertragungsverhalten im Arbeitspunkt beschreiben. Aus den für einen Arbeitspunkt gültigen DGL werden besonders interessierende UTF und daraus die zugeordneten SPA und FK abgeleitet. Für jede untersuchte Funktionseinheit wird das Signalfußbild angegeben.

3.1. Energiewandler

Sie stellen dem technologischen Prozeß die benötigte Energie nach Art und Menge bereit. Vom Umfang ihres Einsatzes her sind folgende elektrotechnische Energiewandler wesentlich:

	<u>zugeführte Energie</u>	<u>abgegebene Energie</u>
elektrische Maschinen		
- Motorbetrieb	elektr.	mech.
- Generatorbetrieb	mech.	elektr.
elektr. Erwärmungsanlagen	elektr.	therm.
Elektrolysen	elektr.	chem.

3.1.1. Einfacher elektrotechnischer Verbraucher

Hierzu gehören: Erregungen von elektromagnetischen Kreisen,
elektrische Erwärmungsanlagen (in erster Näherung!)

- Ersatzschaltbild

Bild 9: Einfacher elektrotechnischer Verbraucher

Eingangsgröße:

Ausgangsgrößen:

- Mathematischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen allgemeingültig für den Arbeitsbereich

$U =$

$\psi =$

$P_R =$

$P_V =$

$P_R =$

Linearisierungsansatz (die den Arbeitspunkt kennzeichnenden Größen erhalten den Index 0)

$$U_0 + u =$$

$$\psi_0 + \psi =$$

$$P_{RO} + p_R =$$

$$P_{vO} + p_v =$$

+statisch für einen festen Arbeitspunkt

$$U_0 =$$

$$\psi_0 =$$

$$P_{RO} =$$

$$P_{vO} =$$

+dynamisch für einen festen Arbeitspunkt
 0 anhand der Differentialgleichungen

$$u =$$

(15)

$$\psi =$$

$$p_R =$$

$$p_V =$$

0 anhand der Übertragungsfunktionen

$$\frac{i(p)}{u(p)} =$$

$$\frac{\psi(p)}{u(p)} =$$

$$\frac{\psi(p)}{I(p)} =$$

$$\frac{p_R(p)}{u(p)} =$$

(16)

$$\frac{p_R(p)}{I(p)} =$$

$$\frac{\phi(p)}{p_V(p)} =$$

O anhand der Signalflußbilder

3.1.2. Gleichstromebenschlußmotor

3.1.2.1. Ankerspannungssteuerung bei Fremderregung

$$\Phi_{err} = \text{konst}$$

Drehzahlgeregelte elektrische Antriebe im W- bis MW-Bereich werden vorzugsweise mit dieser Motorenart aufgebaut.

- Ersatzschaltbild

Bild 10 Ersatzschaltbild des fremderregten Gleichstromebenschlußmotors

Eingangsgrößen:

Ausgangsgrößen:

- Mathematischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen
- + allgemeingültig für den Arbeitsbereich

$$U_{kl} =$$

$$U_A =$$

$$M =$$

$$M_b =$$

$$P_{\text{mech}} =$$

+ Linearisierungsansatz

(in analoger Weise zu 3.1.1. aufzuschreiben)

- + statisch für einen festen Arbeitspunkt

$$U_{kl0} =$$

$$P_{\text{mech } 0} =$$

$$U_{AO} =$$

$$M_O =$$

statischer Zusammenhang zwischen Klemmspannung U_{k10} ,
mechanischer Wickelgeschwindigkeit (Drehzahl) $\Omega_{\text{mech } 0}$
und von der Maschine entwickeltem Drehmoment M_0 für
einen Arbeitspunkt

$$U_{k10} =$$

(17)

$$\Omega_{\text{mech } 0} =$$

Leerlauf: $M_w = 0; I_A = 0$

$$\Omega_{\text{mech } 0} =$$

$$\Omega_{\text{mech}}^* =$$

Belastung: $M_w \neq 0; I_A \neq 0$

$$\Omega_{\text{mech } 0} =$$

$$\Omega_{\text{mech } N} =$$

Warum entwickelt die fremderregte Gleichstromnebenschlußmaschine nur dann ein Drehmoment, wenn ein Belastungsmoment an der Welle angreift?

o Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinienfeld

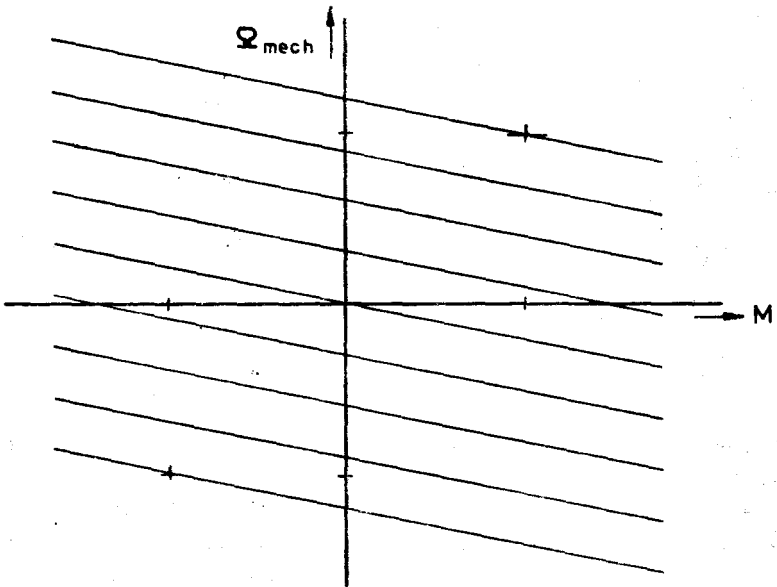


Bild 11: Ω_{mech} - M -Kennlinienfeld der fremderregten Gleichstromnebenschlußmaschine

Charakterisierung der Arbeitsbereiche

I. Quadrant:

II. Quadrant:

III. Quadrant:

IV. Quadrant:

Abhängigkeit der Arbeitspunkte ($M_0, \Omega_{\text{mech } 0}$) von $M_w = f(\Omega_{\text{mech}})$ bei Verstellung der Klemmenspannung U_{kl} .

$M = M_w(\text{sign } \Omega_{\text{mech}})$	→	Widerstandsmoment infolge trockener Reibung
$M = M_w = \text{konst.}$	→	aktives Moment
$M = M_w = k \Omega_{\text{mech}}$	→	Widerstandsmoment infolge viskoser Reibung

• Forderungen an das Stellglied bezüglich Strom- und Spannungsrichtung

Die vom technologischen Prozeß geforderten Arbeitspunkte im $\Omega_{\text{mech}}-M$ -Kennlinienfeld der Maschine bedingen die Strom- und/oder Spannungsrichtungen, die vom Stellglied realisiert werden müssen. Nachfolgend dienen die Richtungen von Ankerstrom und Ankerspannung im I. Quadranten als Bezugsrichtungen.

Betrieb im I. und II. Quadranten:

Betrieb im I. und III. Quadranten:

Betrieb im I., II. und III. Quadranten:

Betrieb im I. und IV. Quadranten:

Betrieb in allen 4 Quadranten:

Prinzipielle Schaltungsmöglichkeiten von Gleichspannungs-
stellglied und Gleichstrommotor.

o statische Steuerkennlinie

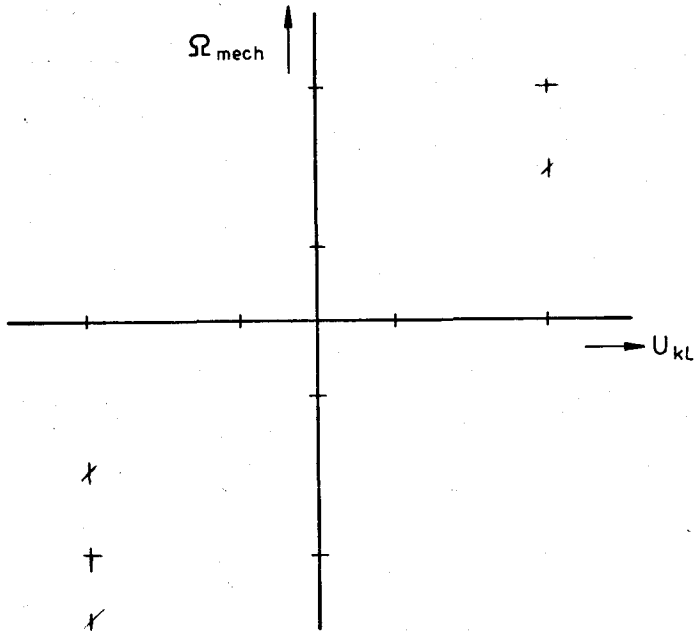


Bild 12: Statische Steuerkennlinie bei unterschiedlichen Belastungsarten

Leerlauf: $M = M_w = 0$

Belastung: $M = M_w \cdot (\text{sign } \Omega_{\text{mech}}) \rightarrow$ Reibungsmoment
(trockene Reibung)

$M = M_w = \text{konst.} \rightarrow$ aktives Last-
moment

Bestimmen Sie die Steuerkennlinie für ein Widerstandsmoment infolge viskoser Reibung ($k_{\text{mech}} \Omega_N = M_N$).

+ dynamisch für einen festen Arbeitspunkt

• anhand der Differentialgleichungen

$$u_{kl} =$$

$$u_A =$$

$$m =$$

$$m_b =$$

$$P_{\text{mech}} =$$

• anhand der Übertragungsfunktionen

$$\frac{i_A(p)}{u(p)} = \quad (18)$$

$$\frac{u_A(p)}{\omega_{\text{mech}}(p)} = \quad (19)$$

$$\frac{m(p)}{i_A(p)} = \quad (20)$$

$$\frac{\omega_{\text{mech}}(p)}{m_b(p)} =$$

oder

(21)

$$\frac{\omega_{\text{mech}}(p)}{m_b(p)} =$$

• anhand der Signalflußbilder der Elemente

• anhand des Signalflußbilder des Systems

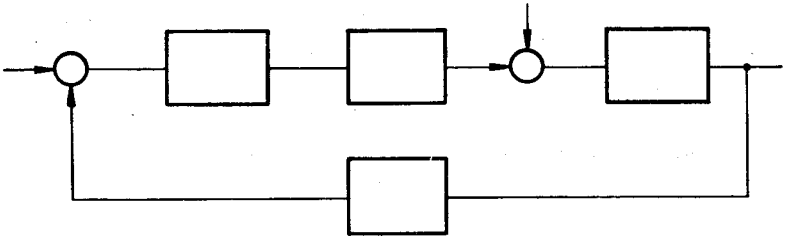


Bild 13: Vollständiges Signalflußbild des fremd-
erregten Gleichstromnebenschlußmotors
oder wenn $i_A(p)$ und $\omega_{\text{mech}}(p)$ nicht explizit interessieren.

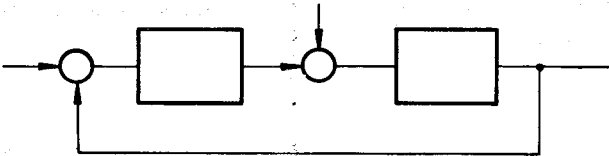


Bild 14: Vereinfachtes Signalflußbild des fremd-
erregten Gleichstromnebenschlußmotors

- Gewinnung interessierender UTF bei geschlossenen Strukturen und mehreren unabhängigen Eingangsgrößen aus dem Signalflußbild

Wegen der einfachen und übersichtlichen Handhabung ist die Herleitung interessierender UTF anhand des Signalflußbildes zu empfehlen. Hierbei ist die Gültigkeit des Superpositionsgesetzes zu beachten. Demzufolge können die Einflüsse von 2 oder mehreren unabhängigen, an verschiedenen Stellen der Struktur angreifenden Eingangsgrößen auf ein- und dieselbe Größe innerhalb der Struktur (Ausgangsgröße) getrennt voneinander berechnet und danach überlagert werden. Die voneinander getrennte Berechnung heißt, daß jeweils nur der Zusammenhang (UTF) zwischen der interessierenden Ausgangsgröße und einer unabhängigen Eingangsgröße zu erfassen ist. Die darüber hinaus vorhandenen unabhängigen Eingangsgrößen werden hierbei zu Null angenommen.

Schritte zur Herleitung der gewünschten UTF

- a. Entscheidung darüber, welche Größe im betreffenden Fall die systemunabhängige Eingangsgröße (Führungs- oder Störgröße) und welche die interessierende Ausgangsgröße darstellt.
- b. Aufstellung der Gleichungen für die Summierstellen. Es ist zu beachten, daß gegebenenfalls Summierstellen vorhanden sind, wo die unabhängigen Eingangsgrößen zu Null anzunehmen sind.
- c. In der Gleichung für jene Summierstelle, in der die interessierende unabhängige Eingangsgröße angreift, werden die übrigen Größen durch Ausdrücke ersetzt, die diese mit der interessierenden Ausgangsgröße verknüpfen.

Beispiel für die Herleitung einer Übertragungsfunktion anhand des Signalfußbildes der fremderregten Gleichstromnebenschlußmaschine.

1. Schritt: Festlegung von Ein- und Ausgangsgröße (zu a.))

Es soll der Zusammenhang zwischen u_{kl} und ω_{mech} in Form der Übertragungsfunktion ermittelt werden

$u_{kl}(p) \rightarrow$ Eingangsgröße; $m_w(p) = 0$

$\omega_{mech}(p) \rightarrow$ Ausgangsgröße;

2. Schritt: Aufstellung der Gleichungen für die Summierstellen (zu b.))

3. Schritt: Ersatz von $u(p)$ und $u_A(p)$ durch Beziehungen zu $\omega_{mech}(p)$ (zu c.))

$$\frac{u_A(p)}{\omega_{mech}(p)} = \quad ; \quad u_A(p) =$$

$$\frac{\omega_{mech}(p)}{u_{kl}(p) - u_A(p)} =$$

$$u(p) =$$

$$u_{kl}(p) =$$

$$\frac{\omega_{\text{mech}}(p)}{u_{kl}(p)} =$$

$$G\omega/u_{kl}(p) = \frac{\omega_{\text{mech}}(p)}{u_{kl}(p)} = \quad (22)$$

In analoger Weise erhält man

$$G_i/u_{kl}(p) = \frac{i_A(p)}{u_{kl}(p)} = \frac{1}{R_A} \frac{p^T \text{mech}}{1+p^T \text{mech}+p^2 \text{mech} T_A} \quad (23)$$

$$G\omega/m_w(p) = \frac{\omega_{\text{mech}}(p)}{m_w(p)} = - \frac{R_A}{(c_{\text{ferro}})^2} \frac{1+p T_A}{1+p^T \text{mech}+p^2 \text{mech} T_A} \quad (24)$$

$$G_i/m_w(p) = \frac{i_A(p)}{m_w(p)} = \frac{1}{c_{\text{ferro}}} \frac{1}{1+p^T \text{mech}+p^2 \text{mech} T_A} \quad (25)$$

anhand der Frequenzkennlinien

Von wesentlichem Interesse ist der Zusammenhang zwischen u_{kl} als unabhängige Eingangsgröße und ω_{mech} als Ausgangsgröße. Weitere interessierende Zusammenhänge lassen sich aufbauend auf diesem leicht finden.

Es soll nochmals vermerkt werden, daß immer mit den Asymptoten der Amplitudenfrequenzkennlinie gearbeitet und nur in Ausnahmefällen (beim Schwingungsglied) der exakte Verlauf benötigt wird.

Aus Zweckmäßigkeitsgründen unterscheidet man bei der Herleitung oben genannter Frequenzkennlinien 2 Fälle bezüglich der Wurzeln des Nenners der Übertragungsfunktion

$$G\omega/u_{kl}(p)$$

a) zwei reelle Wurzeln

b) ein konjugiert komplexes Wurzelpaar

Für beide Fälle gilt:

$$G(p) = \frac{\omega_{mech}(p)}{u_{kl}(p)} = \frac{1}{c\phi} \frac{1}{1+pT_{mech} + p^2T_{mech}^2A}$$

=

$$G(p) =$$

mit

$$p_1; p_2 =$$

Fall a

Für $T_{\text{mech}} \geq 4 T_A$ werden beide Wurzeln reell.
 Man setzt zweckmäßig

$$p_1 = \dots \quad \text{und} \quad p_2 = \dots$$

und erhält folglich

$$G_{u_{kl}}(p) = \dots \quad (26)$$

Das System verhält sich für $T_{\text{mech}} \geq 4 T_A$ wie eine Reihenschaltung von 2 PT_1 -Gliedern. Wenn die Zeitkonstanten T_I und T_{II} bekannt sind, lassen sich die Frequenzkennlinien leicht zeichnen.

$$T_I \quad ; \quad T_{II} \quad \text{für } T_{\text{mech}} > 10 T_A$$

Prüfen Sie den Sachverhalt durch Zeichnen der genauen und näherungsweise AFK für $T_{\text{mech}} = 10 T_A$!

Fall b

Für $T_{\text{mech}} < 4 T_A$ erhält man ein konjugiert komplexes Wurzelpaar

$$p_1; p_2 =$$

Es deutet auf die Schwingungsfähigkeit des Systems hin. Aufgrund der Analogie zur mechanischen Schwingungstechnik werden folgende Abkürzungen eingeführt:

$$p_1; p_2 = -\sigma_e \pm j\omega_e$$

mit

$$\omega_0 =$$

Eigenfrequenz des ungedämpften Systems

$$D =$$

Dämpfungsfaktor

$$\omega_e =$$

Eigenfrequenz des gedämpften Systems

Damit erhält man:

$$G(p) = \frac{1}{c \cdot \Phi_{\text{ferro}}} \cdot \frac{1}{1 + p \frac{2D}{\omega_0} + p^2 \frac{1}{\omega_0^2}} \quad (27)$$

Ein Koeffizientenvergleich liefert die Beziehungen zwischen D und ω_0 einerseits und T_A u. T_{mech} andererseits.

$$T_{\text{mech}} =$$

$$\omega_0 =$$

Die Frequenzgangbeziehung lautet nunmehr:

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

=

Für den Betrag erhält man:

$$|G(j\omega)| = \quad (28)$$

mit den Asymptoten

$$|G(j\omega)|_{\omega \rightarrow 0} = \quad |G(j\omega)|_{\omega \rightarrow \infty} =$$

und der Knickfrequenz

$$\omega_k = \omega_0 =$$

Für die Phasenbeziehung erhält man

$$\varphi(\omega) = \quad (29)$$

Für die übersichtliche Darstellung der AFK des Schwingungsgliedes stellen die Resonanzfrequenzen ω_R und das Verhältnis der Amplitude von Eingangs- und Ausgangsgröße im Resonanzfall $|G(j\omega_R)|$ wichtige Größen dar. $|G(j\omega_R)|$ ist der maximale Wert des Betrages des Frequenzganges im Bereich $0 \leq \omega < \infty$. Er stellt sich ein, wenn die sinusförmige Eingangsgröße Resonanzfrequenz besitzt.

$$|G(j\omega_R)| =$$

$$\omega_R =$$

Aus der Gleichung ω_R geht hervor, daß das System erst für $(1-2D^2) > 0$, d. h. $D < 1/\sqrt{2} = 0,71$ eine Resonanzfrequenz besitzt. Zum Unterschied hierzu zeigt die Sprungantwort des Schwingungsgliedes bereits für $D < 1$ ein Überschwingen.

Ein Vergleich der genauen und asymptotischen Darstellung der AFK zeigt, daß für $D > 0,35$ (d. h. $T_{\text{mech}} > 0,5 T_A$) die max. Differenz zwischen beiden < 4 dB beträgt. Man kann folglich im Bereich $1 \geq D \geq 0,3$ in guter Näherung mit den Asymptoten der Amplitudenfrequenzkennlinien arbeiten.

Wichtig ist weiterhin, daß die Phasenfrequenzkennlinie, die dem asymptotischen Verlauf der Amplitudenfrequenzkennlinie zugeordnet ist, außer für $D = 1$ eine Näherung darstellt. Der exakte Verlauf wird durch Gl. (29) bestimmt. Beide Kennlinien haben nur für $\omega = 0$, $\omega = \omega_0$ und $\omega = \infty$ die gleichen Werte.

Die Abweichungen beiderseitig von ω_0 besitzen Maxima, die mit abnehmendem D wachsen.

• anhand der Sprungantworten der mechn. Winkelgeschwindigkeit und des Ankerstromes bei den Eingangsgrößen Ankerklemmenspannung und Widerstandsmoment.

