

# INGENIEUR- FERNSTUDIUM

BIRNSTIEL

## EINFÜHRUNG IN DIE REGELUNGS- UND STEUERUNGSTECHNIK

1

EINLEITUNG, GRUNDBEGRIFFE,  
BEISPIELE

HERAUSGEBER  
INGENIEURSCHULE FÜR  
FEINWERKTECHNIK JENA

1008-01/61

**Herausgeber:**  
**Ingenieurschule für Feinwerktechnik**  
**Jena**

# **Einführung in die Regelungs- und Steuerungstechnik**

**Lehrbrief 1**  
**Einleitung, Grundbegriffe, Beispiele**  
**von**  
**Horst Birnstiel**  
**1. Auflage**

**1961**

---

**Zentralstelle für Fachschulausbildung**  
**– Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie –**  
**Dresden**

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

---

Gebühr DM 2.-

Ag 616/ 271 /61

Best.-Nr. 1008-01/ 61

## 1. Einleitung

=====

### 1.1 Automatisierungstechnik und Gesellschaft

"Unsere Epoche ist die Epoche der konsequenten Erneuerung der Existenzformen der menschlichen Gesellschaft, eines unvergleichlichen Höhenflugs zur Beherrschung der Naturkräfte, zu einem fortschrittlicheren sozialen System."

Diese vor der 15. Vollversammlung der UNO von N.S. Chruschtschow gesprochenen Worte charakterisieren den Inhalt der Zeit, in der wir leben.

Der "unvergleichliche Höhenflug zur Beherrschung der Naturkräfte" wird durch "die drei großen A" bestimmt: Automatisierung, Atomenergie, Aero- und Astronautik. Dabei ist die Entwicklung der Atomwissenschaft und der Aero- und Astronautik erst durch hochentwickelte automatische Geräte möglich geworden. Die Automatisierungstechnik nimmt also unter den modernen technischen Disziplinen eine Vorrangstellung ein. Sie ist der Schlüssel zu einer nie gekannten Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Diese Entwicklung wiederum eröffnet allen Menschen herrliche Perspektiven:

Der Mensch wird mehr und mehr von physischer Arbeit befreit und wendet sich vorwiegend schöpferischer Tätigkeit zu. Damit verwischt der Unterschied zwischen körperlicher und geistiger Arbeit.

Bisher nicht mögliche intensive oder gefährvolle Produktionsprozesse können realisiert werden. Es wird die materielle Basis für einen allgemeinen Wohlstand aller Menschen der Erde geschaffen.

Für eine solche durch die Automatisierung möglich gewordene Entwicklung ist die sozialistische Gesellschaftsordnung naturgemäß und logischerweise die fruchtbarste Basis. Nur auf dieser Basis gibt es keine hemmenden Widersprüche zwischen Automatisierung und gesellschaftlicher Entwicklung. Nur in dieser gesellschaftlichen Ordnung ist eine menschlich



sinnvolle Verwendung und Verteilung der durch die hochentwickelte Technik in immer größerem Maße geschaffenen Produkte auf die Dauer möglich.

Mit der Beherrschung der Naturkräfte lernen die Menschen auch die Beherrschung der gesellschaftlichen Kräfte und finden zu fortschrittlichen sozialen Systemen des Zusammenlebens. Die heutige Entwicklung in der Welt zeigt diese Erneuerung der Existenzformen der menschlichen Gesellschaft.

Bereits wir und nicht erst unsere Nachfahren im Jahre 6939 hoffen "mit einem berechtigten Überlegenheitsgefühl" die Zeilen Albert Einsteins lesen zu können, die neben anderen Schriftstücken auf dem Gelände der Weltausstellung 1939 bei New York vergraben liegen und die, wie die Inschrift eines Obelisken auffordert, nach 5000 Jahren hervorgeholt werden sollen.