□ Gleichungen der SPA

▲ Eingangsgröße: $u_{kl}(t) = u_{klo} \mathcal{S}(t)$

$$\omega_{\text{mech}}(p) = \frac{u_{klo}}{p} G \omega / u_{kl}(p) \quad (G \omega / u_{kl}(p) \text{ lt. Gl. 22})$$

$$\omega_{\text{mech}}(p) =$$

$$\omega_{\text{mech}}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{u_{klo}}{p} G \omega / u_{kl}(p) \right\}$$

$$\omega_{\text{mech}}(t) =$$

$$\omega_{\text{mech}}(t) =$$

(32)

$$i_A(p) = \frac{u_{k10}}{p} G_{i/u_{k1}}(p) \quad (G_{i/u_{k1}}(p) \text{ lt. Gl. 23})$$

$$i_A(p) =$$

$$i_A(p) = \quad (33)$$

$$i_A(t) = \mathcal{Z}^{-1} \left\{ \frac{u_{k10}}{p} G_{i/u_{k1}}(p) \right\}$$

$$i_A(t) =$$

$$i_A(t) = \quad (34)$$

▲Eingangsgröße: $m_w(t) = m_{w0} \sigma(t)$

$$\omega_{\text{mech}}(p) = \frac{m_{w0}}{p} G_{\omega/m_w}(p) \quad (G_{\omega/m_w}(p) \text{ lt. Gl. 24})$$

$$\omega_{\text{mech}}(p) =$$

$$\omega_{\text{mech}}(p) = \quad (35)$$

$$\omega_{\text{mech}}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{m_{w0}}{p} G_{\omega/m_w}(p) \right\}$$

$$\omega_{\text{mech}}(t) =$$

$$\omega_{\text{mech}}(t) = \quad (36)$$

$$i_A(p) = \frac{m_{w0}}{p} G_{i/m_w}(p) \quad (G_{i/m_w}(p) \text{ lt. Gl. 25})$$

$$i_A(p) =$$

$$i_A(p) = \quad (37)$$

$$i_A(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{m_{w0}}{p} G_{i/m_w}(p) \right\}$$

$$i_A(t) =$$

$$i_A(t) = \quad (38)$$

Zeitlicher Verlauf der SPA

Den genauen zeitlichen Verlauf erhält man durch Auswertung der Gleichungen für $\omega_{\text{mech}}(t)$ und $i_A(t)$. Häufig ist von Interesse, wie sich der Verlauf der SPA bei Veränderung der Motorparameter ändert. Wesentliche Änderungen können erfahren:

das Massenträgheitsmoment I_e (durch Ankoppeln einer Arbeitsmaschine) $\rightarrow T_{\text{mech}} = \text{variabel}$

Die Ankerkreisinduktivität L_A (durch Vorschalten einer Glättungsdrosselpule bei Stromrichterspeisung) $\rightarrow T_A = \text{variabel}$

Es ergeben sich ausgehend von einem Arbeitspunkt gekennzeichnet durch U_{klo} , I_{Ao} , Ω_{mech} , M_{wo} folgende zeitliche Verläufe der SPA für u_{kl} als Eingangsgrößen

$T_A = \text{konst}$, T_{mech} variabel

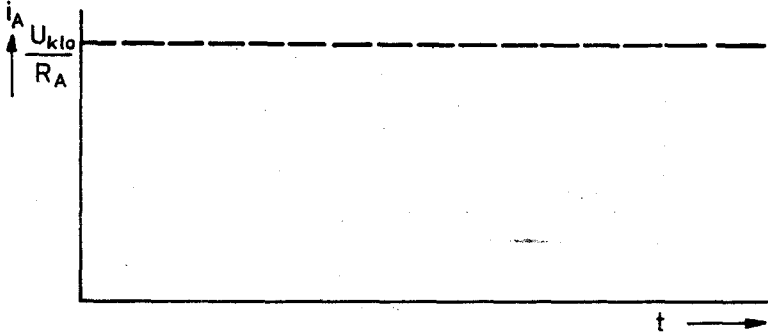


Bild 15 Sprungantworten für i_A (Parameter T_{mech})

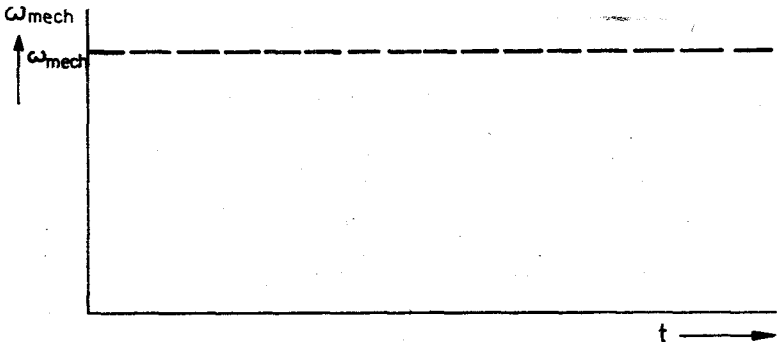


Bild 16 Sprungantworten für ω_{mech} (Parameter T_{mech})

T_A variabel, $T_{\text{mech}} = \text{konst}$

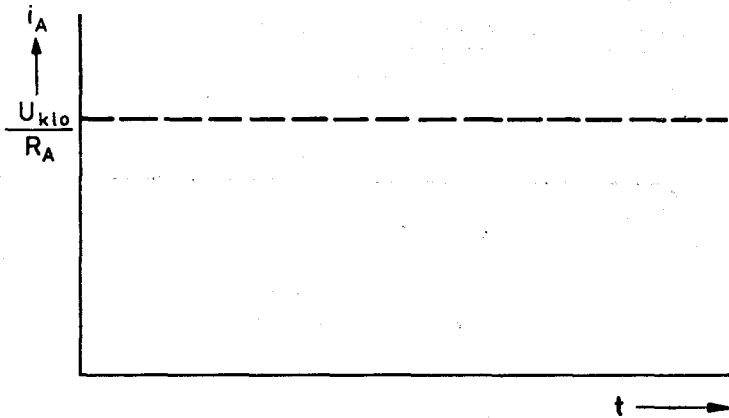


Bild 17 Sprungantwort für i_A (Parameter T_A)

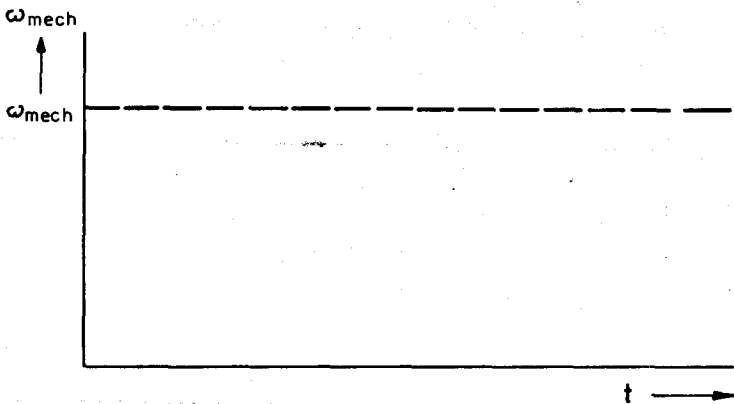


Bild 18 Sprungantwort für ω_{mech} (Parameter T_A)

• Ermittlung der Anfangs- und Endwerte der SPA

Vielfach ist nicht der gesamte Verlauf der SPA von Interesse. Es werden vielmehr nur Aussagen über den Beginn und das Ende des Ausgleichsvorganges benötigt. Diese erhält man durch Anwendung der Grenzwertsätze der Laplacetransformation auf die Gleichung der jeweiligen SPA und ihrer Ableitung im Laplaceunterbereich.

SPA von i_A bei Veränderung von u_{kl} :

$$\lim i_A(t) = \lim p \left\{ \frac{u_{klo}}{p} G_{i/u_{kl}}(p) \right\}$$

$$\begin{array}{ll} t \rightarrow 0 & p \rightarrow \infty \\ t \rightarrow \infty & p \rightarrow 0 \end{array}$$

Ergebnis:

$$\lim \frac{di_A(t)}{dt} = \lim p \cdot \left\{ p \frac{u_{klo}}{p} G_{i/u_{kl}}(p) \right\} \quad (39)$$

$$\begin{array}{ll} t \rightarrow 0 & p \rightarrow \infty \\ t \rightarrow \infty & p \rightarrow 0 \end{array}$$

Ergebnis:

(40)

Aussagen:

SPA von ω_{mech} bei Veränderung von u_{kl} :

$$\lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty}} \omega_{\text{mech}}(t) = \lim_{\substack{p \rightarrow \infty \\ p \rightarrow 0}} p \left\{ \frac{u_{klo}}{p} G_{\omega/u_{kl}}(p) \right\}$$

Ergebnis:

(41)

$$\lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty}} \frac{d\omega_{\text{mech}}(t)}{dt} = \lim_{\substack{p \rightarrow \infty \\ p \rightarrow 0}} p \left\{ p \frac{u_{klo}}{p} G_{\omega/u_{kl}}(p) \right\}$$

Ergebnis:

(42)

Aussagen:

Begründen Sie den waagerechten Anstieg von $\omega_{\text{mech}}(t)$ im Punkt $t = 0$!

Die Anfangs- und Endwerte der SPA von i_A und ω_{mech} bei Veränderung von m_N sind in analoger Weise zu ermitteln.

3.1.3.2. Besondere Gesichtspunkte für den Einsatz von Gleichstromebenschlußmotoren für automatisierte Elektroantriebe

- Neben den Forderungen, die bereits der Entwicklungsingenieur und der Konstrukteur der elektrischen Maschine zu erfüllen haben, existieren solche, die vom Projektierungsingenieur beim Einsatz derselben für eine spezifische Aufgabe erfüllt werden müssen.
- + Berücksichtigung der dynamischen Spannungsreserve zur Gewährleistung der uneingeschränkten Regeldynamik im gesamten Drehzahlstellbereich bei der Festlegung der Ankernennspannung
- + Einhaltung der zulässigen Änderungsgeschwindigkeiten des Ankerstroms zwecks Gewährleistung einer einwandfreien Kommutierung
 - durch Begrenzung der Amplitude des dem Gleichstrom im Ankerkreis überlagerten Wechselstromes bei Stromrichterspeisung mit einer zusätzlichen Reaktanz (Glättungsdrosselpule)
 - durch Begrenzung des bei Ausgleichsvorgängen auftretenden di_A/dt -wertes mit regelungstechnischen Maßnahmen.
- + Berücksichtigung der zusätzlichen Verlustleistung im Ankerkreis bei Stromrichterspeisung im Vergleich zur Speisung durch einen Gleichstromgenerator bei gleichem Drehmoment, d.h. bei gleichem Mittelwert des Ankerstromes. Die Beeinflussung ist möglich durch:
 - Wahl der Pulszahl der speisenden Stromrichteranordnung
 - Einfügen einer zusätzlichen Reaktanz in den Ankerkreis
- + Gewährleistung einer torsionssteifen und spielfreien mechanischen Kupplung mit der Arbeitsmaschine

- Sonderbauarten von Gleichstrommaschinen für Automatisierungszwecke
 - + Stellmotoren für dynamisch hochwertige Stellantriebe, insbesondere bei NC-Werkzeugmaschinen.
 - mit herkömmlichen aber besonders schlank ausgeführtem Läufer ($T_{\text{mech}} < T_{\text{mech normal}}$)
 - mit eisenlosem Zylinder- oder Scheibenläufer und gedruckter Ankerwicklung ($T_{\text{mech}} \ll T_{\text{mech normal}}$; $T_A \ll T_{A \text{ normal}}$)
 - + mit geschrägten Läufernuten zur Gewährleistung des Rundlaufs bis zu kleinsten Drehzahlen.
 - + mit kurzzeitig hoher Momenten- und Ankerstromüberlastbarkeit ($\cong 10$ fach) u. *Permanenterregung*.
 - + Motoren für Walzwerksantriebe
 - mit geblechtem Joch zur Erhöhung des zulässigen di_A/dt -wertes
 - mit Läufern, die hohen mechanischen Stoßbeanspruchungen standhalten.

3.2. Stellglieder

Sie haben die Aufgabe, den Energieaustausch (Energiefluß) zwischen dem elektr. Netz und dem Energiewandler zu steuern (s. Bild 1). Ihnen obliegt die zusätzliche Aufgabe der Energieumformung, wenn sie direkt zwischen Netz und Energiewandler geschaltet sind. In diesem Fall ist ihr Wirkungsgrad von besonderer Wichtigkeit.

Wesentliche elektrotechnische Stellglieder

<u>Art des Stellgliedes</u>	<u>W_{zu}</u>	<u>W_{ab}</u>
elektr. Generator	mech.	elektr.
Stromrichteranordnung		
netzgelöscht	elektr.	elektr.
selbstgelöscht	elektr.	elektr.
Stelltransformator	elektr.	elektr.

Es sind desweiteren eine Vielzahl von Kombinationen möglich.

3.2.1. Fremderregter Gleichstromnebenschlußgenerator (Steuer-generator)

Sie befinden sich in großem Umfang im praktischen Einsatz in Form von Leonard- und Ilgnerumformern und zum Aufbau anderweitiger selbständiger Gleichstromnetze.

- Leonardumformer

- Umformer mit Diesel-
antrieb

- Ilgnerumformer

Unter welchen Bedingungen ist der Einsatz eines Schwungrades sinnvoll?

- Ersatzschaltbild

Bild 22 Ersatzschaltbild des fremderregten Gleichstromgenerators

R und L des Generatorankers werden dem angeschalteten Verbraucher zugehörig betrachtet.

Eingangsgröße:

Ausgangsgröße:

- Mathematischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen.

+ allgemeingültig für den Arbeitsbereich:

$$U_{kl} =$$

$$U_A =$$

$$U_{err} =$$

$$\phi_{err} =$$

$$P_{el} =$$

+ allgemeingültig für einen festen Arbeitspunkt:

$$(U_{klo} + u_{kl}) =$$

$$(U_{Ao} + u_A) =$$

$$(\phi_{erro} + \phi_{err}) =$$

$$(U_{erro} + u_{err}) =$$

$$(P_{elo} + P_{el}) =$$

†statisch für einen festen Arbeitspunkt:

$$U_{klo} =$$

$$U_{Ao} =$$

$$\phi_{erro} =$$

$$U_{erro} =$$

$$P_{elo} =$$

Es ist der Zusammenhang zwischen U_{kl} und U_{err} in Form der stationären Steuerkennlinie von Interesse. Er folgt aus den zuvor angegebenen Gleichungen.

$$U_{kl} = U_A = \quad (48)$$

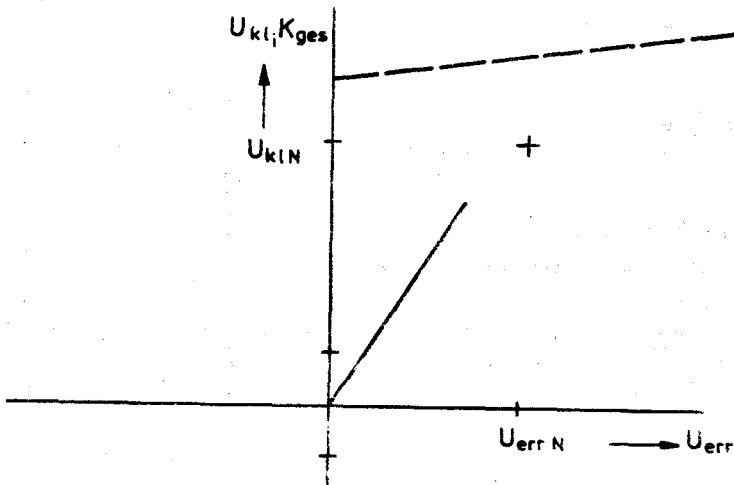


Bild 23: Steuerkennlinie des fremderregten Gleichstromgenerators

Die Steuerkennlinie hat den Verlauf einer Hysterese-
schleife, die durch die konstruktive Gestaltung des magne-
tischen Kreises für das Hauptfeld bestimmt ist. Sie läßt
erkennen:

- die starke Abhängigkeit des Übertragungsfaktors
 K_{ges} vom Arbeitspunkt U_{erro}
 - die Zweideutigkeit des Zusammenhangs zwischen
 U_{err} und U_{kl} in Abhängigkeit von der Vorgeschichte des
Erregerkreises
- + dynamisch für einen festen Arbeitspunkt
anhand der Differentialgleichungen

$$u_{kl} =$$

$$u_A =$$

$$\phi_{err} =$$

$$u_{err} =$$

$$P_{el} =$$

- + anhand der Übertragungsfunktionen

$$\frac{u_A(p)}{\phi_{err}(p)} = \frac{P_{el1}(p)}{i_A(p)} =$$

(49)

$$\frac{\phi_{\text{err}}(p)}{i_{\text{err}}(p)} =$$

$$\frac{P_{e12}(p)}{u_A(p)}$$

$$\frac{i_{\text{err}}(p)}{u_{\text{err}}(p)} =$$

(49)

+ anhand der Signalflußbilder der Elemente

† anhand des Signalflußbildes des Systems

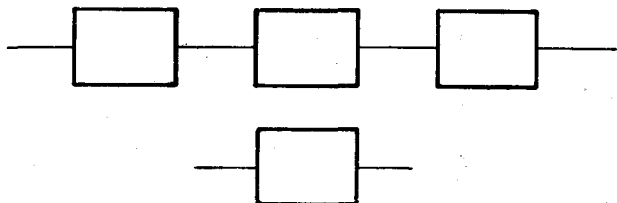


Bild 24 Signalflußbild des fremderregten Gleichstromgenerators

- Vor- und Nachteile des Steuergenerators

† Vorteile

- Kann den Ankerstrom ohne zusätzliche Maßnahmen und ohne Wechsel der Polarität der Ankerspannung in beiden Richtungen führen, d. h. neben dem Generatorbetrieb ist der Motorbetrieb möglich. Bei welcher Generatorantriebsart ist der Motorbetrieb des Generators nicht zulässig?
- Umkehr der Polarität der Ankerspannung (kontaktlos) durch Umkehr der Polarität der Erregerspannung.
- Möglichkeit des Aufbaus eines autonomen Gleichspannungsnetzes.
- Geringe Netzzrückwirkungen in Verbindung mit Ilgner- und Leonardumformer

+ Nachteile

Geringer Wirkungsgrad, vergleichsweise große dynamische Trägheit wegen der Größe von T_{err} , Fundament für die Aufstellung, regelmäßige Wartung der Lager, Bürsten und des Kommutators, hoher Materialaufwand.

- Bereitstellung der steuerbaren Erregerspannung

+ mittels steuerbarer Stromrichteranordnungen für eine oder bei Bedarf für beide Polaritäten der Erregerspannung durch Umpolung (mechanisch) oder Gegenparallelschaltung von 2 Stromrichteranordnungen.

+ Stellwiderstand mit Mittelabgriff oder kombiniert mit einer Einrichtung zur mechanischen Umpolung

- Ausblick auf den künftigen Einsatz

Der stetige Rückgang des Preises für Thyristoren und Dioden ist die Ursache dafür, daß Steuergeneratoren nur noch in Ausnahmefällen als Stellglieder in neu zu errichtenden automatisierten Anlagen eingesetzt werden. Sie sind jedoch z. Z. noch in großem Umfang im Einsatz.

3.2.2. Netzgelöschte Stromrichteranordnungen einschließlich Zündwinkelsteuerung

- Vorbemerkungen

Es erfolgt hier eine Beschränkung auf Anordnungen, die vornehmlich zur Umformung von Wechselspannung in Gleichspannung dienen. Sie gestatten demzufolge bei Vorhandensein eines Wechselspannungsnetzes (ein- oder dreiphasig) den Aufbau eines, meist autonomen, Gleichspannungsnetzes. Dieses bietet bei Einsatz entsprechender Stromrichteranordnungen folgende Möglichkeiten:

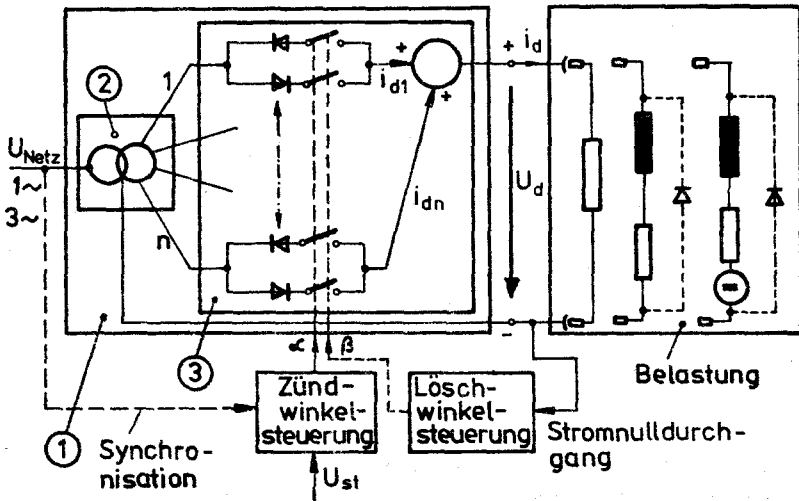
+ Steuerung der Gleichspannung im Bereich

$$- U_{do} \approx U_d \approx U_{do}$$

+ Energiefluß vom Wechselspannungsnetz in das Gleichspannungsnetz und umgekehrt (bei aktiver Last)

An welche Bedingung ist der Energiefluß vom Gleichspannungsnetz in das Wechselspannungsnetz gebunden?