Einstein hat 1939 in diesem "Brief an die Nachkommen" folgendes geschrieben:

"Unsere Zeit ist reich an schöpferischen Gedanken, und die Entdeckungen, die wir gemacht haben, könnten uns das Leben beträchtlich erleichtern. Mit Hilfe der elektrischen Energie durchkreuzen wir die Ozeane. Wir bedienen uns der Elektrizität, um die Menschheit von der anstrengenden körperlichen Arbeit zu befreien. Wir können fliegen und können leicht mittels elektrischer Wellen über den ganzen Planeten Nachrichten aussenden.

Bei alledem ist aber die Produktion und Verteilung der Waren bei uns völlig unorganisiert, und die Menschen müssen in Furcht leben!

Sie fürchten, aus dem Wirtschaftsablauf ausgeschaltet zu werden und alles zu verlieren. Außerdem töten die Menschen, die in verschiedenen Ländern leben, einander in gewissen Zeitabständen, und deshalb muß jeder, der an die Zukunft denkt, in ständiger Angst leben.

Ich glaube, daß unsere Nachfahren diese Zeilen mit einem berechtigten Überlegenheitsgefühl lesen werden.

Albert Einstein"

Schon heute ist die Produktion und die Verteilung der Waren im sozialistischen Teil der Erde organisiert und die Menschen brauchen nicht mehr zu fürchten, durch Krisen oder durch steigende Automatisierung aus dem Wirtschaftsablauf ausgeschaltet zu werden. Und auch das "gegenseitige Töten in gewissen Zeitabständen", die Kriege, wird es bald als etwas entsetzlich Menschenunwürdiges auf der Erde nicht mehr geben.

Aller technischer Fortschritt dient dann ausschließlich dem Wohle der Menschen.

Dabei wird die Automatisierung eine führende Rolle spielen.

## 1.2 Was ist Automatisierung?

Sie ist ein technischer Entwicklungsprozeß, der sich auf alle technischen Disziplinen ausdehnt. Die Automatisierung ist die höchste Stufe der Einwirkung des Menschen auf seine Umwelt. Diese Einwirkung verläuft in drei Stufen:

1. Mit Werkzeugen, die durch die Muskelkraft des Menschen bewegt werden.
2. Mit Maschinen, die der Mensch zwar bedient, die ihm aber schwere körperliche Arbeit abnehmen (Mechanisierung).
3. Mit Automaten, die sich selbst bedienen und die vom Menschen nur erdacht, gebaut, eingesetzt und zuweilen überwacht zu werden brauchen (Automatisierung)

Zu 1.: Die Zeiten, in denen der Mensch nur mittels Werkzeugen auf seine Umwelt einwirkte, sind geradezu nach diesen Werkzeugen benannt: Steinzeit, Bronzezeit, Eisenzeit. Im Feudalismus war das Arbeiten mit Werkzeugen zu hoher Blüte gediehen.

Zu 2.: Die Kraftmaschine brachte in wechselseitiger Befruchtung als Organisationsform der Menschen den Kapitalismus hervor. Die Dienstbarmachung von Naturkräften (Dampfmaschine, Motoren, Elektrizität) führte zu einer großen Steigerung

der Arbeitsproduktivität. Gleichzeitig wurde der Mensch aber zum "Maschinenzubehör", zum Bediener.

Auf wissenschaftlicher Seite ist mit dem Kapitalismus die stürmische Entwicklung der technischen Wissenschaften verbunden und auf gesellschaftlicher Seite die Tatsache, daß die in weit größerem Umfange als früher geschaffenen Produkte nicht sinnvoll allen gleichmäßig zugute kommen, sondern nur wenigen und überdies "in gewissen Zeitabständen" durch Krisen und Kriege zerstört werden.

Zu 3.: Der Mensch wird vom Bediener zum Bedienten der Technik. Seine Tätigkeit wird auf eine höhere Stufe gehoben. Die Maschinen steuern sich selbst, die Arbeitsprozesse führen sich selbst. Der Mensch erdenkt die selbsttätigen Systeme, die das vermögen, baut sie, setzt sie ein und kontrolliert sie zuweilen. Auf wissenschaftlicher Seite ist mit dem Automaten die Entwicklung der Automatisierungstechnik, das ist die Entwicklung der Meß-, Steuerungs-, Regelungs- und Rechen-technik verbunden. Als technisch-wissenschaftliche Disziplin ist die Automatisierungstechnik kaum 15 Jahre alt. Auf gesellschaftlicher Seite stellt das Automatenzeitalter die Alternative, daß die Menschen sich durch technisch-raffinierte Hilfsmittel entweder gegenseitig ausrotten oder aber der ungeheueren technischen Entwicklung durch eine entsprechende gesellschaftliche Entwicklung Rechnung tragen. Es dürfte inzwischen sicher sein, wofür sich die Völker entscheiden.

#### **Zusammenfassend:**

Automatisierung ist die systematische Einführung von Produktions-, Transport-, Meß-, Kontroll-, Befehls-, Verwaltungs- und Rechenmethoden, die selbsttätige Systeme, Maschinen, Instrumente usw. verwenden. Selbsttätig heißt, daß sie während bestimmter Zeit gänzlich oder zum Teil ohne menschliches Eingreifen funktionieren können.

### 1.3 Warum Automatisierungstechnik?

Es kann mehr, besser, billiger, schneller und für den Menschen gefahrloser produziert werden.

Der Sinn der Automatisierung versteht sich in der sozialistischen Gesellschaftsordnung von selbst, weil ihr Ergebnis allen Menschen zugute kommt.

### 1.4 Wie automatisieren?

Antwort: Man führe systematisch selbsttätige Produktions-, Transport-, Meß-, Kontroll-, Befehls-, Verwaltungs- und Rechenmethoden in der Industrie und Verwaltung ein. Das setzt natürlich die Entwicklung und Herstellung entsprechender Geräte und - nicht zuletzt - die Qualifizierung von Menschen voraus.

Dabei kann der zu automatisierende Prozeß häufig nicht in seiner alten, für die Automatisierung eventuell nicht geeigneten Form ablaufen oder die automatisierte Herstellung eines Produktes ist nur für ein geändertes Produkt möglich.

Also:

- 1.) Arbeitsweise der Automatisierung anpassen,  
Übergang zur Fließfertigung, dauernde kontrollierende Messungen, bei Abweichungen vom wünschenswerten Ablauf muß selbsttätig nachreguliert werden, usw.  
Typisches Beispiel: Taktstraßen mit automatischen Zwischen- und Endkontrollstellen.
- 2.) Herzustellendes Produkt der Automatisierung anpassen,  
Beschränkung der Zahl der Einzelteile, Standardisierung, Baukastenprinzip, usw.  
Typisches Beispiel: Gedruckte Schaltungen statt Drahtverbindungen.

Jede bewußte Tätigkeit des Menschen erfordert folgende Dinge:

1. Die auszuführende Tätigkeit muß im Gedächtnis gespeichert sein.

2. Mit den Sinnesorganen muß die Umgebung, auf die sich die Tätigkeit bezieht, erfaßt werden.
3. Mit den Muskeln und Werkzeugen muß auf die Umgebung eingewirkt werden.
4. Jede ausgeführte Einwirkung muß mit der wünschenswerten verglichen und die nächste Einwirkung muß entsprechend eingerichtet werden.
5. Im Gehirn müssen logische Entscheidungen getroffen und mancherlei Dinge berücksichtigt werden.

Man gliedere etwa als Beispiel einer bewußten Tätigkeit die Arbeit eines Drehers auf.

Der Dreher hat 1.) im Gedächtnis oder in einer Zeichnung die auszuführende Tätigkeit gespeichert. Er mißt 2.) mit einer Schiebelehre das Werkstück und beginnt 3.) mit der Bearbeitung. 4.) wird er nach der ersten Grobbearbeitung das Werkstück mit der wünschenswerten Form vergleichen und so lange weitermachen, bis die Forderungen der Zeichnung erfüllt sind. Während der Arbeit wird bei großen Abweichungen vom Sollmaß zunächst grob gearbeitet, es werden das Heißlaufen des Stahls und noch andere Dinge beachtet. Damit sind 5.) logische Operationen ausgeführt worden; es wurde gerechnet.