- Struktur einer netzgelöschten Stromrichteranlage



- ① Stromrichteranlage bestehend aus ③ und ②
- ② Stromrichtertransformator (Spannungsanpassung, Anpassung der Phasenzahl, Kurzschlußstrombegrenzung)
- ③ Ventilanordnung einschließlich Schutzbeschaltung derselben

Bild 25 Struktur einer netzgelöschten Stromrichteranlage einschließlich Ansteuerung und Belastung

- Bemerkungen zur Wiederholung

† Anschluß an das Wechselstromnetz

- einphasig: für $P_{el} \leq 20 \text{ kW}$. Eine Ausnahme bilden Stromrichteranlagen für elektrische Triebfahrzeuge mit P_{el} im Bereich mehrerer MW.
- dreiphasig: für $P_{el} > 20 \text{ kW}$ (Richtwert!)

- o mittels Stromrichtertransformator, wenn neben der Kurzschlußstrombegrenzung folgende Gesichtspunkte eine Rolle spielen:
 - ▲ Realisierung eines vorgegebenen Verhältnisses Netzspannung zu Gleichspannung, das vom schaltungsbedingten Verhältnis ohne Transformator abweicht
 - ▲ Bereitstellung eines Wechselstromnetzes mit einer Phasenzahl > 3 (z. B. zum Anschluß einer 6phasigen Mittelpunktschaltung)
 - ▲ Bereitstellung von zwei galvanisch getrennten 3phasigen Netzanschlüssen (z. B. für die Kreuzschaltung)
 - ▲ Gegenseitige Verdrehung der Phasenanlagen von 2 oder mehreren parallelgeschalteten Teilstromrichtern zur Unterdrückung diskreter Netzstromoberwellen durch Phasenopposition
 - o mittels Kurzschlußdrosseln, wenn lediglich eine Kurzschlußstrombegrenzung erforderlich ist (di_T/dt -Begrenzung)
- + Ventilanordnungen für die verschiedenen Schaltungen werden in der Lehrveranstaltung "Elektronische Energieumformung" behandelt. Von besonderer Bedeutung sind die sog. Brückenschaltungen.
- + Steuermechanismus
- Die Steuerung des Gleichspannungsmittelwertes erfolgt durch Veränderung des Verhältnisses der Dauer von Sperr- zu Durchlaßphase der Ventile. Die Durchlaßphase wird eingeleitet durch einen Zündimpuls, dessen zeitliche Lage innerhalb eines festen Zeitintervalls (Periode der Netzspannung) durch eine Steuerspannung festgelegt wird. Sie endet, wenn der Strom durch das betreffende Ventil infolge des zeitlichen Verlaufs der Anoden-Katoden-Spannung den Wert Null erreicht. Die Löschung wird primär durch die Netzwechselspannung bewirkt.

+ Art der Belastung

Die Vielfalt der elektrotechnischen Einrichtungen, die mittels netzgelöchter Stromrichteranordnungen betrieben werden, läßt sich nahezu ausnahmslos auf einige prinzipielle Ersatzschaltungen zurückführen. Diese sind auf vorstehendem Bild angegeben.

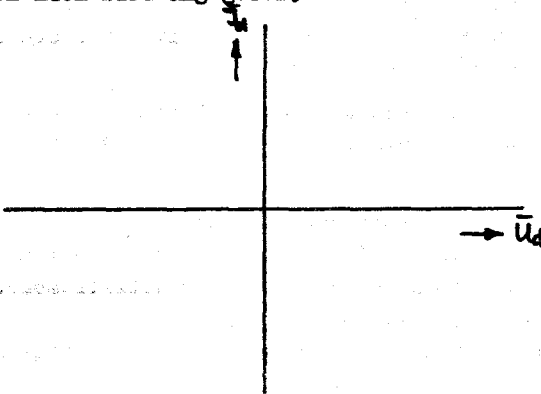


Bild 26 Betriebsbereiche einer netzgelöchten Stromrichteranordnung

Betriebsbereiche charakteristischer Stromrichteranordnungen

I. oder III. Quadrant

I. und II. (III. und IV. Quadrant)

I., II., III. und IV. Quadrant

Der stationäre Betrieb im II. und IV. Quadranten ist nur möglich, wenn die Belastung aktiv ist, d. h. eine Gleichspannungsquelle darstellt, deren Klemmenspannung größer als die Stromrichter Ausgangsspannung im Wechselrichterbetrieb ist.

- Mathematischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen

Die exakte Beschreibung des Übertragungsverhaltens ist nur möglich mit Hilfe der Theorie der nichtlinearen Abtastsysteme. Eine näherungsweise mathematische Beschreibung, die vielen praktischen Bedürfnissen genügt, ist möglich anhand der stationären Steuerkennlinien und einer näherungsweise Berücksichtigung des dyn. Verhaltens. Der Gültigkeitsbereich dieser Näherung ist abhängig vom Verhältnis Frequenz der Zündwinkeländerung zu Pulsfrequenz der Ausgangsgleichspannung. Die Näherung liefert umso genauere Ergebnisse, je kleiner dieses Verhältnis ist. Ihre Verwendung wird mehr empfohlen, wenn das Verhältnis $> 0,5$ ist.

† Die statischen Steuerkennlinien der Stromrichteranordnung.

Die Vielfalt der Steuerkennlinien wird durch die Vielfalt der möglichen netzgelöschten Stromrichteranordnungen und die verschiedenen Belastungsarten bestimmt. Es sollen hier nur vollgesteuerte Schaltungen mit $p \geq 2$ behandelt werden, die durch folgende Merkmale in 2 Klassen einzuteilen sind:

- a) rein ohmsche Belastung ($X_k = 0$) X_k - Reaktanz im Gleichstromkreis
- b) rein induktive Belastung und Gegenspannung ($R_k = \infty$) R_k - Widerstand im Gleichstromkreis
- c) lückenloser Gleichstrom

Bei lückenlosem Gleichstrom und Vernachlässigung des induktiven Gleichspannungsabfalls beschreibt folgende Gleichung die stationäre Steuerkennlinie für die unter a) und b) genannten Lastarten.

$$U_{dcl} = \quad (50)$$

Der Verlauf ist in nachfolgendem Bild (Kurve a) angegeben.

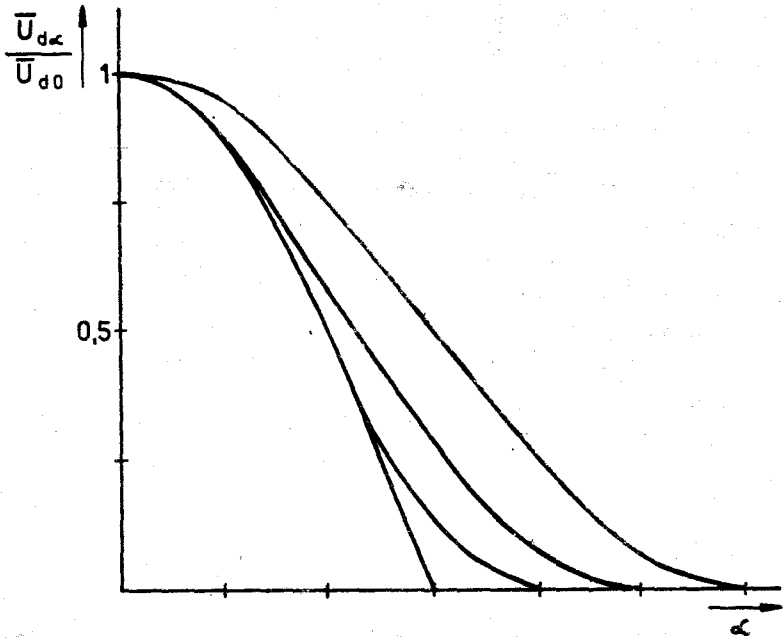


Bild 27 Steuerkennlinien einer netzgelöschten Stromrichteranordnung

Die Belastungsart und die Pulszahl der Schaltung schränken die Gültigkeit der Gl. (50) für die stationäre Steuerkennlinie auf folgende Zündwinkelbereiche ein:

a) rein ohmsche Belastung

$$p = 2; \text{ nur für } \alpha = 0$$

$$p = 3; 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$$

$$p = 6; 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$$

b) rein induktive Belastung mit $R_k = 0$ und Gegenspannung

$$2 \leq p \leq \infty; 0 \leq \alpha \leq 180^\circ$$

(Der Verlauf im IV. Quadranten ist auf Bild 27 nicht dargestellt).

• lückender Gleichstrom

Für lückenden Gleichstrom und rein ohmsche Belastung gilt folgende Gleichung für die stationäre Steuerkennlinie

$$\bar{U}_{d\alpha} = \quad (51)$$

Der Verlauf ist in vorstehendem Bild (Kurven $b_1 - b_3$) angegeben. Es gilt:

$$\text{Kurve } b_1 : p = 6; \frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$$

$$\text{Kurve } b_2 : p = 3; \frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{5\pi}{6}$$

$$\text{Kurve } b_3 : p = 2; 0 \leq \alpha \leq \pi$$

Prüfen Sie diese Angaben durch Aufzeichnen der zeitlichen Verläufe von $u_d(t)$ u. $i_d(t)$ nach!

Beide Kennlinienabschnitte für lückenlosen und lückenden Gleichstrom von Schaltungen gleicher Pulszahl und rein ohmsche Belastung schließen stetig aneinander an und ergeben die für den gesamten Aussteuerbereich gültige statische Steuerkennlinie.

Die beiden Kennlinien für gleiche Pulszahl, aber unterschiedliche Lastart (rein ohmsche Belastung und rein induktive Belastung plus Zusatzspannung, begrenzen ein Gebiet, in dem die statischen Steuerkennlinien für die gleiche Stromrichteranordnung, aber mit anderen Parametern das Lastzweiges ($R_k > 0$; $X_k < \infty$) liegen.

+ Die statische Steuerkennlinie der Zündwinkelsteuereinrichtung

Für die am häufigsten anzutreffenden Steuergeräte gilt folgende Gleichung für die statische Steuerkennlinie.

$$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = \quad (52)$$

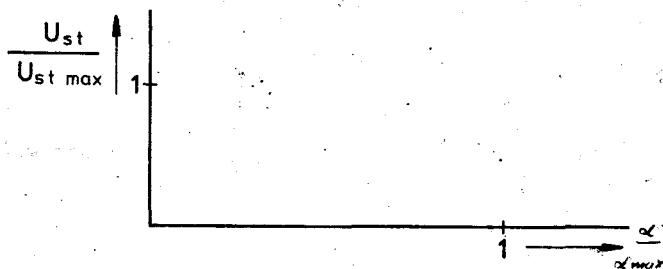


Bild 28 Steuerkennlinien der Zündwinkelsteuereinrichtung

Dieser Verlauf wird deswegen gerätetechnisch realisiert, damit beim Zusammenwirken mit der Stromrichteranordnung durch Vergrößerung der Steuerspannung u_{st} eine Vergrößerung der Ausgangsgleichspannung u_d erreicht wird.

+ Übertragungsfunktion der netzgelöschten Stromrichteranordnung

Wie bereits erwähnt, kann das dynamische Übertragungsverhalten im Rahmen der Theorie linearer Regelungen nur näherungsweise mathematisch beschreiben werden. Folgende Näherungen, die sich auf kleine Aussteuerungen um einen durch α_0 gekennzeichneten Arbeitspunkt beziehen, sind gebräuchlich.

• P-Glied

$$\frac{\bar{u}_{da}(p)}{\alpha(p)} = \quad (53)$$

$$\frac{\bar{u}_{da}(p)}{\alpha(p)} = \quad (54)$$

Der Gültigkeitsbereich bezüglich α_0 ist identisch mit dem für die statische Steuerkennlinie bei lückenlosem bzw. lückendem Strom. Die Anwendung wird empfohlen für $0 \leq \Omega_{da} \leq 0,5\Omega_p$, wobei Ω_{da} die maximale Frequenz der Zündwinkeländerung mit Ω_p die Pulsfrequenz der Ausgangsgleichspannung der Stromrichteranordnung ist.

o T_t -Glied (Achtung! Nichtphasenminimum-Glied):

$$\frac{\bar{u}_{d\alpha}(p)}{\alpha(p)} = \quad (55)$$

$$\frac{\bar{u}_{d\alpha}(p)}{\alpha(p)} = \quad (56)$$

Der Gültigkeitsbereich bezüglich α_0 ist der gleiche wie bei Beschreibung durch ein P-Glied. Die Anwendung wird empfohlen bis $\Omega_d \leq \frac{1}{T_{ters}}$, wobei T_{ters} die mittlere statistische Totzeit,

d. h. die mittlere statistische Differenz zwischen dem Zeitpunkt der Zündwinkeländerung und der damit korrelierenden Änderung der Ausgangsgleichspannung ist. Es gilt:

$$0 \leq T_t \leq \frac{1}{\sigma_p}$$

$$T_{ters} = \frac{1}{2\sigma_p}$$

p	2	3	6
T_{ters}/ms	5	3,3	1,6

o PT₁-Glied:

$$\frac{\bar{u}_{da}(p)}{\alpha(p)} = \quad (57)$$

$$\frac{\bar{u}_{da}(p)}{\alpha(p)} \quad (58)$$

Es gelten die gleichen Einschränkungen wie beim T_t-Glied. Mit der Näherung durch ein T_t-Glied oder ein PT₁-Glied wird der netzgelöschten Stromrichteranordnung eine zu große Trägheit zugeordnet. Es wird empfohlen, mit der Näherung durch ein P-Glied zu arbeiten.

+ Übertragungsfunktion der Zündwinkelsteuereinrichtung

Ausgehend von der Gleichung für die statische Steuerkennlinie und unter Berücksichtigung einer meist vorhandenen geringen, gerätetechnisch bedingten Verzögerung zwischen Ein- und Ausgangssignal, gilt:

$$\frac{\alpha(p)}{u_{st}(p)} = \quad (59)$$

Für hochwertige Steuergeräte ist erfahrungsgemäß $0 \leq T_k \leq 3$ ms. Genaue Werte sind durch Messung zu ermitteln oder beim Hersteller zu erfragen.

+ Übertragungsfunktion von Stromrichteranordnung (als P-Glied) und Ansteuereinrichtung

$$\frac{\bar{u}_{d\alpha}(p)}{u_{st}(p)} = \quad (60)$$

$$\frac{\bar{u}_{d\alpha}(p)}{u_{st}(p)} = \quad (61)$$

+ Signalflußbild

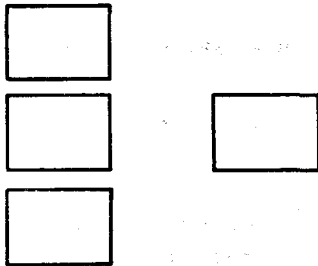


Bild 29 Signalflußbild einer netzgelöschten Stromrichteranordnung einschließlich Zündwinkelsteuerung (Näherung!)

Es sind bei der Anwendung die zuvor gemachten Einschränkungen zu beachten!

3.3. Einrichtungen zur Umsetzung des Istwertes einer Regelgröße in ein für die Informationsverarbeitung geeignetes elektrisches Signal (Istwertgeber)

3.3.1. Vorbemerkungen

- Aufgaben

+ Erfassung des Informationsparameters der Regelgröße (z. B. Drehzahl, Temperatur)

+ Umwandlung desselben in einen äquivalenten Informationsparameter eines elektrischen Signalträgers.

In analogen Regelkreisen wird die elektronische Informationsverarbeitung fast immer auf der Basis eingepprägter Gleichspannungen oder Gleichströme als Signalträger durchgeführt.

+ Der Informationsparameter einer Gleichspannung oder eines Gleichstromes ist der jeweilige vorzeichenbehaftete Wert.

Im RGW sind folgende Bereiche für den Informationsparameter vereinbart:

- eingepprägte Spannungen: ± 10 V
- eingepprägte Ströme : ± 5 mA

Diese Festlegung ist neben der über die Belastbarkeit des Ausgangs der Geräte eine wichtige Voraussetzung für ihre Zusammenschaltbarkeit.

Die Regelung erfolgt immer auf der Basis von Differenzen gleichartiger Informationsparameter gleichartiger Signalträger, in die Sollwert und Istwert einer Regelgröße umgesetzt worden sind.

- + Die Genauigkeit der Regelung wird anhand der sich selbsttätig einstellenden Regelgröße (z. B. Drehzahl, Temperatur) im Vergleich zu ihrem Sollwert beurteilt. Die mit einem Regelkreis erzielbare Genauigkeit wird wesentlich von der Umsetzung des Istwertes der Regelgröße in ein elektrisches Signal bestimmt.
- Forderungen an die technischen Einrichtungen zur Umsetzung des Istwertes einer Regelgröße in ein elektrisches Signal, gekennzeichnet durch Signalträger und Informationsparameter. Dieses Signal wird künftig als Istwert bezeichnet.
- + Linearität und Eindeutigkeit im Arbeitsbereich

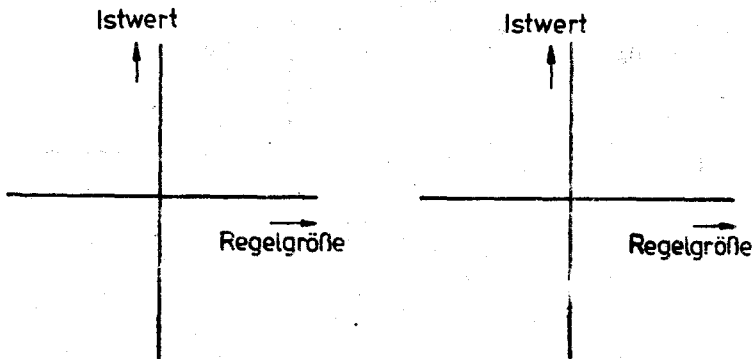


Bild 30 Ideale und reale Kennlinien von Istwertgebern

†Zeitverzögerung in Abhängigkeit vom Frequenzbereich der Regelgröße.

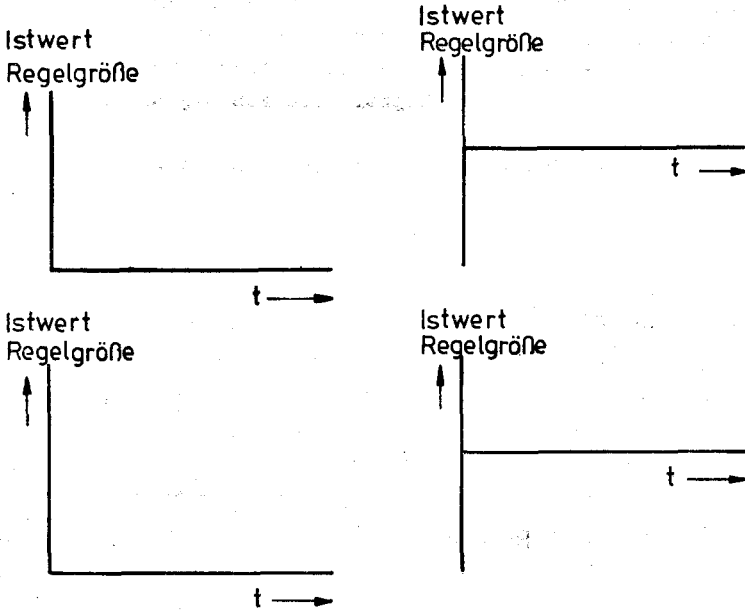


Bild 31 Ideales und reales dynamisches Verhalten von Istwertgebern

+ Unabhängigkeit der Umsetzung von systembedingten Störeinflüssen (z. B. Oberwellen)

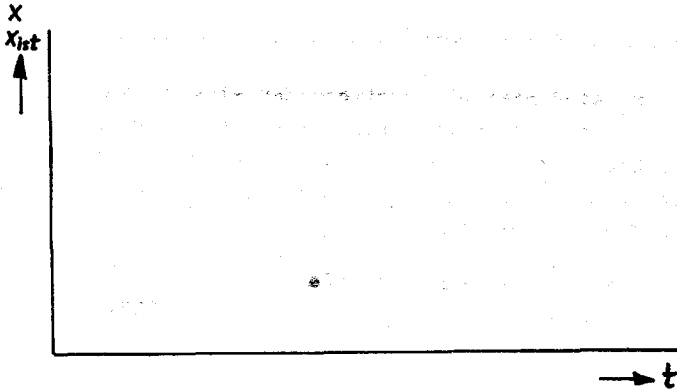


Bild 32: Einfluß von Störungen auf das Übertragungsverhalten von Istwertgebern

- + Unabhängigkeit von äußeren Störeinflüssen, z. B. Schwankungen und Verzerrung der Versorgungsspannung, Lose in mech. Verbindungen, Verschmutzung, Temperaturschwankungen, Erschütterungen.
- + Kopplung der Umsetzung mit der Bereitstellung einer für die störungsfreie Weiterleitung und -verarbeitung des Istwertes ausreichenden elektrischen Leistung.
- + Potentialtrennung bei Regelgrößen elektrischer Natur zwischen Leistungskreis und elektronischer Informationsverarbeitung.

3.3.2. Einrichtungen zur Umsetzung der Regelgröße Drehzahl oder mechanische Winkelgeschwindigkeit in eine Gleichspannung

Von Bedeutung sind hier alle rotierenden elektrischen Maschinen, die im Generatorbetrieb arbeiten können und dabei eine Spannung erzeugen, von der mindestens ein Parameter drehzahlabhängig ist. Generatoren zu diesem Zweck werden als Tachogeneratoren bezeichnet.