Soll eine bewußte Tätigkeit des Menschen von selbsttätigen Geräten ausgeführt werden, so müssen diese Geräte selbstverständlich dasselbe tun. Sie müssen also:

1. speichern
2. messen
3. steuern (offener Signalfluß, keine Rückmeldung)
4. regeln (geschlossener Signalfluß, Rückmeldung)
5. rechnen

Statt von Automatisierungstechnik spricht man deshalb auch von "Betriebsmeß-, Steuerungs-, Regelungs- und Rechentechnik

Allgemeiner kann die oben angegebene Aufgliederung auch so vorgenommen werden:

1. Wahrnehmung von Informationen
2. Speicherung von Informationen

### 3. Umwandlung von Informationen (Berechnungen und Entscheidungen)

#### 4. Weiterleitung von Informationen

Diese vier Tätigkeiten kennzeichnen ein "kybernetisches" System. Die Kybernetik ist die Wissenschaft, die sich mit solchen Systemen beschäftigt. Dabei kann das System sowohl technischer als auch organischer Natur sein. Allerdings wird der Begriff "Kybernetik" noch nicht einheitlich gebraucht.

Im Verlagsvorwort zum Buche "Technische Kybernetik" von H.S.Tsien steht: "Die Kybernetik ... ist die Wissenschaft von der Anordnung mechanischer und elektrischer Glieder, um Stabilität und Auslösung zweckvoller Vorgänge zu erreichen." Andererseits wird der Begriff "Kybernetik" für die Bezeichnung von Regelungen in der belebten Natur verwendet und - in Anlehnung an die direkte Übersetzung (Kybernetes (griech.) = Steuermann) - für die Bezeichnung von Steuerungen.

#### 1.5 Was ist eine Steuerung, was ist eine Regelung?

Eine Steuerung ist ein Vorgang, bei dem eine Größe beeinflusst wird, ohne daß die Wirkung des Eingriffes auf seine Ursache zurückwirkt.

Beispiele:

- 1.) Die Gaszufuhr zu einem Warmwasserspeicher beeinflusst (steuert) die Wassertemperatur.
- 2.) Die Eingangsdrehzahl eines Getriebes bestimmt dessen Ausgangsdrehzahl.
- 3.) Die Gitterspannung einer Elektronenröhre steuert den Anodenstrom usw. usw..

Man kann die "Eingänge" der genannten "Glieder" (1. Gaszufuhr, 2. Eingangsdrehzahl, 3. Gitterspannung) als Eingangssignale auffassen, von denen die Ausgangssignale (1. Wassertemperatur, 2. Ausgangsdrehzahl, 3. Anodenstrom) gesteuert werden.

Die Ausgangssignale wirken nicht auf die Eingangssignale zurück. Der Signalfluß erfolgt nur in einer Richtung. Die Glieder sind gerichtete, rückwirkungsfreie Glieder. Kennzeichen einer Steuerung ist der offene Signalfluß. Man spricht von offenen Steuerketten. Das Denken in Signalflüssen ist eine für die Regelungs- und Steuerungstechnik nützliche und wichtige Abstraktion.

Eine Regelung ist ein Vorgang, bei dem der vorgegebene Wert einer Größe fortlaufend durch Eingriff auf Grund von Messungen dieser Größe hergestellt und aufrechterhalten wird.

Beispiele:

- 1.) In Kühlschränken herrscht immer (annähernd) eine vorgegebene (eingestellte) Temperatur. Auf Grund von Messungen der Temperatur wird das Kühlaggregat entweder an- oder abgeschaltet.
- 2.) Spannung und Frequenz des Stromnetzes werden konstant gehalten. Bei Abweichungen werden im Kraftwerk von selbsttätigen Geräten (Reglern) Gegenmaßnahmen eingeleitet.
- 3.) Der Kurs einer Rakete wird entgegen von Störungen (nicht vorausberechenbaren Einflüssen, u.a. Wind) gleich dem wünschenswerten sein, wenn eine Kursregelung dafür sorgt. Der Kursregler muß den gespeicherten Sollkurs mit dem Istkurs vergleichen und bei Abweichungen korrigierend eingreifen.