- Gleichung der statischen Kennlinie

$$U_{\text{wist}} = \quad (62)$$

$$U_{\text{wist}} =$$

- Übertragungsfunktion

$$\frac{u_{\text{wist}}(p)}{\omega_{\text{mech}}(p)} = \quad (63)$$

T_g ist die Zeitkonstante einer eventuell erforderlichen Glättungseinrichtung.

Bei der Ankupplung von Tachogeneratoren an die Welle, deren Drehzahl als Istwert der Regelgröße verwendet werden soll, ist zu beachten, daß diese torsionssteif, zentrisch und schwingungsfrei erfolgt. Anderenfalls treten unerwünschte Oberschwingungen in der Ausgangsspannung der Tachogeneratoren auf.

Zur Anpassung des Gleichspannungswertes an die elektronische Informationsverarbeitung sind vielfach Spannungsteiler erforderlich. Zur Dämpfung der Amplitude von Oberwellen in der Ausgangsspannung müssen mitunter Filter nachgeschaltet werden. Sie sind nur dann vertretbar, wenn die Betriebsfrequenz der Regelung wesentlich niedriger als die Frequenz der Oberwellen ist.

3.3.3. Einrichtungen zur Umsetzung der Regelgröße Gleichstrom in eine Gleichspannung

Hierzu eignen sich alle elektrotechnischen Einrichtungen, denen das Prinzip des Shunts oder ein Stromwandlerprinzip zugrunde liegt.

Bild 33 Prinzipschaltung eines magnetischen Gleichstromwandlers

- Gleichung der statischen Kennlinie

$$U_i \text{ ist } = \quad (64)$$

$$U_i \text{ ist } =$$

- Übertragungsfunktion

$$\frac{u_i \text{ ist}(p)}{I_d(p)} \quad (65)$$

T_{gi} ist die Zeitkonstante einer erforderlichen Glättungseinrichtung.

Beim magnetischen Gleichstromwandler spielen folgende Störeffekte eine Rolle:

- + periodische Spannungseinbrüche (Zwickel) in der Ausgangsspannung infolge der endlichen Impedanz im Arbeitskreis. Abhilfe durch Tandemschaltung von 2 Einfachwandlern.
- + Sättigungseffekt bei hohen Gleichströmen infolge des endlichen Bürdenwiderstands und der endlichen Amplitude der Arbeitswechselspannung. Keine Umsetzung von Gleichstromspitzen großer Amplitude möglich.
- + Aufnahme eines endlichen Magnetisierungsstromes bei $\bar{I}_d=0$ stört die Linearität bei kleinen Gleichströmen - keine Eignung für Nullstromerfassung zu Schutzzwecken.

3.3.4. Weitere Arten von Istwertgebern

Zum Aufbau von Regelkreisen, in denen Einrichtungen der energieorientierten Elektrotechnik eine wesentliche Rolle spielen, ist die Umsetzung weiterer physikalischer und technischer Größen (z. B. Temperatur, Druck, Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Winkel, Frequenz, Phasenverschiebung) in ein elektrisches Signal von Bedeutung. Im Rahmen der Vorlesung kann hierauf nicht näher eingegangen werden.

3.4. Umsetzung des Sollwertes einer Regelgröße in ein elektrisches Signal (Sollwertgeber)

Bei der Umsetzung des Sollwertes einer Regelgröße in ein elektrisches Signal sind folgende 3 Fälle zu unterscheiden:

- Der Regelkreis wird von Hand geführt. Hier erfolgt die Sollwertvorgabe von Hand mit Hilfe von Potentiometern in Spannungsteilerschaltung, die von stabilisierten Gleichspannungsquellen gespeist werden. Die Genauigkeit der Einstellung des Sollwertes hängt vom Auflösungsvermögen des Potentiometers ab.
- Der Regelkreis wird von einer physikalischen Größe geführt, die z. B. Regelgröße eines anderen Regelkreises ist (Drehzahlregelung bei einer Papiermaschine oder bei einem mehrgerüstigen Drahtwalzwerk). Hier werden zur Sollwertvorgabe die gleichen Einrichtungen wie zur Umsetzung des Istwertes einer Regelgröße in ein elektrisches Signal eingesetzt.

- Der Regelkreis wird von einem übergeordneten Steuerungssystem geführt, z. B. von einem überlagerten Regelkreis oder einem Prozeßrechner. Hier erfolgt die Sollwertvorgabe mit elektronischen Einrichtungen, z. B. Operationsverstärkern, D-A-Umsetzern. Sie müssen die für sie zutreffenden Forderungen erfüllen, die eingangs in diesem Abschnitt zusammengestellt worden sind.

3.5. Anpassungselemente

Die Überlegungen beim Entwurf eines Regelkreises - bestehend aus Regeleinrichtung und Regelstrecke - müssen darauf gerichtet sein, daß in der zugehörigen Aufgabenstellung geforderte stationäre und dynamische Verhalten zu realisieren.

Gezielte Veränderungen des Verhaltens des Regelkreises sind vielfach nur möglich durch Veränderung der Parameter der Regeleinrichtung, wobei der Bereich, in dem Veränderungen möglich sind, sehr wesentlich von den Parametern der Regelstrecke bestimmt wird.

Die Regeleinrichtung besteht bei einem einschleifigen Regelkreis aus dem Sollwertgeber, dem Istwertgeber, dem Soll-Istwert-Vergleich und einem sogenannten Anpassungselement. Sie arbeitet gewöhnlich auf kleinem Leistungsniveau (mW). Die Ergänzung der Regelstrecke zu einem Regelkreis, der die gestellten Forderungen erfüllt, kann relativ leicht durch eine geeignete, die Struktur und die Parameter betreffende Auslegung des Anpassungselements erreicht werden. Anpassungselemente in analogen stetigen Regelkreisen sind beschaltete Gleichstromdifferenzverstärker (als Regelverstärker bezeichnet) und passive Korrektornetzwerke.

3.5.1. Regelverstärker

Das Grundbauelement derartiger Regelverstärker ist der mehrstufige, gegengekoppelte Gleichstromdifferenzverstärker. Die galvanische Kopplung der einzelnen Verstärkerstufen gestattet die Verstärkung von Eingangsspannungsdifferenzen bis herab zur Frequenz Null.

Durch Beschaltung des Eingangs- und Rückführzweiges mit geeigneten RC-Netzwerken wird das gewünschte Übertragungsverhalten des Regelverstärkers realisiert.

- Ersatzschaltbild

Unter Vernachlässigung sämtlicher Störeinflüsse und Annahme linearer Zusammenhänge gilt das nachfolgende Ersatzschaltbild

Bild 34 Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Regelverstärkers

Eingangsgrößen:

Ausgangsgrößen:

- Mathematischer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen bei Voraussetzung der Linearität im gesamten Arbeitsbereich.

$$u_a(p) =$$

$$u_{e1}(p) =$$

$$u_{e2}(p) =$$

$$u_a(p) =$$

$$i_o(p) =$$

$$\frac{u_o(p)}{R_o}$$

$$\frac{u_{e1}(p)}{Z_{11}(p)} = \frac{u_{e2}(p)}{Z_{12}(p)}$$

(66)

Im Frequenzbereich $0 < \omega < \omega_{k1}$ kann $G_v(p) = V_0$ gesetzt werden. Wegen $V_0 > 10^4$, d. h. $V_0 \rightarrow \infty$ erhält man:

(67)

Für den Fall einer Eingangsgröße, d. h. $u_{e2}(p) = 0$ folgt:

(68)

Für den Fall $Z_{11}(p) = Z_{12}(p)$ folgt:

(69)

Die Interpretation von Gl. (65) läßt erkennen, daß das Übertragungsverhalten eines Regelverstärkers mit idealem Gleichstromdifferenzverstärker ($G_v(p) \rightarrow \infty$) nur von den komplexen Beschaltungswiderständen abhängig ist.

	z_1	z_2	$u_a(p)/u_e(p)$	Sprungantwort
P-Verhalten				
I-Verhalten				
PI-Verhalten				
PID-Verhalten				
PT1-Verhalten				

Gl. (63) läßt erkennen; daß mit einem Regelverstärker mit 2 Eingängen zugleich sowohl die Differenz von Spannungen (folglich auch die Differenz zwischen Soll- und Istwert) gebildet als auch die Umformung der Regelabweichung nach regelungstechnischen Erfordernissen, realisiert durch die Beschaltung, vorgenommen werden kann.

- Zusätzliche Bemerkungen zum Regelverstärker

- † Einflüsse, die Abweichungen vom idealen Verhalten zur Folge haben
 - endliche Verstärkung und Frequenzabhängigkeit der Parameter der Schaltungselemente.
 - Die Übertragungsfunktion des Gleichstromdifferenzverstärkers lautet im unbeschalteten Zustand mit Frequenzgangkorrektur in guter Näherung

$$G_V(p) = \quad (70)$$

Die Untersuchung des Übertragungsverhaltens des Regelverstärkers erfolgt mit Hilfe von Gl. (66) auf folgenden Näherungsebenen:

a)

b) $u_a(p)/u_o(p) =$ {

c)

lt. Gl. (70)

• Drifterscheinungen

Sie wirken sich derart aus, daß bei $u_e = 0 \rightarrow u_a \neq 0$ ist. Man unterscheidet Strom- und Spannungsdrift. Durch die Struktur und die Parameter betreffende Auslegung des Verstärkers durch den Hersteller und zusätzliche Beschaltungsmaßnahmen können Drifterscheinungen weitgehend unterdrückt werden.

+ Daten eines modernen Gleichstromdifferenzverstärkers

Bild 35 Steuerkennlinie eines unbeschalteten Operationsverstärkers

+ Schaltungstechnische Maßnahmen zum Schutz des Regelverstärkers

- Schutz gegen zu hohe Eingangsspannungen durch zwei antiparallele Dioden parallel zu R_0
- Schutz gegen ausgangsseitige Stromüberlastung durch entsprechende Dimensionierung des Lastkreises einschließlich der Rückführung
- Schutz gegen zu hohe, vom Lastkreis herrührende Spannungen am Ausgang durch zwei antiparallele Zehnerdioden parallel zur Lastimpedanz

Schutz gegen Übersteuerung am Ausgang durch zwei antiparallele Zehnerdioden parallel zur Rückführimpedanz

3.5.2. Passive Korrektornetze (RC-Netzwerke)

Grundelemente der passiven Korrektornetze sind ohmsche Widerstände und Kapazitäten, seltener Induktivitäten. Ihre Zusammenschaltung erfolgt entsprechend dem gewünschten Übertragungsverhalten. Gebräuchliche Schaltungen und zugehörige Übertragungsfunktionen sind in einschlägigen regelungstechnischen Handbüchern zu finden. Infolge des stetigen Preisrückgangs für Gleichstromdifferenzverstärker in integrierter Bauweise werden passive Korrektornetze weitgehend durch beschaltete Operationsverstärker ersetzt. Der Ersatz ist mitunter dann ökonomisch nicht gerechtfertigt, wenn eigens für den zur Korrektur erforderlichen Operationsverstärker eine Stromversorgung benötigt wird.

4. Das statische und dynamische Übertragungsverhalten des geschlossenen Regelkreises

4.1. Bemerkungen zur Wiederholung

4.1.1. Aufbau und Funktionsweise des Regelkreises

Ein Regelkreis entsteht durch eine solche Zusammenschaltung von Übertragungsgliedern (im Sinne von Abschn. 3), daß das Prinzip der Gegenkopplung zur Wirkung kommt. Es besteht darin, daß fortlaufend der Istwert der Regelgröße mit dem vorgegebenen Sollwert verglichen wird. Die Differenz zwischen beiden Größen wird zur Steuerung der Regelgröße (über Regler und Stellglied) in der Weise herangezogen, daß in jedem Zeitpunkt selbsttätig eine weitgehende Angleichung des Istwertes an den vorgegebenen Sollwert erfolgt.

Die für den technologischen Prozeß maßgebende Ausgangsgröße des Regelkreises wird als Regelgröße bezeichnet. Bei Regelungen der energieorientierten Elektrotechnik ist es eine der Ausgangsgrößen des Energiewandlers (z. B. Drehzahl, Drehmoment, Strom, Spannung, Leistung). Sie soll entsprechend eines von der Aufgabenstellung für den Regelkreis abhängigen Programms mittels des vorzugebenden Sollwertes geführt werden. Darunter ist zu verstehen, daß sie in jedem Zeitpunkt einen Wert annehmen soll, der in einem festen Verhältnis zum vorgegebenen Sollwert steht. Es besteht die Forderung, daß dieses Verhältnis möglichst unabhängig ist von der Höhe des Sollwertes, von Änderungen der Parameter der Übertragungsglieder und von anderen systembedingten, unabhängigen Eingangsgrößen (Störgrößen).

4.1.2. Zur mathematischen Beschreibung des Regelkreises

Sie dient dem Zweck, allgemeingültige Zusammenhänge zwischen seinen Ein- und Ausgangsgrößen herzuleiten, anhand derer sein statisches und dynamisches Übertragungsverhalten beurteilt oder ein Regelkreis zielgerichtet entworfen werden kann.

In diesem Sinne sind Eingangsgrößen alle unabhängigen, von außen auf den Regelkreis einwirkenden Größen (Führungsgrößen, Störgrößen) und Ausgangsgrößen alle innerhalb des Regelkreises auftretenden Ein- und Ausgangsgrößen der Übertragungsglieder einschließlich der Regelgröße.

In gleicher Weise wie beim einfachen Übertragungsglied versteht man beim Regelkreis unter dessen statischem Verhalten die Zuordnung der Gesamtheit der statischen Werte einer Ausgangsgröße in Abhängigkeit von der Gesamtheit der statischen Werte der Eingangsgrößen. Ebenso versteht man unter dem dynamischen Verhalten die Gesamtheit der zeitlichen Verläufe der Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von den zeitlichen Verläufen der Eingangsgrößen beim Übergang von einem Arbeitspunkt zu einem anderen. Arbeitspunktveränderungen werden im geschlossenen Regelkreis durch Sollwert- oder Störgrößenänderungen verursacht.

Es werden zur Beschreibung des statischen und dynamischen Übertragungsverhaltens die gleichen mathematischen Methoden angewandt wie bei der Beschreibung der Übertragungsglieder.

4.1.3. Zur Analyse und Synthese von Regelkreisen

Die Verfahrensweise bei der Behandlung eines regelungstechnischen Problems ist davon abhängig, ob ein vorgegebener Regelkreis auf sein Übertragungsverhalten hin untersucht oder ein bestimmtes Verhalten durch den gezielten Aufbau eines Regelkreises erreicht werden soll. Man spricht im ersten Falle von der Analyse und im zweiten Falle von der Synthese von Regelkreisen.

4.1.3.1. Analyse

Sie bezieht sich auf den bereits vollständig entworfenen oder in Betrieb befindlichen Regelkreis. Sie hat zum Ziel, für den statischen und dynamischen Betriebsfall anhand der Aussteuerbereiche der Übertragungsglieder jenen Bereich für den gesamten Regelkreis festzustellen, innerhalb dessen keine Beschränkung der Regelwirkung (z. B. durch Begrenzung) auftritt. Sie hat weiter zum Ziel, charakteristische Güteparameter zur Beurteilung seines statischen und dynamischen Übertragungsverhaltens zu ermitteln. Vielfach beinhaltet die Analyse auch die Kennwertermittlung sowie Untersuchungen der Bedingungen für die Stabilität. Die Analyse auf der Basis mathematischer Überlegungen hat zur Voraussetzung, daß die Struktur und die Kennwerte (Zeitkonstanten, Verstärkungsfaktoren, statische Kennlinien) der in den Regelkreis einbezogenen Übertragungsglieder bekannt sind.

- Verfahren zur Analyse des dynamischen Verhaltens linearer Regelkreise
 - + Lösung der DGL
 - o mittels klassischer Verfahren vorzugsweise bei Regelungen mit nichtlinearen Übertragungsgliedern in Verbindung mit Rechenprogrammen
 - o mittels Laplacetransformation bei linearen Regelkreisen.
 - + Methode der trapezförmigen Frequenzcharakteristiken zur graphischen Bestimmung der Sprungantwort der Regelgröße des geführten Regelkreises ausgehend vom Frequenzgang des offenen Regelkreises.
 - + Methode der Fehlerkoeffizienten zur näherungsweisen Bestimmung der Sprungantwort der Regelabweichung des geführten Regelkreises.
 - + Nachbildung des Regelkreises auf dem Analog-, Digital- oder Hybridrechner zur Analyse vorzugsweise komplizierter nichtlinearer Regelkreise oftmals zur Ergänzung oder als Ersatz einer Prüffelderprobung.
 - + Anwendung der Ergebnisse systematischer Modelluntersuchungen.

- Verfahren zur Analyse des statischen Verhaltens von Regelkreisen mit linearen oder nichtlinearen (aber stetigen) statischen Kennlinien
 - + graphisch-analytische Methode (Kennliniengeometrie).
 - + rechentechnische Untersuchungen.

4.1.3.2. Synthese

Sie hat den Entwurf eines Regelkreises zum Ziel, der die aus der Aufgabenstellung des übergeordneten technologischen Prozesses abgeleiteten Forderungen an sein statisches und dynamisches Übertragungsverhalten weitgehend erfüllt. Insbesondere sind die Struktur des Regelkreises und die Parameter der Regelkreiselemente in Abhängigkeit vorgegebener quantitativer Güteforderungen festzulegen.

Im einfachsten Fall, aber dennoch sehr häufig, werden die Güteforderungen anhand der Sprungantwort der Regelgröße formuliert.

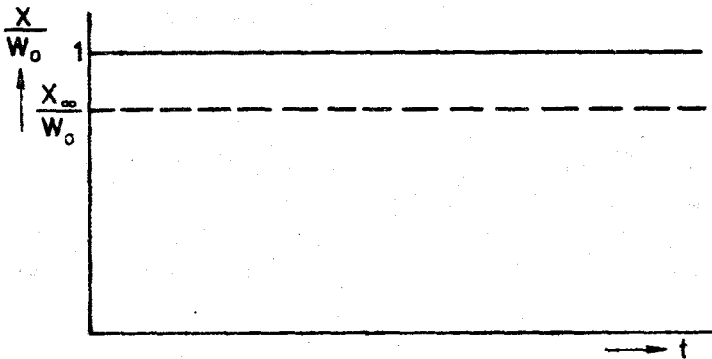


Bild 36 Güteparameter eines Regelkreises

$x_w(e_B)$ - x_{max} - x - Δh - T_ϵ - T_m oder
 t_{max} - T_{an} -

Die Freizügigkeit bei der Synthese oder beim Entwurf eines Regelkreises wird durch eine Reihe allgemeiner sowie spezifischer Randbedingungen oftmals wesentlich eingeschränkt. Die Einschränkung wird verursacht dadurch, daß

- + vorgegebene Geräte und Anlagen insbesondere zur Realisierung des Energieaustauschs zwischen Netz und technologischem Prozeß in den Regelkreis einbezogen werden müssen
- + die verfügbaren finanziellen Mittel begrenzt sind
- + eine hohe Betriebszuverlässigkeit gefordert wird
- + Fertigungsmöglichkeiten des Betriebes und Kundenwünsche berücksichtigt werden müssen.

Die Synthese von automatischen Steuerungen ist wegen der Vielgestaltigkeit der technologischen Aufgabenstellungen und der Vielfalt möglicher Lösungen für ein und dasselbe Problem eine sehr anspruchsvolle ingenieurtechnische Arbeit. Sie setzt umfassendes fachliches Wissen und ein hohes politisches Verantwortungsbewußtsein voraus.

- Verfahren zur Synthese linearer Regelkreise

+ Frequenzkennlinienverfahren

Es wird anhand der vorgegebenen Güteforderungen der Verlauf der sogenannten "gewünschten Amplitudenfrequenzkennlinie" des offenen Regelkreises festgelegt. Es besteht die Aufgabe, den zur technischen Ausführung kommenden Regelkreis so zugestalten, daß seine Amplitudenfrequenzkennlinie (im aufgetrennten Zustand) möglichst weitgehend mit der gewünschten AFK übereinstimmt. Bei völliger Übereinstimmung erfüllt der geschlossene Regelkreis die vorgegebenen Güteforderungen. Dieses Verfahren wird in der Ingenieurpraxis sehr häufig angewandt.

+ Pol-Nullstellenverteilung

Es wird anhand der Güteforderungen für den geschlossenen Regelkreis die Polverteilung seiner Führungsübertragungsfunktion $G_w(p)$ festgelegt. Wegen der Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Parameter der Regelkreiselemente ausgehend von $G_w(p)$ wird das Verfahren selten angewendet.

- | | | | |
|---|-----------------------------------|---|------------------------|
| ! | + Rechentechnische Nachbildung | } | siehe Analyseverfahren |
| | + Methode der Fehlerkoeffizienten | | |
| | + Modelluntersuchungen | | |

4.1.3.3. Die Verknüpfung von Analyse und Synthese

Beim Entwurf eines Regelkreises - allgemein einer automatischen Steuerung - bilden Analyse- und Syntheseüberlegungen eine untrennbare Einheit. Jeder Entwurf wird mit einem Syntheseschritt begonnen. Mittels eines geeigneten Analyseverfahrens ist zu überprüfen, ob der erste Entwurf bereits die gestellten Forderungen erfüllt. Ist das nicht der Fall, muß anhand von Syntheseüberlegungen die Konzeption des Regelkreises geändert und danach einer erneuten Analyse unterworfen werden. Das Zusammenwirken von Analyse und Synthese veranschaulicht folgendes Ablaufschema.

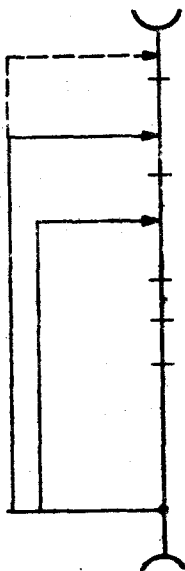


Bild 37 Zusammenwirken von Analyse und Synthese

4.2. Die quantitative Behandlung des statischen Übertragungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises

4.2.1. Der Arbeitspunkt eines Regelkreises

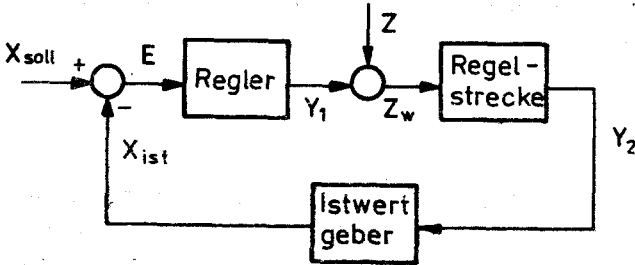


Bild 38 Blockschaltbild des einschleifigen Regelkreises

Wie das Blockschaltbild zeigt, ist das statische Übertragungsverhalten durch folgende Beziehungen bestimmt:

Soll bei $Z = 0$ eine dem Sollwert $X_{\text{soll}0}$ zugeordnete Regelgröße Y_{20} eingestellt werden, so muß durch Subtraktion des über die Beziehung $X_{\text{ist}} = f(Y_2)$ abhängigen Istwertes $X_{\text{ist}0}$ vom Sollwert $X_{\text{soll}0}$ eine Regelabweichung E_0 gebildet werden, die entsprechend der Beziehung $Y_2 = f(E)$ die Regelstrecke gerade bis Y_{20} aussteuert. Dabei ist $E_0 > 0$, wenn im Abschnitt zwischen Sollistwertvergleich und Abgriff der Regelgröße nur Übertragungsglieder mit PT-Verhalten vorhanden sind. Es wird $E_0 = 0$, wenn in diesem Abschnitt ein Übertragungsglied mit I-Verhalten vorhanden ist und X_{soll} keine zeitliche Änderung erfährt.

Ist $Z \neq 0$, wird dieser Gleichgewichtszustand dahingehend gestört, daß sich $Y_{20}^* = Y_{20}$, $X_{\text{ist}0}^* = X_{\text{ist}0}$ und $E_0^* \neq E_0$ (bei PT-Übertragungsgliedern) bzw. $E_0^* > 0$ (bei I-Übertragungsgliedern) zwischen Eintrittsstelle der Störgröße und dem Soll-Ist-Wertvergleich einstellen. Die Gesamtheit der Werte E_0 , Y_{10} , Y_{20} und X_{10} , die sich bei vorgegebenem $X_{\text{soll}0}$ und Z_0 einstellen, kennzeichnen einen Arbeitspunkt des Regelkreises.

Es sind nicht alle Arbeitspunkte, die der Regelkreis annehmen kann, technisch brauchbare und zulässige Arbeitspunkte. Ein solcher muß die Bedingung erfüllen, daß alle Größen im zulässigen Arbeitsbereich der Übertragungsglieder liegen und die Bedingung $|E_0| \leq |E_{\text{zul}}|$ erfüllt ist. Suchen Sie hierfür die Begründung!

4.2.2. Charakteristische statische Kennlinien von Übertragungsgliedern

Aus der Vielfalt der möglichen statischen Kennlinien besitzen vier typische Verläufe prinzipielle Bedeutung.

- linearer Verlauf (von theoret. Bedeutung)

- linearer Verlauf mit Begrenzung der Ausgangsgröße
(von prakt. Bedeutung)

- Speicherverhalten (von theoretischer Bedeutung)

Theoretisch besitzen Übertragungsglieder mit I-Anteil dieses Verhalten. Sie behalten jenen Wert der Ausgangsgröße bei, der in dem Augenblick vorhanden ist, in dem $X = 0$ wird (Wirkung als Speicher des momentanen Wertes eines analogen Signals).

- Speicherverhalten mit Begrenzung (von praktischer Bedeutung)

Dieses Übertragungsverhalten besitzen reale Übertragungsglieder mit I-Anteil. Aus physikalischen Gründen ist Y immer auf $\pm Y_{gr}$ begrenzt. Die Begrenzung ist dadurch charakterisiert, daß der Ausgangswert Y den pos.

bzw. neg. Grenzwert nicht überschreiten kann, auch wenn für $t \rightarrow \infty$ die Eingangsgröße $X \neq 0$ ist.

4.2.3. Kennliniengeometrische Behandlung des statischen Übertragungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises

Die nachfolgenden Betrachtungen beschränken sich auf das statische Übertragungsverhalten von einschleifigen Regelkreisen, deren Übertragungsglieder das unter 4.4.2. beschriebene statische Übertragungsverhalten aufweisen.

Eine weitere Einschränkung erfolgt dahingehend, daß entweder alle Übertragungsglieder lineares Verhalten besitzen oder einer der beiden Blöcke "Regler" und "Regelstrecke" (vgl. 4.3.2.) eine nichtlineare statische Kennlinie besitzt.

4.2.3.1. Statisches Übertragungsverhalten bei Führung ($Z = 0$)

- Regelkreis ist im offenen Zustand eine PT-Kette

+ ohne Nichtlinearität der Übertragungsglieder

Es gelten die Beziehungen

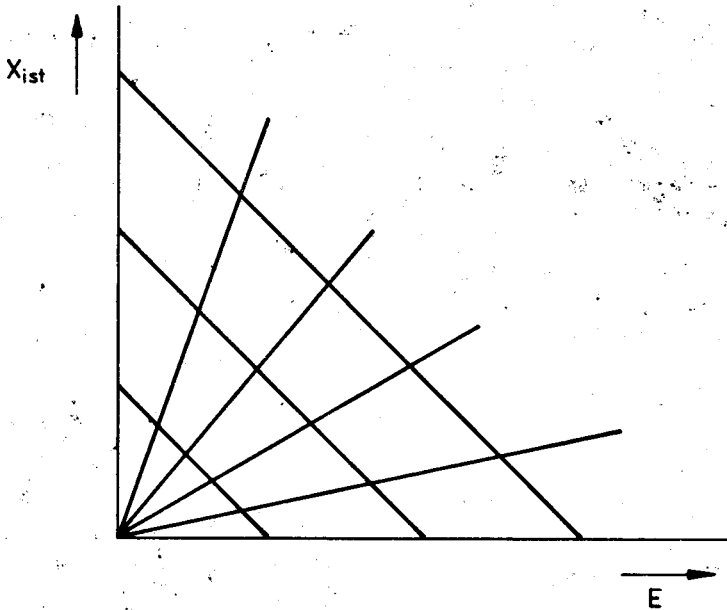


Bild 39 Statisches Übertragungsverhalten $X_{\text{Soll}} = 0$,
 $Z = 0$ PT-Kette, keine Begrenzung

Besitzt der Regelkreis den Übertragungsfaktor k_4 und wird $X_{\text{soll } 3}$ aufgeschaltet, so stellt sich der Arbeitspunkt A_4 ein.

Erkenntnisse:

Je größer $k = k_R \cdot k_S'$, je kleiner wird E;
bei gleichbleibendem k wird E mit X_{soll} kleiner.

+ mit Begrenzung der Regler- oder Regelstreckenausgangsgröße

Es gelten die Beziehungen

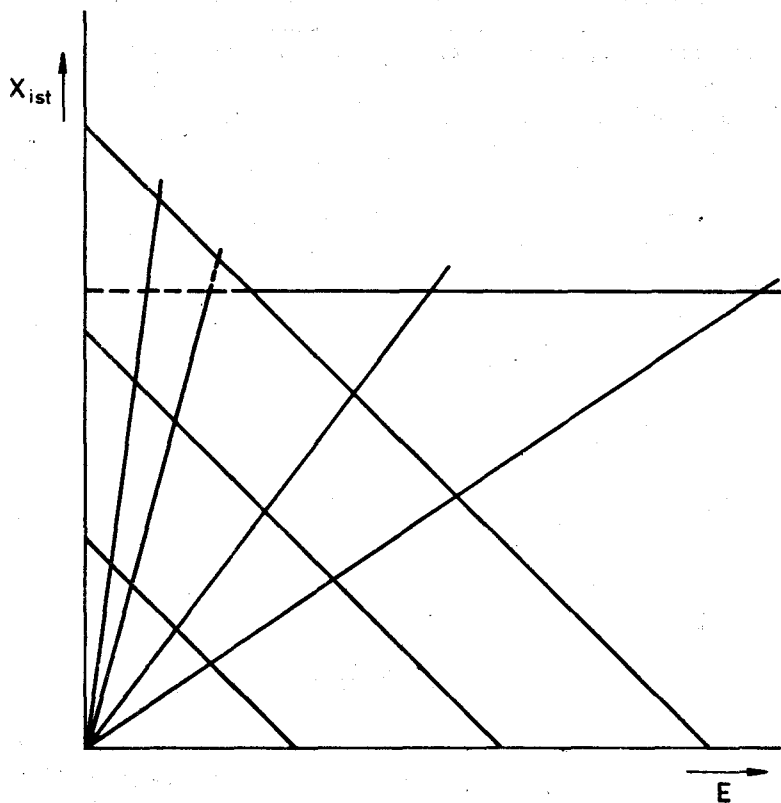


Bild 40 Statisches Übertragungsverhalten

$$X_{Soll} \neq 0, Z = 0$$

PT-Kette, mit Begrenzung

Besitzt der Regelkreis den Übertragungsfaktor k_3 und wird $X_{\text{soll } 3}$ aufgeschaltet, so stellt sich der Arbeitspunkt A_3 , gekennzeichnet durch E_3 und $X_{\text{ist } 3}$, ein. Beträgt der Übertragungsfaktor k_4 oder k_5 , so stellt sich A_4 , gekennzeichnet durch E_4 und $X_{\text{ist } 4}$ ein.

Erkenntnisse:

Infolge der Begrenzung können sich bei $X_{\text{soll } 3}$ und k_4 bzw. k_5 die Arbeitspunkte A_4 bzw. A_5 nicht ausbilden. Es stellt sich der Arbeitspunkt A_4 mit der im Vergleich zu A_4 bzw. A_5 größeren Regelabweichung ein. Der Eintritt der Begrenzungswirkung ist vom Sollwert und dem Übertragungsfaktor abhängig.

- Regelkreis ist im offenen Zustand eine PI-Kette
- + ohne Nichtlinearität der Übertragungsglieder
- Es gelten die Beziehungen

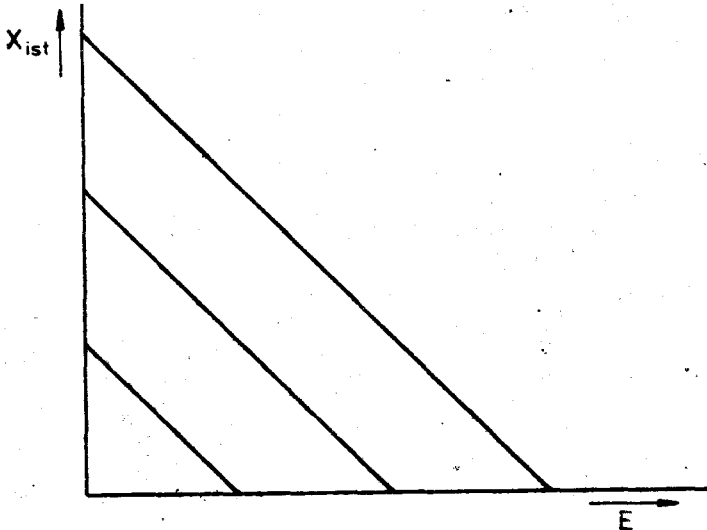


Bild 41 Statisches Übertragungsverhalten

$$X_{\text{soll}} \neq 0, Z = 0$$

PI-Kette, ohne Begrenzung

Besitzt der Regelkreis bei beliebigem pos. Übertragungsfaktor einen integralen Anteil, so stellt sich bei Aufschaltung des Sollwertes $X_{\text{Soll } 3}$ der Arbeitspunkt A_3 , gekennzeichnet durch $E_3 = 0$, ein.

Erkenntnisse:

Bei Vorhandensein eines integralen Anteils und Aufschaltung eines zeitlich konstanten Sollwertes verschwindet die bleibende Regelabweichung sofern $k_g > 0$.

+ mit Begrenzung der Ausgangsgröße des Übertragungsgliedes mit I-Verhalten.

Es gelten die Beziehungen

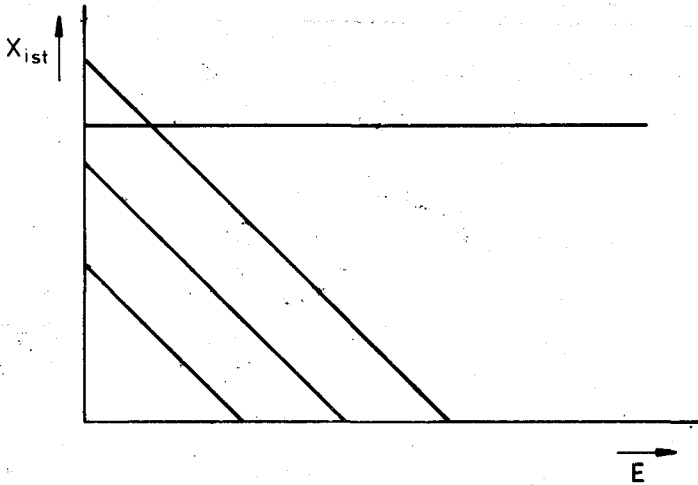


Bild 42 Statisches Übertragungsverhalten

$$X_{\text{Soll}} = 0, Z = 0$$

IP-Kette, mit Begrenzung

Besitzt der Regelkreis bei beliebigem pos. Übertragungsfaktor einen integralen Anteil, so stellt sich bei Aufschaltung des Sollwertes $X_{\text{Soll } 2}$ der Arbeitspunkt A_2 , gekennzeichnet durch $E_2 = 0$, ein. Wird $X_{\text{Soll } 3}$ ($> X_{\text{ist gr}}$) aufgeschaltet, stellt sich der Arbeitspunkt A_3 , gekennzeichnet durch E_3 , ein.

Erkenntnisse:

Infolge der Begrenzung kann sich bei $X_{\text{Soll } 3}$ der Arbeitspunkt A_3^* nicht einstellen. Es stellt sich A_3 mit der Regelabweichung $E_3 > 0$ ein.

Die Begrenzung wird nur wirksam, wenn $X_{\text{Soll}} > X_{\text{ist gr}}$ eingestellt wird.

4.2.3.2. Stationäres Übertragungsverhalten bei Störung ($Z \neq 0$; $X_{\text{Soll}} \neq 0$)

- Regelkreis ist im offenen Zustand eine P-Kette
 † ohne Nichtlinearitäten der Übertragungsglieder.
 Es gelten die Beziehungen

Bei Aufschaltung des Sollwertes X_{soll} und Vorhandensein der Störgröße Z_1 stellt sich der Arbeitspunkt A_2 für k_{R1} bzw. A_{21} für k_{R2} ein.

Erkenntnisse:

Wenn eine Störgröße Z auftritt, verändert sich E im Vergleich zu dem Fall ohne Störgröße. E wird größer bzw. kleiner, wenn Z_1 mit negativem bzw. positivem Vorzeichen angreift.

Die Regelabweichung ist bei gleichbleibendem Z und k_S von k_R abhängig. Sie wächst mit abnehmendem k_R .

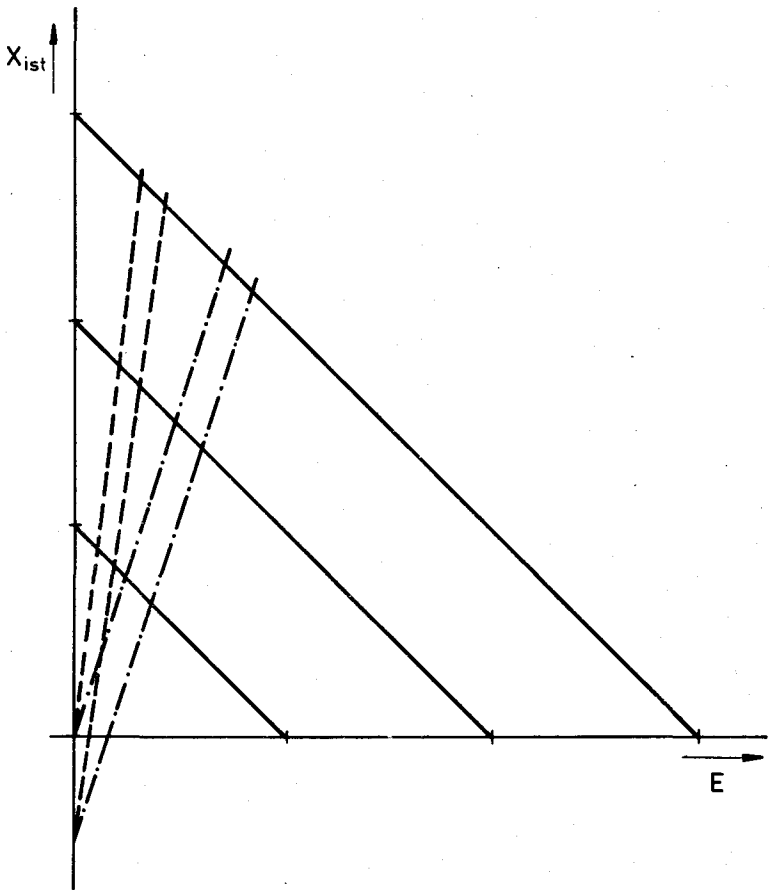


Bild 43 Statisches Übertragungsverhalten
 $X_{Soll} \neq 0, Z \neq 0,$
 PT-Kette, ohne Begrenzung

+ mit Begrenzung der Ausgangsgröße des Reglers X_1
Es gelten die Beziehungen

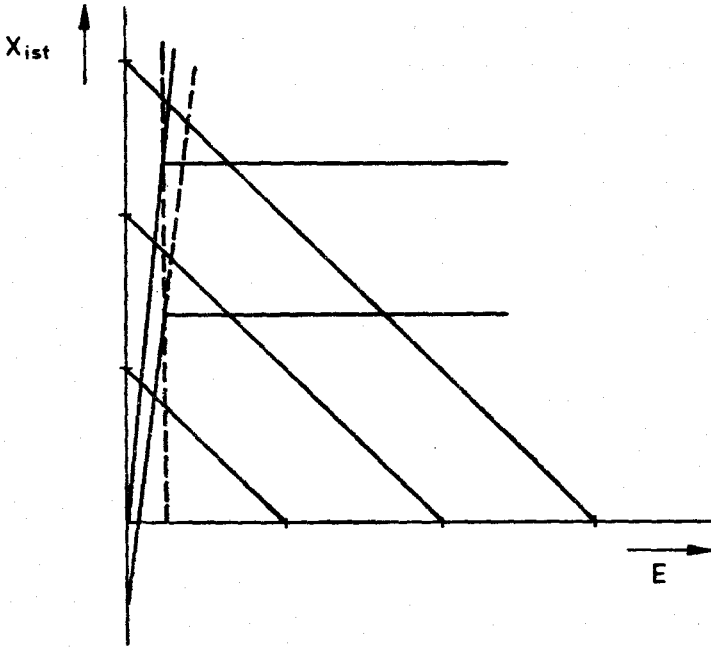


Bild 44 Statisches Übertragungsverhalten

$X_{\text{Soll}} = 0$, $Z = Z_1$, PT-Kette mit Begrenzung

Bei Aufschaltung des Sollwertes $X_{\text{Soll } 3}$ und Vorhandensein der Störgröße Z_1 stellt sich der Arbeitspunkt A_{31} ein.

Erkenntnisse:

Bei Auftreten einer Störgröße Z_1 und Vorgabe des Sollwertes $X_{\text{Soll } 3}$ tritt eine Vergrößerung der bleibenden Regelabweichung von E_3 auf E_{31} auf.

- Regelkreis ist im offenen Zustand eine IP-Kette

+ I-Anteil befindet sich im Regler, keine Nichtlinearität der Übertragungsglieder

Es gelten die Beziehungen

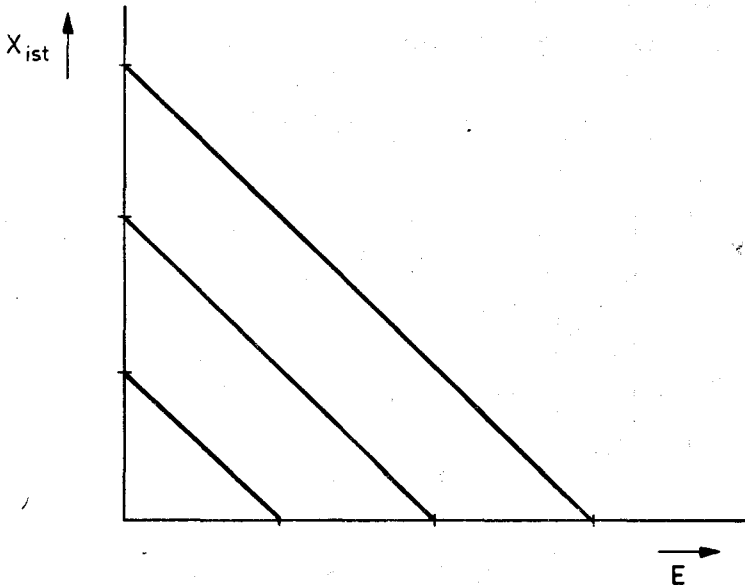


Bild 45 Statisches Übertragungsverhalten

$X_{\text{Soll}} \neq 0, Z \neq 0,$

IP-Kette mit I-Anteil im Regler,

ohne Begrenzung

Bei Vorgabe des Sollwertes $X_{\text{Soll } 3}$ stellt sich unabhängig vom Übertragungsfaktor k_S und der zeitlich konstanten Störgröße Z der Arbeitspunkt A_3 , gekennzeichnet durch $E_3 = 0$, ein.

Erkenntnisse:

Durch den I-Anteil im Regler kann der Einfluß einer zeitlich konstanten Störgröße Z auf die Regelabweichung E unterdrückt werden.

† I-Anteil befindet sich in der Regelstrecke, keine Nicht-linearität der Übertragungsglieder.

Es gelten die Beziehungen:

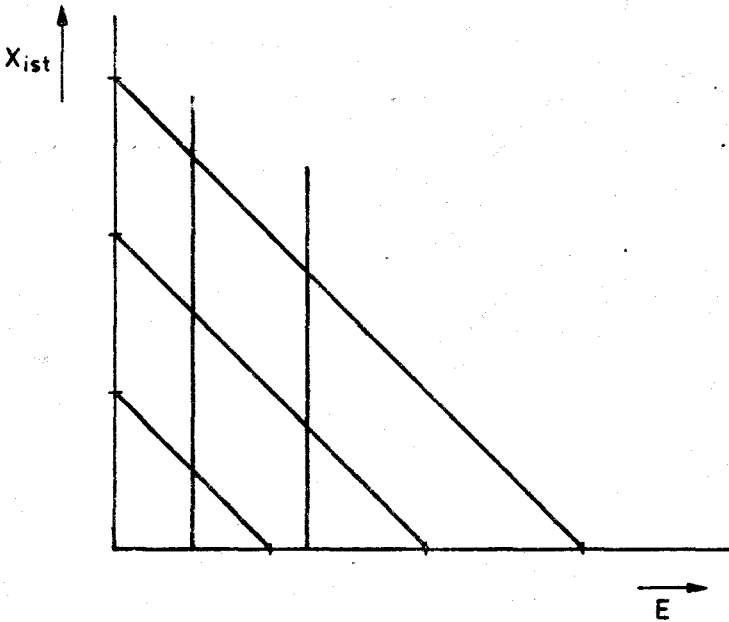


Bild 46 Statisches Übertragungsverhalten

$X_{\text{Soll}} \neq 0, Z \neq 0;$

IP-Kette mit I-Anteil in der Regelstrecke,
ohne Begrenzung

Bei Vorgabe des Sollwertes X_{Soll} stellt sich bei vorgegebenen $Z = Z_1$ und k_R der Arbeitspunkt A_{11} , gekennzeichnet durch E_{11} , ein.

Erkenntnisse:

Durch den I-Anteil in der Regelstrecke kann der Einfluß einer zeitlich konstanten, am Eingang der Regelstrecke angreifenden Störgröße auf die Regelabweichung E nicht kompensiert werden. E ist abhängig von Z_1 und k_R .

4.2.4. Ergebnisse der Betrachtungen in Abschnitt 4.2.

- der statische Zustand ist dadurch gekennzeichnet, daß alle im Regelkreis wirkenden Größen und alle unabhängigen, von außen auf den Regelkreis einwirkenden Größen, zeitlich konstant sind.
- Ist der Regelkreis im offenen Zustand eine PT-Kette, so muß sowohl bei Führung als auch bei Störung notwendigerweise eine bleibende Regelabweichung auftreten.
- Ist der Regelkreis im offenen Zustand eine IP-Kette, und ist keine Begrenzung in dieser Kette vorhanden, so tritt bei Führung keine bleibende Regelabweichung auf. Es tritt ebenfalls bei Störung keine bleibende Regelabweichung auf, wenn der I-Anteil in Signalflußrichtung vor der Angriffsstelle der Störgröße liegt.
- Bei Vorhandensein eines Übertragungsgliedes, dessen Ausgangsgröße begrenzt ist und Aussteuerung desselben bis in die Begrenzung, wird die bleibende Regelabweichung größer als bei Nichtvorhandensein dieser Begrenzung.

4.3. Die quantitative Behandlung des dynamischen Übertragungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises

Sie erfolgt bei Beschränkung auf lineare bzw. im Arbeitspunkt linearisierte Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen der in den Regelkreis einbezogenen Übertragungsglieder durch Berechnung interessierender Übergangsfunktionen und Frequenzkennlinien. Diese werden von den zugeordneten Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises abgeleitet.

4.3.1. Charakteristische Übertragungsfunktion des Regelkreises

Ausgehend von Bild 47 lassen sich folgende charakteristische UTF angeben:

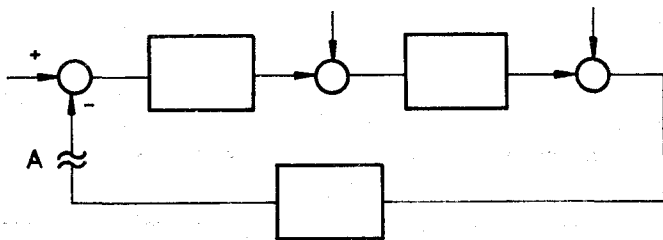


Bild 47 Prinzipielles Blockschaltbild eines einschleifigen Regelkreises

- UTF des an der Stelle A aufgetrennten Regelkreises
(offener Regelkreis) $G_o(p)$

$$G_o(p) = \quad (72)$$

! $G_o(p)$ ist Produkt der UTF in Reihe geschalteten Übertragungsglieder des an der Stelle A aufgetrennten Regelkreises.

- UTF des geschlossenen Regelkreises bei Führung $G_w(p)$, d. h.
 $Z_1(p) = Z_2(p) = 0$

Aus Bild 30 folgen die Beziehungen

$$w(p) = x_3(p) = e(p)$$

$$\frac{x_3(p)}{e(p)} =$$

$$w(p) = x_3(p) =$$

$$G_w(p) = \quad (73)$$

- Fehlerübertragungsfunktion $G_{we}(p)$, d. h. $z_1(p) = z_2(p)$
 $= 0$

$$w(p) = x_3(p) = e(p)$$

$$w(p) = e(p) \quad G_o(p) = e(p)$$

$$G_{we}(p) = \quad (74)$$

$$G_{we}(p) = \quad (75)$$

- Störübertragungsfunktionen $G_{z_i}(p)$

$$\dagger G_{z_1}(p) = \frac{x_3(p)}{z_1(p)} ; w(p) = 0 ; z_2(p) = 0$$

$$z_1(p) = z_1(p) = y_2(p)$$

$$\frac{x_1(p)}{x_3(p)} = -G_1(p) \text{ wegen } -x_3(p) = e(p)$$

$$\frac{x_3(p)}{y_2(p)} = G_2(p) \cdot G_3(p)$$

$$-G_1(p) \cdot x_3(p) = z_1(p) = \frac{x_3(p)}{G_2(p) \cdot G_3(p)}$$

$$- z_1(p) =$$

$$G_{z1}(p) = \frac{x_3(p)}{z_1(p)} = \quad (76)$$

$$+ G_{z2}(p) = \frac{x_3(p)}{z_2(p)} ; w(p) = 0 ; z_1(p) = 0$$

$$G_{z2}(p) = \quad (77)$$

allgemein

$$G_z(p) = \quad \text{oder } G_z(p) = \quad (78)/(79)$$

$G_u(p)$ - Produkt der ÜTF zwischen Störeintrittsstelle
bis zum Sollwertvergleich in Signalfluß-
richtung

$G_x(p)$ - dto entgegen der Signalflußrichtung

4.3.2. Bemerkung zur Beziehung zwischen der UTF des offenen Regelkreises $G_o(p)$ und der des geschlossenen Regelkreises bei Führung $G_w(p)$ (Nichols-Diagramm)

Gemäß Gl. (69) besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen $G_o(p)$ und $G_w(p)$. Es ist demnach auch zwischen $G_o(j\omega)$ und $G_w(j\omega)$ vorhanden und von besonderem Interesse für die Synthese von Regelkreisen und bei der Untersuchung vermaschter Regelkreise.

Aus Gl. (73) folgt:

$$\left| G_w(j\omega) \right| e^{j\psi(\omega)} = \frac{\left| G_o(j\omega) \right| e^{j\varphi(\omega)}}{1 + \left| G_o(j\omega) \right| e^{j\varphi(\omega)}} = \frac{G_o(j\omega)}{1 + G_o(j\omega)}$$

Die Trennung von Real- und Imaginärteil ergibt:

$$\begin{aligned} G_w(j\omega) &= r_1 \quad [\left| G_o(j\omega) \right| \quad ; \quad \varphi(\omega)] \\ \psi(\omega) &= r_2 \quad [\left| G_o(j\omega) \right| \quad ; \quad \varphi(\omega)] \end{aligned}$$

Man kann folglich in einem Diagramm, dem sog. Nicholsdiagramm, mit den Koordinaten $\left| G_o(j\omega) \right|$ und $\varphi(\omega)$ die Funktionen $\left| G_o(j\omega) \right| = f(\varphi(\omega))$ für $\left| G_w(j\omega) \right| = \text{konst.}$ und $\psi(\omega) = \text{konst.}$ als Parameter darstellen.

Das Nicholsdiagramm ist in einschlägigen Büchern der Regelungstechnik angegeben. Es bestehen folgende Anwendungsmöglichkeiten:

+ Ermittlung von $\left| G_w(j\omega) \right|$ und $\psi(\omega)$, wenn $\left| G_o(j\omega) \right|$ und $\varphi(\omega)$ vorgegeben sind.

+ Ermittlung von $\left| G_o(j\omega) \right|$ und $\varphi(\omega)$, wenn $\left| G_w(j\omega) \right|$ und $\psi(\omega)$ vorgegeben sind.

Das Nicholadiagramm macht weiterhin folgende Aussagen:

$$|G_w(j\omega)| \approx 1 \quad \text{für } |G_o(j\omega)| > 10$$

$$|G_w(j\omega)| \approx |G_o(j\omega)| \quad \text{für } |G_o(j\omega)| < 0,1$$

Seine Anwendung ist damit praktisch auf den Bereich $0,1 < |G_o(j\omega)| < 10$ beschränkt.

4.3.3. Die bleibende Regelabweichung bei Führung und Störung

Bei der Untersuchung des statischen Übertragungsverhaltens konnten bereits Aussagen über die Größe der bleibenden Regelabweichung gemacht werden. Sie sind unvollständig, da nur die statischen Zusammenhänge berücksichtigt worden sind.

Es sollen jetzt die Beziehungen erarbeitet werden, die zwischen der bleibenden Regelabweichung einerseits und den Parametern des Regelkreises sowie dem zeitlichen Verlauf der systemunabhängigen Eingangsgrößen (Führungsgröße, Störgrößen) andererseits vorhanden sind.

Die Ergebnisse dieser Betrachtung schließen die Ergebnisse ein, die bei der Betrachtung des statischen Verhaltens gewonnen wurden. Grundlage der nachfolgenden Überlegungen bilden die Grenzwertsätze der Laplacetransformation.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{p \rightarrow 0} p X(p); \quad \lim_{t \rightarrow 0} x(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} p X(p) \quad (80)$$

$$t \rightarrow \infty \quad p \rightarrow 0 \quad t \rightarrow 0 \quad p \rightarrow \infty$$

4.3.3.1. Führungsverhalten

- ideales Führungsverhalten

Es tritt in keinem Zeitpunkt eine Regelabweichung auf.
Es besteht folglich die Forderung

$$e(t) = 0 \quad \text{oder} \quad x(t) = w(t).$$

Wegen

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ w(p) G_w(p) \right\}$$

kann die Forderung nur durch $G_w(p) = 1$ erfüllt werden.
Sie ist bei technisch realen Systemen nicht erfüllbar.

- reales Führungsverhalten

a) Die Führungsgröße wird bei $t = 0$ geändert. Es tritt unmittelbar nach der Führungsgrößenänderung eine Regelabweichung auf. Sie verschwindet für $t \rightarrow \infty$.
Es besteht folglich die Forderung $e(t)_{t \rightarrow \infty} = 0$ und damit

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left\{ w(p) G_{w_0}(p) \right\} = 0$$

Sie läßt sich erfüllen für:

$$+ w(t) = w_0 \mathcal{L}(t); w(p) = \frac{w_0}{p};$$

wenn

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_{we}(p) =$$

Das wiederum bedingt

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_o(p) = \quad (81)$$

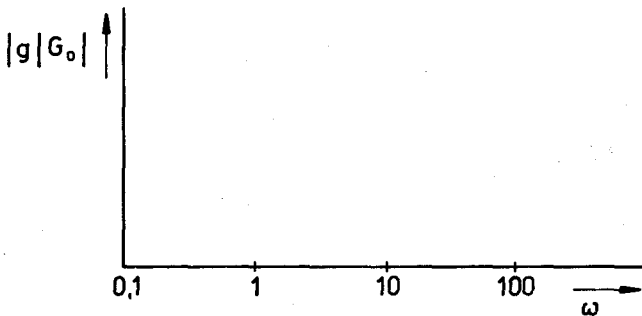


Bild 48 Notwendiger Verlauf von $\lg |G_o|$ $\omega \rightarrow 0$,
wenn für $w(t) = w_o \zeta(t)$ $e(\infty) = 0$
gefordert wird.

$$+ w(t) = \frac{w_0}{T_0} t \quad ; \quad w(p) = \frac{w_0}{T_0 p^2}$$

wenn

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{p} G_{we}(p) =$$

d. h.

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_0(p) =$$

(82)

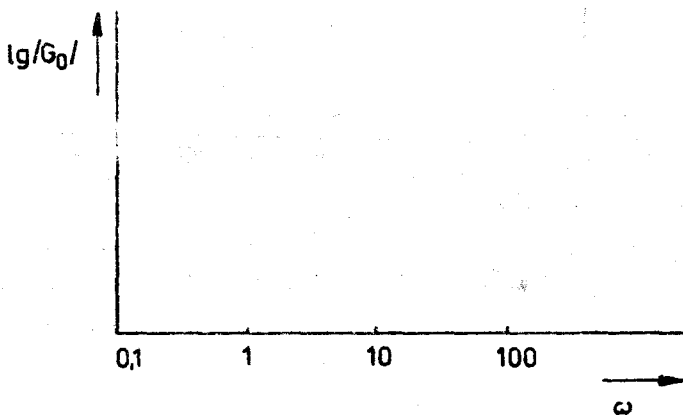


Bild 49 Notwendiger Verlauf von $\lg |G_0|$ $\omega \rightarrow 0$,
wenn für $w(t) = \frac{w_0}{T_0} t$ $e(\infty) = 0$
gefordert wird

b) Die Führungsgröße wird bei $t = 0$ geändert. Es ist in jedem Zeitpunkt eine endliche Regelabweichung zugelassen. Es besteht folglich die Forderung $e(t)_{t \rightarrow \infty} = e(\infty)$ und damit

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{p \rightarrow 0} \left\{ w(p) G_{we}(p) \right\} = e(\infty)$$

Sie läßt sich erfüllen für

$$\dagger w(p) = \frac{w_0}{p}$$

wenn

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_{we}(p) =$$

d. h.

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_0(p) =$$

wobei $k' = \frac{1}{1+k}$ und folglich

$$x = \frac{w_0}{1+k} \quad (83)$$

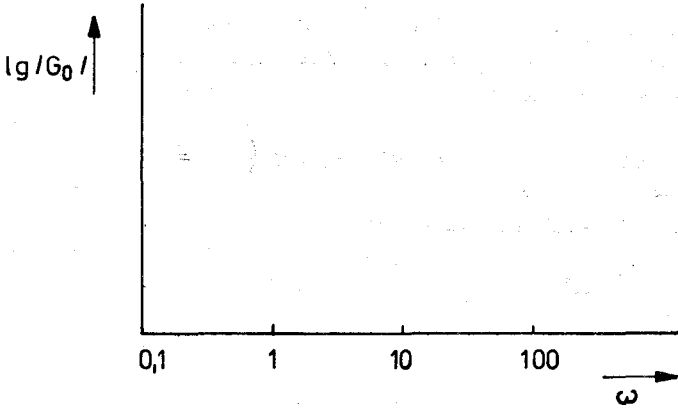


Bild 50 Verlauf von $\lg |G_0|$ $\omega \rightarrow 0$, wenn für
 $w(t) = w_0 \delta(t)$ $0 < e(\infty) < \infty$ zugelassen
 wird

$$+ w(t) = w_0 \frac{t}{T_0} \quad (); \quad w(p) = \frac{w_0}{T_0 p^2}$$

wenn

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_w(p) =$$

d. h.

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_0(p) = \quad (84)$$

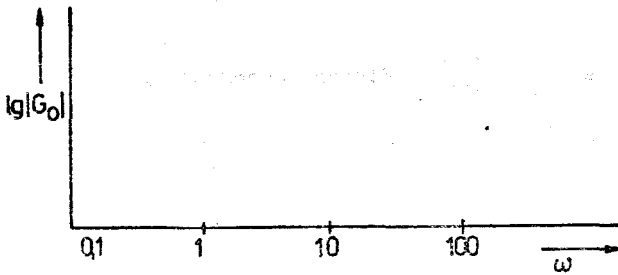


Bild 51 Verlauf von $\lg |G_0|$ $\omega \rightarrow 0$, wenn für
 $w(t) = \frac{0}{T} t$ $0 < e(\infty) < 0$ zuge-
 lassen wird

Zusammenfassung zu a.) u. b.)Exp. des integralen zeitl. Verlauf der Führungsgröße $w(t)$ Anteils in $G_o(p)$

	$w_o \sigma(t)$	$w_o \frac{t}{T_o}$ für $t \geq 0$	$w_o \frac{t^2}{T_o^2}$ für $t \geq 0$
0	$x_w = \begin{cases} w_o k' \\ w_o \frac{1}{1+k} \end{cases}$	$e(\infty) = \infty$	$e =$
1	$e = 0$	$e = w_o \frac{T}{T_o}$	$e =$
2	$e = 0$	$e = 0$	$e =$

c) Die Führungsgröße ist sinusförmig veränderlich.

Die Amplitude der Regelabweichung ist von der Amplitude und der Frequenz der Führungsgröße abhängig. Für den eingeschwungenen Zustand vermittelt die Amplitudenfrequenzkennlinie

$$|G_{we}(j\omega)| = \frac{|e(j\omega)|}{|w(j\omega)|} \quad \text{diesen Zusammenhang.}$$

4.3.3.2. Störverhalten

- ideales Störverhalten

Trotz Einwirkung einer Störgröße tritt keine Regelabweichung auf (völlige Störinvarianz).

Es besteht folglich die Forderung

$$x(t) = 0 \quad \text{oder} \quad e(t) = 0$$

Wegen

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ z(p) \cdot G_z(p) \right\}$$

kann die Forderung nur erfüllt werden, wenn $G_z(p) = 0$.
Sie ist bei technisch realen Systemen nicht erfüllbar.

- reales Störverhalten

- a) Es tritt unmittelbar nach Änderung der Störgröße eine Regelabweichung auf. Sie verschwindet für $t \rightarrow \infty$ (partielle Störinvarianz). Es besteht folglich die Forderung $x(t)_{t \rightarrow \infty} = 0$

und damit

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$$

Sie läßt sich für

$$z(t) = z_0 \delta(t); \quad z(p) = \frac{z_0}{p}$$

erfüllen, wenn

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_z(p) =$$

Da für einen technisch sinnvollen Regelkreis erfüllt sein muß:

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_w(p) = k \quad (0 < k \leq 1),$$

ergibt sich die Bedingung:

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_z(p) \quad (85)$$

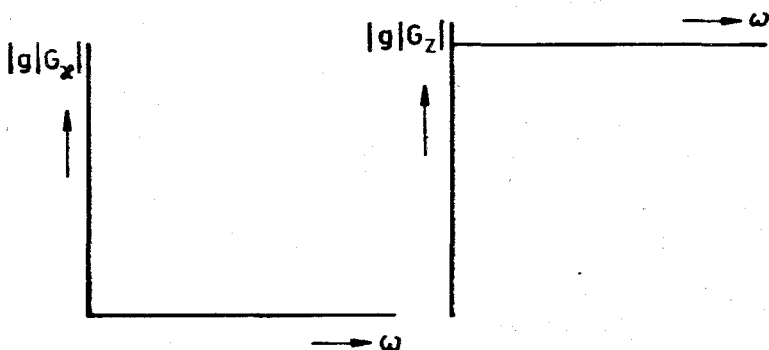


Bild 52 Verlauf von $\lg |G_z|_{\omega \rightarrow 0}$ und $\lg |G_z|_{\omega \rightarrow \infty}$, wenn bei $z(t) = z_0 \sigma(t)$ $x(\infty) = 0$ gefordert wird

- b) Es ist in jedem Zeitpunkt nach Änderung der Störgröße eine endliche Regelabweichung zugelassen. Es besteht folglich die Forderung $x(t)_{t \rightarrow \infty} = x(\infty)$ und damit

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = \lim_{p \rightarrow 0} (z(p) G_z(p)) = x(\infty) \quad [-\infty < x(\infty) < +\infty]$$

Sie läßt sich erfüllen für

$$z(t) = z_0 \sigma(t); \quad z(p) = \frac{z_0}{p}$$

wenn

$$\lim_{p \rightarrow 0} G_z(p) = \quad (86)$$

Es ergibt sich

$$x(\infty) =$$

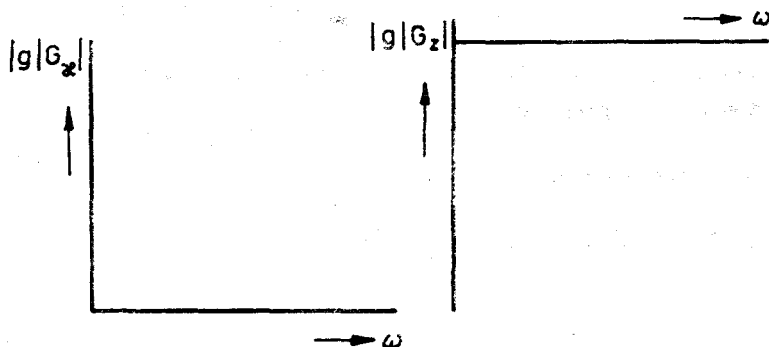


Bild 53 Verlauf von $\lg |G_z|_{\omega \rightarrow 0}$ und $\lg |G_z|_{\omega \rightarrow \infty}$,
wenn für $z(t) = z_0 \sigma(t)$ ($-\infty < x(\infty) < +\infty$)
gefordert wird

c) Die Störgröße ist sinusförmig veränderlich.

Die Amplitude der Regelabweichung ist von der Amplitude und der Frequenz der Führungsgröße abhängig. Für den eingeschwungenen Zustand vermittelt die Amplitudenfrequenzkennlinie

$$|G_z(j\omega)| = \left| \frac{x(j\omega)}{z(j\omega)} \right|$$

diesen Zusammenhang.

4.3.4. Die dynamische Regelabweichung bei Führung und Störung

Interessiert für eine Aufgabenstellung der vollständige zeitliche Verlauf der Regelabweichung oder ein ev. vorhandenes Maximum unmittelbar nach der Änderung der Führungs- bzw. Störgröße, so muß die Beziehung zwischen Regelabweichung und Führungsgröße bzw. Störgröße im Laplacebereich in den Zeitbereich transformiert werden.

$$e(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ w(p) \cdot G_{we}(p) \} \quad \text{bei Führung}$$

$$x(t) = -e(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ z(p) \cdot G_z(p) \} \quad \text{bei Störung}$$

4.4. Zur Stabilität des einschleifigen Regelkreises

Die dynamischen Eigenschaften des geschlossenen Regelkreises finden ihren Ausdruck in der Führungsübertragungsfunktion

$$G_w(p) = \frac{G_o(p)}{1 + G_o(p)}$$

Wegen des eindeutigen Zusammenhangs zwischen $G_w(p)$ und $G_o(p)$ und damit dem Verlauf der Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises korreliert der Verlauf letzterer mit den dynamischen Eigenschaften des geschlossenen Regelkreises. Bei der ingenieurmäßigen Beurteilung der Dynamik von geschlossenen Regelkreisen geht man vorzugsweise vom Verlauf der Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises aus.

Für einen technisch sinnvollen Regelkreis wird nicht nur gefordert, daß er stabil arbeitet. Er muß sich je nach Aufgabenstellung in genügend sicherem Abstand von der Stabilitätsgrenze befinden. Diese Forderung ist gleichbedeutend mit bestimmten Forderungen an $G_w(p)$ und damit an den Verlauf der Frequenzkennlinien des offenen Regelkreises. Anhand des Stabilitätskriteriums von Nyquist läßt sich folgende Forderung ableiten.

Der geschlossene Regelkreis ist stabil, wenn die Phasenfrequenzkennlinie des offenen Regelkreises bei der Durchtritts- oder Schnittfrequenz ω_d den Wert $\varphi > -180^\circ$ besitzt. ω_d ist die Frequenz, bei der $|G_o(j\omega)| = 1$ ist, d. h. bei der $\lg |G_o(j\omega)|$ die 0 dB-Achse schneidet.

Eine Aussage zum Sicherheitsabstand von der Stabilitätsgrenze und damit zur Dämpfung von Schwingungen der Ein- und Ausgangsgrößen der Regelkreiselemente im geschlossenen Regelkreis bei Veränderung der Führungsgröße macht der sogenannte Phasenrand.

Es gilt:

$$\gamma_s = 180^\circ + \varphi \quad (87)$$

Für technisch sinnvolle Regelkreise besteht die Forderung $\gamma_s > 0$. Die Dämpfung der Ausgleichsvorgänge im Regelkreis nimmt mit größer werdendem γ_s zu.

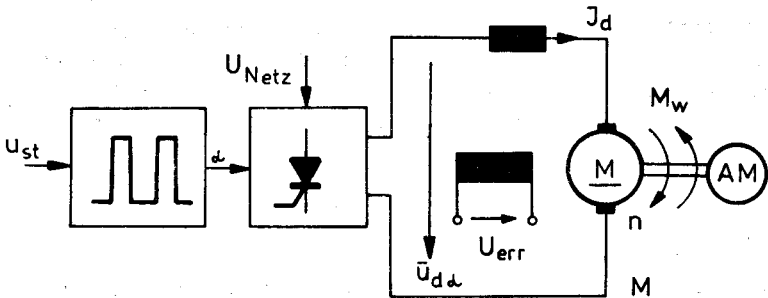
5. Zur Wahl der Regelkreisstruktur und der Parameter der Anpassungselemente

5.1. Strukturen einfacher automatischer Steuerungen und Gesichtspunkte für ihre Auswahl

Bei den vorangepaßten automatischen Steuerungen ist zwischen offenen und geschlossenen Strukturen zu unterscheiden.

- Steuerkette

Die offene Struktur - auch Steuerkette - ist dadurch gekennzeichnet, daß nur bei konstanten Anlagenparametern und konstanten äußeren Einflußgrößen eine feste, eindeutige Zuordnung zwischen steuernder und gesteuerter Größe besteht.



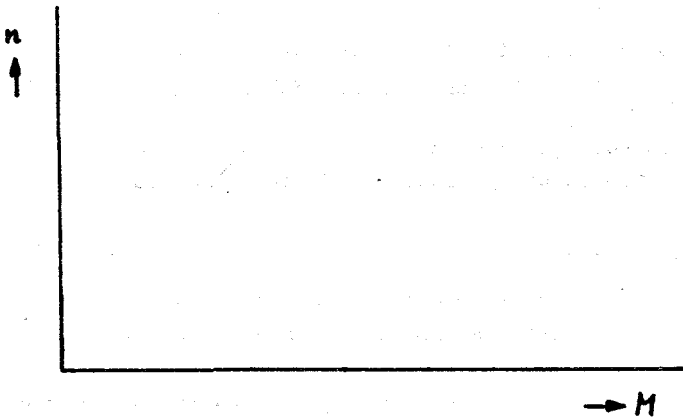


Bild 54 Anlagenskizze und stationäre Kennlinien einer Steuerkette bestand nur Stromrichter und Gleichstromnebenschlußmotor

Diese Voraussetzung ist nicht erfüllbar. Deshalb ist jedem Wert der steuernden Größe ein Wertebereich der gesteuerten Größe zugeordnet. Wenn die im ungünstigsten Fall auftretenden Abweichungen von der Einstellung unter Nennbedingungen zulässig sind oder eine gelegentliche Nachstellung von Hand ausreicht, kann eine offene Steuerkette eingesetzt werden.

Verlangt der zugeordnete technologische Prozeß sehr geringe Abweichungen von der Einstellung unter Nennbedingungen, dann sind diese Forderungen oftmals mit einer Steuerkette nicht zu erfüllen. Es ist der Einsatz einer geschlossenen Struktur erforderlich.

- Störgrößenaufschaltung

Sie stellt ebenfalls eine offene Struktur dar. Hier wird eine von der Störgröße abgeleitete Hilfssteuergröße u_{st}^* so mit der Hauptsteuergröße u_{st} kombiniert, daß der Einfluß der Störgröße z auf die Ausgangsgröße y verschwindet.

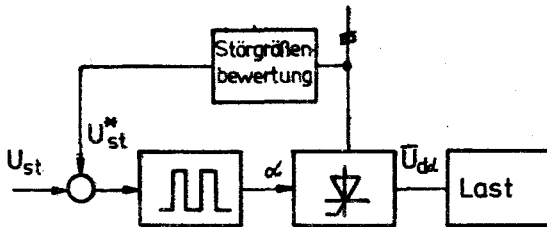


Bild 55 Anlagenskizze einer Störgrößenaufschaltung

Bild 55 zeigt die Realisierung dieses Prinzips am Beispiel der Aufschaltung der Störgröße "Netzspannung" bei einer Gleichspannungssteuerung mit Hilfe einer Stromrichteranordnung. Wenn die Netzspannung U_{Netz} von ihrem Nennwert abweicht, muß der Zündwinkel α so nachgestellt werden, daß die Gleichspannung \bar{u}_{dcl} den der Steuerspannung u_{st} zugeordneten Wert weiterhin beibehält.

Das Prinzip der Störgrößenaufschaltung ist gerätetechnisch einfach zu realisieren und dann vorteilhaft, wenn eine Störgröße die dominierende Störgröße ist (und bleibt). Es treten keine Stabilitätsprobleme auf. Von Nachteil ist, daß immer nur der Einfluß der "aufgeschalteten" Störgröße auf die Ausgangsgröße stationär ausgeschaltet werden kann.

Die wesentlichen geschlossenen und vorangepaßten Strukturen bilden die Regelkreise. In dem das Prinzip der Gegenkopplung ausgenutzt wird, erfolgt eine weitgehende Angleichung des Istwertes an den Sollwert, auch unter dem Einfluß an unterschiedlichen Stellen und mit unterschiedlicher Intensität angreifender Störgrößen, und damit die Einhaltung eines festen Verhältnisses zwischen Sollwert und Regelgröße.

- einschleifiger Regelkreis

Die einfache Regelkreisstruktur ist der einschleifige Regelkreis.

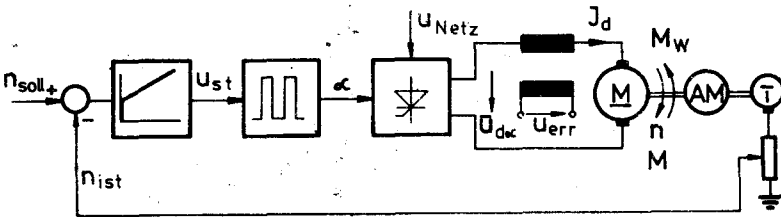


Bild 56 Blockschaltbild des einschleifigen Drehzahl-Regelkreises

Bei Einsatz herkömmlicher Regler (P-, PI- und PID-Verhalten) ist damit eine dynamisch hochwertige Regelung reali-

sierbar, wenn die Regelstrecke maximal eine PT_2 -Kette ist. Suchen Sie die Begründung für diese Aussage. Die gezielte Begrenzung im einschleifigen Regelkreis wirkender Größen ist insbesondere bei Antriebsregelungen nicht ohne weiteres möglich.

- Ablöse- oder Wechselregelung

Zwecks Gewährleistung von Begrenzungen in Verbindung mit einer Regelung wurde in der Vergangenheit die sogenannte Ablöse- oder Wechselregelung eingesetzt.

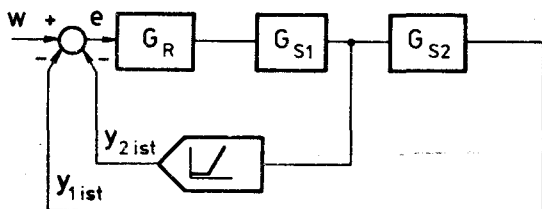


Bild 57 Blockschaltbild einer Ablöse- oder Wechselregelung

Sie wird aufgrund dessen, daß ein herkömmlicher Regler nicht gleichzeitig optimal an 2 unterschiedliche Regelstreckenstrukturen angepaßt werden kann und die dynamische Kopplung beider Regelkreise unvermeidbar ist, nur noch selten realisiert.

- Kaskadenregelung

Für den Aufbau von Regelungen, in die elektroenergetische Wandler insbesondere elektrische Maschinen einbezogen sind, hat sich seit geraumer Zeit die sogenannte Kaskadenregelung (auch Regelung mit Hilfsregelgröße oder unterlagelter Regelung) durchgesetzt.

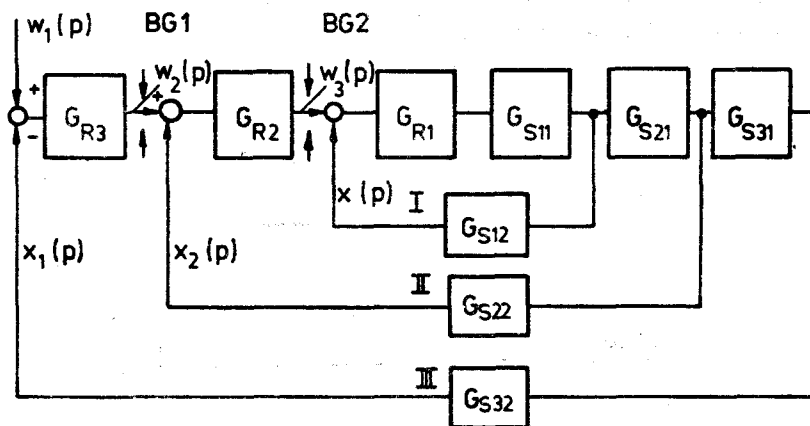


Bild 51 Blockschaltbild der Kaskadenregelung

Sie zeichnet sich dadurch aus, daß eine Anlage mit mehreren Energiespeichern (L, C, I), die ihren Ausdruck in mehreren größeren Verzögerungs- und/oder Integrationszeitkonstanten T finden, so in Teilregelstrecken aufgespalten wird, daß jede eine große Zeitkonstante T enthält. Die am weitesten zum Eingang hin liegende Teilregelstrecke 1, die auch das Stellglied enthält, wird durch Hinzufügen eines Reglers 1 und einer Istwerterfassung zu dem Regelkreis I ergänzt.

Dieser bildet zusammen mit der Teilregelstrecke 2 die übergeordnete Regelstrecke, d. h. die des Regelkreises II. Sie wird durch Hinzufügen eines Reglers 2 und einer Istwertfassung zu dem Regelkreis II ergänzt. Es werden im allgemeinen so viele Regelkreise ineinander geschachtelt, wie große Zeitkonstanten T_v in der Anlage vorhanden sind. Damit läßt sich eine beliebig große Zahl von großen Zeitkonstanten weitgehend kompensieren.

Bei der Kaskadenregelung führt der jeweils übergeordnete Regelkreis den unmittelbar untergeordneten Regelkreis. Die durch den Regler umgeformte Regelabweichung des übergeordneten Regelkreises bildet den Sollwert für den untergeordneten Regelkreis. Man bezeichnet die Regelgrößen der unterlagerten Regelkreise als Hilfsregelgrößen. Sie lassen sich durch Begrenzung des ihnen zugeordneten Sollwertes sowie durch eine geeignete Anpassung des Reglers an die zugeordnete Teilregelstrecke statisch und dynamisch zuverlässig begrenzen.

Im Vergleich zur einschleifigen Regelung hat die Kaskadenregelung folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- bessere Dynamik, wenn die Zahl der großen Zeitkonstanten der Regelstrecke > 2 ist.
- statisch und dynamisch sicher wirkende Begrenzung der Hilfsregelgrößen unabhängig von der Zahl der großen Zeitkonstanten.
- einfache und übersichtliche Inbetriebnahme der Teilregelkreise, beginnend mit dem am weitesten innenliegenden.
- Einsatz einfach einzustellender Regler, d. h. P- u. PI-Regler.

Nachteile:

- größere Zahl von Reglern und Einrichtungen zur Istwertfassung
- Verschlechterung der erzielbaren Dynamik, wenn die Zahl der großen Zeitkonstanten der Regelstrecke < 3 ist.

5.2. Die Synthese eines Regelkreises anhand seiner Frequenzkennlinien (FK) im aufgetrennten Zustand (Frequenzkennlinienverfahren)

- Vorbemerkungen

Dem Verfahren liegt die Erkenntnis zu Grunde, daß zwischen folgenden Beschreibungsformen des Regelkreises ein eindeutiger Zusammenhang besteht.

- | | | |
|-----------------------------------|---|--------------------------------|
| • Frequenzgang | } | des aufgetrennten Regel- |
| Frequenzkennlinien | | kreises |
| • Frequenzkennlinien | } | des geschlossenen Regelkreises |
| Übergangsfunktion (Sprungantwort) | | |

Ist in einer dieser Beschreibungsformen das Verhalten des Regelkreises bekannt oder vorgegeben, so spiegelt sich dieses zwangsläufig auch in den anderen Beschreibungsformen wieder. Ist zum Beispiel für den geschlossenen Regelkreis der Verlauf der Sprungantwort der Regelgröße bei Führung (Führungssprungantwort) vorgegeben, so liegt damit auch fest, welchen Verlauf die FK des aufgetrennten Regelkreises haben müssen.

- Ablauf der Syntheseüberlegungen

1. Schritt

Anhand der die statischen und dynamischen Güteparameter betreffenden Forderungen an den geschlossenen Regelkreis bei Führung wird der Verlauf der FK des aufgetrennten Regelkreises festgelegt.

Man nennt diese die "gewünschten Frequenzkennlinien" $L_{of}(\omega)$ und $\varphi_{of}(\omega)$. Dazu müssen die Beziehungen bekannt sein, die zwischen den statischen und dynamischen Güteparametern des geschlossenen Regelkreises einerseits und dem Verlauf der FK des offenen Regelkreises andererseits vorhanden sind.

2. Schritt

Der zu realisierenden Regelkreis muß so gestaltet werden, daß seine FK $L_o(\omega)$ und $\varphi_o(\omega)$ mit den gewünschten FK übereinstimmen. Die Möglichkeiten der Gestaltung sind jedoch häufig stark eingeschränkt, da der energieübertragende Teil des Regelkreises vorwiegend nach energetischen Gesichtspunkten ausgelegt werden muß und somit bei den Syntheseüberlegungen als vorgegeben zu betrachten ist. Es soll künftig dieser Teil des Regelkreises als "vorhandener Teil" bezeichnet werden. Seine regelungstechnischen Parameter bestimmen seine ÜTF $F_s(p)$ und seine FK $L_s(\omega)$ und $\varphi_s(\omega)$.

Die Gestaltung des Regelkreises beschränkt sich demnach auf die Ergänzung des vorhandenen Teils durch geeignete Anpassungselemente (Regelverstärker, passive Korrekturnetzwerke) und die Wahl einer geeigneten Regelkreisstruktur. Fällt die Wahl auf eine Kaskadenregelung, so muß jeder Teilregelkreis für sich anhand von Syntheseüberlegungen aufgebaut werden. Dabei ist mit dem innersten Regelkreis zu beginnen. Es ist zu beachten, daß jeder geschlossene Teilregelkreis zum Bestandteil der Regelstrecke des unmittelbar überlagerten Regelkreises wird.

Für die Gestaltung des für den jeweiligen Anwendungsfall notwendigen Anpassungselements sind die sogenannten "Differenzfrequenzkennlinien" $L_k(\omega)$ und $\varphi_k(\omega)$ maßgebend, die sich als Differenz zwischen den gewünschten FK und denen des vorhandenen Teils der Anlage ergeben.

$$L_k(\omega) =$$

$$\varphi_k(\omega) =$$

Wenn $L_k(\omega)$ und $\varphi_k(\omega)$ ermittelt worden sind, muß ein geeignetes Anpassungselement ausgewählt (Struktur) und so ausgelegt (Parameter) werden, daß es die geforderten FK ($L_k(\omega)$; $\varphi_k(\omega)$) besitzt.

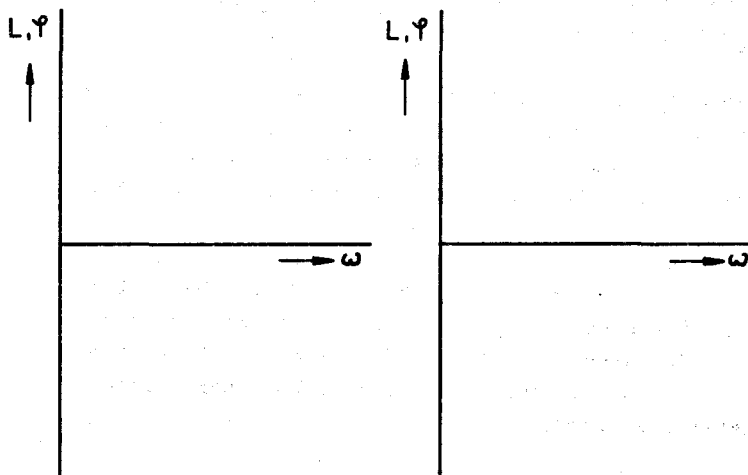


Bild 59 Beispiele für die Ermittlung von $L_k(\omega)$ und $\varphi_k(\omega)$

3. Schritt

Es ist zu überprüfen, in welchem Maße es durch die Syntheseüberlegungen gelungen ist, einen Regelkreis zu konzipieren, der die gestellten Güteforderungen erfüllt. Die Forderungen können in der Praxis nur dann als erfüllt gelten, wenn auch deren gerätetechnische Realisierbarkeit nachgewiesen werden kann.

Ist es nicht gelungen, $L_o(\omega) = L_{of}(\omega)$ und $\varphi_o(\omega) = \varphi_{of}(\omega)$ zu machen, so ist zu überprüfen, ob die Abweichungen zwischen dem geforderten und zu erwartenden Verhalten des Regelkreises zugelassen werden können oder ob durch weitergehende Syntheseüberlegungen Aussicht auf eine bessere Lösung der Aufgabe besteht.

- Ablaufschema für die Synthese eines Regelkreises mit Hilfe des Frequenzkennlinien-Verfahrens.

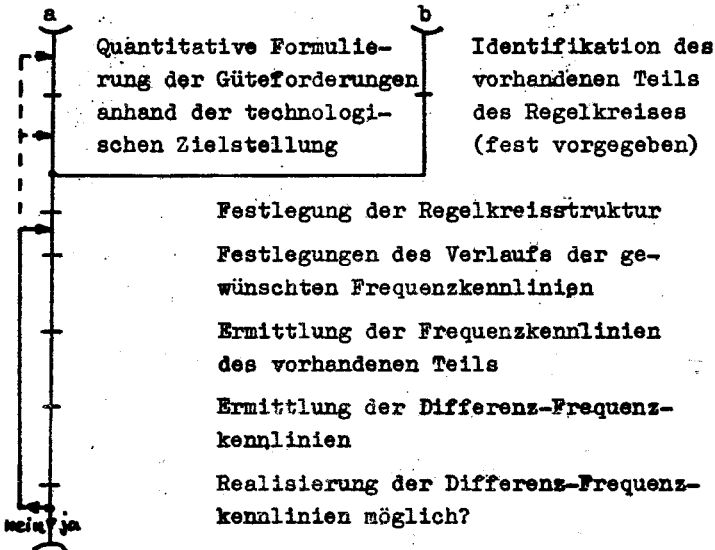


Bild 63 Ablaufschema für Synthese- und Analyse-schritte

- Die Festlegung des Verlaufs der gewünschten Frequenzkennlinien $L_{of}(\omega)$ und $\varphi_{of}(\omega)$

* Bemerkungen zum prinzipiellen Verlauf

Der Umstand, daß nur technisch sinnvolle Regelkreise für den Ingenieur von Interesse sind, findet darin seinen Ausdruck, daß die FK $L_o(\omega)$ und $\varphi_o(\omega)$ technisch sinnvoller Regelkreise einander ähnlich sind. Daraus folgt, daß einige übergeordnete, das statische und dynamische Verhalten des Regelkreises bei Führung betreffende Gesichtspunkte bereits anhand des prinzipiellen Verlaufs dieser FK erläutert werden können.

Diese haben folgendes Aussehen:

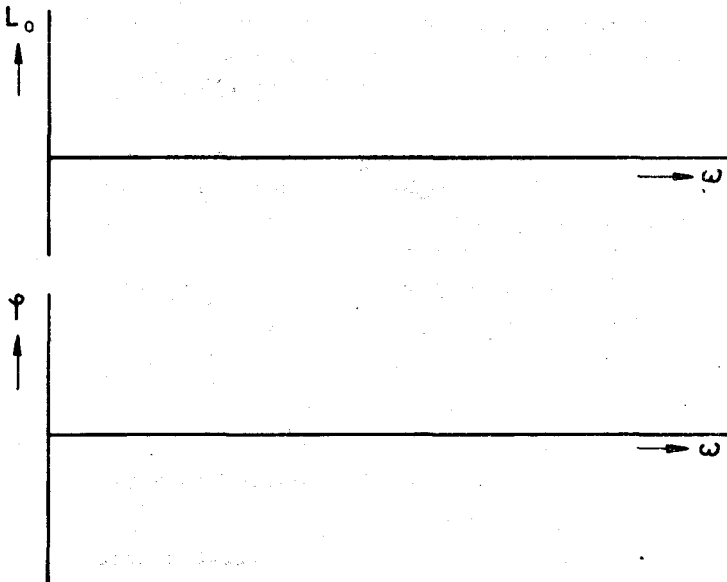


Bild 61 Prinzipieller Verlauf der Frequenzkennlinien eines technisch sinnvollen Regelkreises

Man unterscheidet drei wesentliche Bereiche

Bereich I ($0 < \omega < \omega_{g1}$)

$L_o(\omega)$ in diesem Bereich korreliert mit der bleibenden Regelabweichung (s. a. Abschn. 4.2.3.)

Bereich II ($\omega_{g1} < \omega < \omega_{g2}$)

$L_o(\omega)$ in diesem Bereich korreliert mit der Dynamik und damit auch mit der Stabilität - (s. a. Abschn. 4.4.)

Bereich III ($\omega > \omega_{g2}$)

Der Verlauf von $L_o(\omega)$ ist ohne wesentlichen Einfluß auf das Verhalten des Regelkreises.

- + Quantitative Beziehungen zwischen dem Verlauf von $L_{of}(\omega)$ und $\varphi_{of}(\omega)$ und den Güteparametern des geschlossenen Regelkreises bei Führung

o Bereich I

Die Steigerung von $L_{of}(\omega)$ und damit der Verlauf von $\varphi_{of}(\omega)$ werden dadurch bestimmt, ob eine bleibende Regelabweichung in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Führungsgröße zulässig ist oder nicht (s. a. Abschn. 4.2.3.)

$\lim_{p \rightarrow 0} G_{of}(p) = \frac{1}{p^{\nu_T \nu}}$	Steigung von $L_{of}(\omega)$ für $\omega \rightarrow 0$	Verlauf von $\varphi_{of}(\omega)$ für $\omega \rightarrow 0$
$\nu = 0$	0	0
$\nu = 1$	- 20 dB/dek	$-\frac{\pi}{2}$
$\nu = 2$	- 40 dB/dek	-

o Bereich II

Damit der Regelkreis stabil ist, muß die Bedingung $\varphi_{\text{of}}(\omega_d) > -180^\circ$ erfüllt sein. Diese Forderung bedingt, daß $L_{\text{of}}(\omega)$ in der Mehrzahl der Anwendungsfälle beiderseits von ω_d die Steigung -20 dB/dek besitzen muß. Mit der Breite dieses Bereichs $2\Delta\omega^*$ nimmt das relative Überschwingen der Führungsprungantwort ab.

Der Bereich muß für das gleiche relative Überschwingen umso größer sein, je kleiner die Steigungen von $L_{\text{of}}(\omega)$ in den beiden angrenzenden Bereichen sind [Einfluß auf $\varphi_{\text{of}}(\omega)$]. Man muß bei der Synthese versuchen, den Bereich in Richtung niedriger Frequenzen möglichst bis $\omega < \omega_{g1}$ auszuweiten. In Richtung höherer Frequenzen wird er durch die Summenzeitkonstante T_k begrenzt. T_k ist die Zusammenfassung aller im Regelkreis vorhandenen kleinen Zeitkonstanten. Es gilt:

$$T_k = \sum_{\epsilon=1}^n T_{\epsilon} \quad T_{\epsilon} = \sum_{\mu=1}^m T_{\mu}$$

wobei T_{μ} bzw. T_{ϵ} die im Regelkreis vorhandenen kleinen Verzögerungs- bzw. Vorhaltzeitkonstanten sind.

Die Zusammenfassung ist anwendbar, wenn $5T_k < T_r$ ist. Dabei ist T_r die kleinste der im Regelkreis vorhandenen großen Verzögerungszeitkonstanten, die nicht in die Summenzeitkonstante eingehen. Durch den Abstand ω_d zu $\frac{1}{T_k}$ wird das relative Überschwingen bestimmt.

Wird angesetzt $\omega_d = \frac{1}{2T_k}$, so gilt:

a	1	1,5	2	4
Δh				

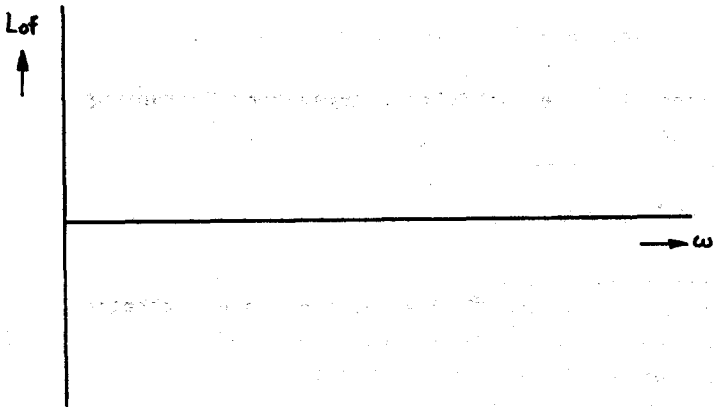


Bild 62 Abhängigkeit von Δh von der Lage von ω_d
und $1/T_k$

Für die Einschwingzeit gilt:

$$T_m =$$

Diese Angaben zum relativen Überschwingen und zur Einschwingzeit sind exakt für

$$G_o(p) =$$

Sie gelten näherungsweise in den Fällen, wo $L_{of}(\omega)$ beiderseitig von ω_d einen Anstieg von -20 dB/dek besitzt und das System schwingungsfähig ist.

Bei Lagerregelungen darf vielfach die Beschleunigung $\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$ einen Maximalwert nicht überschreiten, wenn die Führungsgröße sprungförmig verändert wird.

Dadurch ist die nachfolgend angegebene Begrenzung von ω_d bedingt.

$$\omega_d < \sqrt{\frac{\ddot{x}_{\max}}{w_0}}$$

• Bereich III

Hier sollte $L_{of}(\omega) \ll 0$ sein, damit die gewöhnlich mit der Frequenz anwachsenden Störeinflüsse auf das Verhalten des Regelkreises ohne Einfluß bleiben.

• Übergänge zwischen den Bereichen I und II sowie II und III.

An den Übergangsstellen sollte $L_{of}(\omega)$ eine möglichst große (Vorzeichen!) Steigung besitzen. Ihr geringster Wert sollte - 60 dB/dek nicht unterschreiten. Je flacher $L_{of}(\omega)$ in den Grenzbereichen verläuft, um so leichter läßt sich ein entsprechendes Anpassungsglied ausführen und um so weniger wird der Phasenrand δ_s verringert.

- Nach dem Betrags- und symmetrischen Optimum entworfene Regelkreise

Nach diesen beiden Optimierungsvorschriften entworfene Regelkreise weisen ein solches statisches und dynamisches Verhalten auf, das für viele Anwendungsfälle in der Antriebstechnik gefordert wird. Beiden Vorschriften sind entsprechende Verläufe der gewünschten FK zugeordnet.

- * Betragsoptimum (gutes Führungsverhalten, d. h. geringe Anregelzeit bei geringem relativem Überschwingen)

Ein Regelkreis gilt als betragsoptimal eingestellt, wenn

$$G_{oBO}(p) = \quad (88)$$

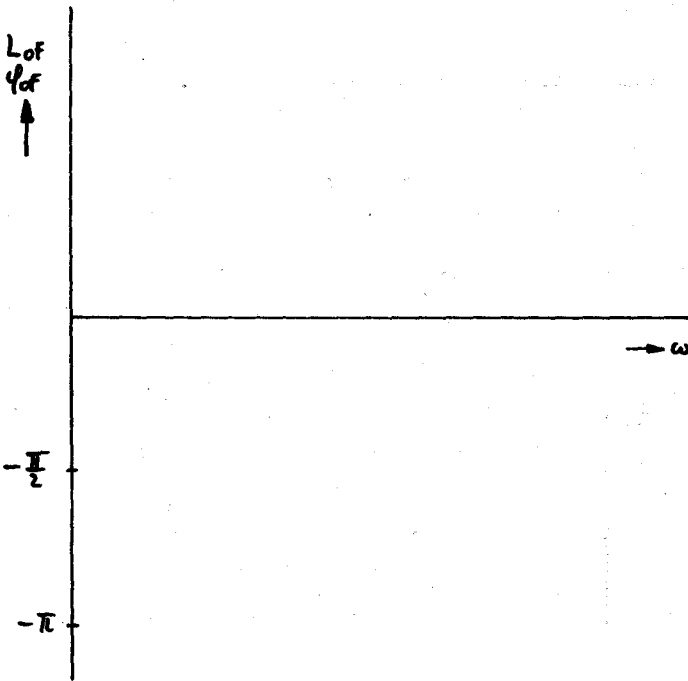


Bild 6^a Dem Betragsoptimum entsprechende Frequenzkennlinien

Die Übertragungsfunktion bei Führung lautet:

$$G_{wBO}(p) = \quad (89)$$

Die Führungssprungantwort lautet:

$$x(t) =$$

$$x(t) = \quad (90)$$

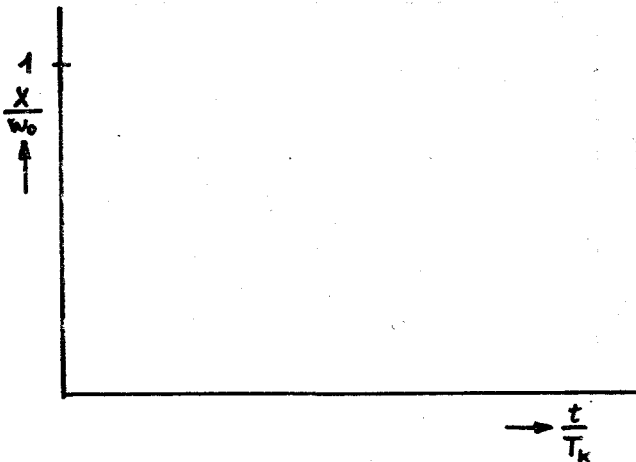


Bild 63 Führungssprungantwort eines betragsoptimal
eingestellten Regelkreises

*Symmetrisches Optimum (bei Eintritt der Störgrößen nahe am Eingang der Regelstrecke gutes Störverhalten, d. h. keine bleibende Regelabweichung bei Störgrößen der Form $z(t) = z_0 \delta(t)$ für $t \rightarrow \infty$, schnelles Verschwinden der dynamischen Regelabweichung; ungünstiges Führungsverhalten)

Ein Regelkreis gilt als symmetrisch optimal eingestellt, wenn er die ÜTF

$$G_{oSO}(p) = \quad (91)$$

besitzt.

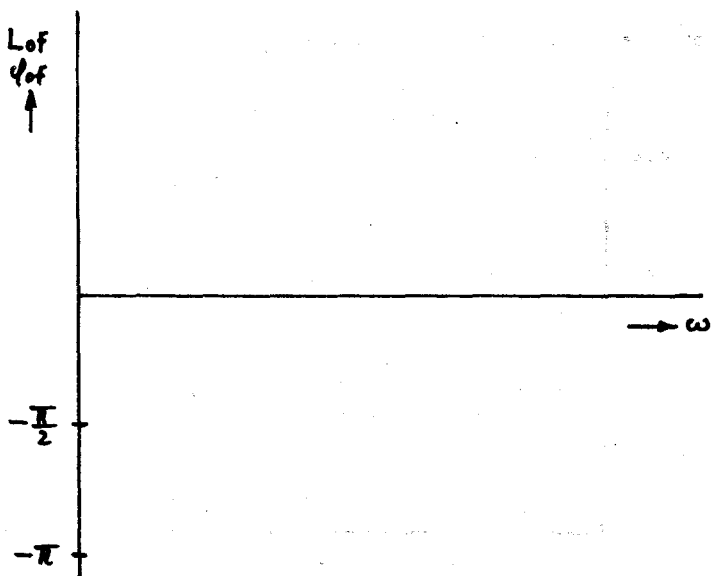


Bild 65 Dem symmetrischen Optimum entsprechende Frequenzkennlinien

Die Übertragungsfunktion bei Führung lautet:

$$G_{wSO}(p) = \quad (92)$$

Die Führungssprungantwort lautet:

$$x(t) = \quad (93)$$

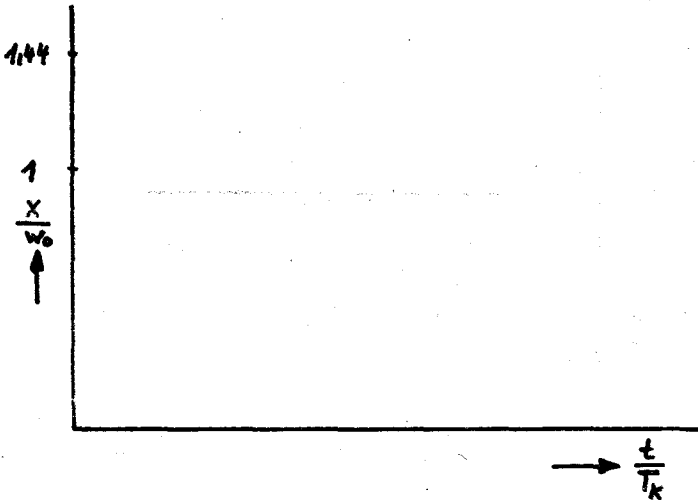


Bild 66 Führungssprungantwort eines symmetr. optimal eingestellten Regelkreises

- Möglichkeiten zur Realisierung der gewünschten Frequenzkennlinien

Wie bereits gesagt worden ist, muß der vorhandene Teil des Regelkreises durch ein Anpassungselement so ergänzt werden, daß der Regelkreis die gestellten Forderungen erfüllt. Die Ergänzung durch ein Reihenkorrekturnetzwerk und durch einen Regelverstärker geschieht prinzipiell in der gleichen Weise. Der Unterschied besteht darin, daß ein Regelverstärker in den Fällen angesetzt werden muß, wo $L_k(\omega)$ positiv sein muß, d. h. eine Verstärkungserhöhung erforderlich ist.

Wenn man bei den Syntheseüberlegungen zu dem Schluß kommt, daß mit einem betrags- oder symmetrisch optimal entworfenen Regelkreis die gestellten Güteforderungen erfüllt werden können, dann ist gegebenenfalls bei entsprechender Struktur des vorhandenen Teils des Regelkreises die Anwendung einfacher Einstellvorschriften möglich.

Sie lassen sich mit Hilfe folgender Beziehungen ableiten:

$$G_{oOpt}(p) = G_{ROpt}(p) \cdot G_s(p)$$

$$G_{ROpt}(p) = \frac{G_{oOpt}(p)}{G_s(p)} \quad (94)$$

$$\text{Betragsoptimum: } G_{oBO}(p) [\text{lt. Gl. (89)}] = G_{oOpt}(p)$$

Tafel auf Seite 166.

$G_S(p)$	$G_{RBO}(p)$	Einstellvorschrift
$\frac{1}{pT_1(1+pT_k)}$		
$\frac{V_S}{(1+pT_1)(1+pT_k)}$		
$\frac{V_S}{(1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_k)}$		
$\frac{1}{pT_1(1+pT_2)(1+pT_k)}$		

Symmetrisches Optimum: $G_{OSO}(p)$ [lt. Gl. (91)] = $G_{opt}(p)$

$G_S(p)$	$G_{RSO}(p)$	Einstellvorschrift
$\frac{1}{pT_1(1+pT_k)}$		
$\frac{1}{pT_1(1+pT_k)^2}$		
$\frac{1}{p^2T_1^2(1+pT_k)}$		

Wenn der vorhandene Teil des Regelkreises eine UTF besitzt, die durch einen einfachen Regelverstärker (P, PI- oder PID-Verhalten) nicht zu einem exakt betrags- oder symmetrisch optimal eingestellten Regelkreis ergänzt werden kann, dann läßt sich das dem jeweiligen Optimum entsprechende dynamische Verhalten trotzdem in guter Näherung erzielen. Das Anpassungselement muß in diesem Falle so gestaltet werden, daß $L_o(\omega) = L_s(\omega) + L_k(\omega)$ mit $L_{OBO}(\omega)$ bzw. $L_{OSO}(\omega)$ im Bereich II übereinstimmt.