Die Ausgangssignale (1. Temperatur, 2. Spannung, 3. Frequenz, 4. Kurs) wirken auf die Eingangssignale (1. An- oder Abschalten des Kühlaggregats, 2. Erregung des Generators, 3. Drehzahl der Turbine, 4. Leitwerk oder Anstellwinkel des Düsenantriebes) zurück. Kennzeichen einer Regelung ist ein geschlossener Signalfluß. (Die Temperatur des Kühlschranks wirkt auf das Meßwerk, das Meßwerk auf eine Vergleichseinrichtung mit dem Sollwert, die Vergleichseinrichtung auf das Kühlaggregat, das Kühlaggregat auf die Temperatur usw. wieder von vorn!)

Man spricht von Regelkreisen, weil der Kreis das Symbol für

etwas Geschlossenes ist. Die einzelnen Glieder des Regelkreises sind wie bei der Steuerung gerichtete Glieder. Sie werden von den Signalen nur in einer Richtung durchflossen. Beim Durchlaufen des Regelkreises kehrt sich der Wirkungssinn eines Signales um. (Eine Erhöhung der Kühltankschranktemperatur löst eine Erniedrigung der Kühltankschranktemperatur aus.) Alle an der Regelung beteiligten Geräte sind dauernd "auf der Hut", um einzugreifen, wenn Abweichungen vom gewünschten Zustand eintreten wollen. - Das sind die Merkmale einer Regelung.

Aus den Beispielen sind auch die Voraussetzungen zur Bildung von Regelkreisen ersichtlich:

- 1.) Es muß die Notwendigkeit vorliegen, daß eine Größe vorgeschriebene Werte einhält.
- 2.) Es müssen Störgrößen vorhanden sein, die den Wert der Regelgröße in unzulässiger Weise zu ändern suchen.
- 3.) Die zu regelnde Größe (Regelgröße) muß meßbar sein.
- 4.) Die zu regelnde Größe (Regelgröße) muß durch Eingriff einer Stellgröße willkürlich beeinflussbar sein.

## 1.6 Automatisierungstechnik als Lehrfach

Die Automatisierung betrifft alle Zweige der Technik. Das Messen, Steuern und Regeln gibt es in der Chemie- wie in der Elektroindustrie, im Maschinen- wie im Flugzeugbau usw. Die Steuerungs- und Regelungstechnik ist eine technische Querschnittsdisziplin. Sie abstrahiert die grundsätzlichen Probleme der Steuerungen und Regelungen. Daß diese grundsätzlichen Dinge erst praktisch zur Auswirkung kommen in Zusammenhang mit bestimmten Prozessen und Aufgaben (Chemie, Antriebstechnik, Flugzeugbau, Gerätebau usw. usw.), versteht sich von selbst. Die Verbindung zwischen grundsätzlichen Problemen und bestimmten Aufgaben kann entweder von einem Menschen oder aber besser - und in Zukunft bei der immer umfangreicher und komplizierter werdenden Technik be-



stimmt nur so - von einem Kollektiv vorgenommen werden. Die Zusammenarbeit einer Gruppe von Spezialisten verschiedener Fachdisziplinen ist die Arbeitsform der heutigen und kommenden Technik und Wissenschaft. Die Nutzbarmachung der Atomenergie zu leider kriegerischen aber später dann auch zu friedlichen Zwecken, ist ebenso ein Beispiel der gemeinsamen Arbeit vieler Wissenschaftler, Techniker und Arbeiter wie die Eroberung des Kosmos durch den Menschen. Die Durchführung des geophysikalischen Jahres gab schließlich sogar ein Beispiel für eine weltweite Zusammenarbeit. Ein einzelner Wissenschaftler oder Ingenieur ist heute gar nicht mehr in der Lage, mehr als ein spezielles Teilgebiet der Technik zu übersehen und in seiner stürmischen Entwicklung zu verfolgen.

Aus diesen Überlegungen folgt, daß an einer Schule in der Zeit der hochentwickelten, schnell fortschreitenden Technik kein für die stehenden betrieblichen Aufgaben fertiger Ingenieur ausgebildet werden kann. Wollte man das tun, so müßte es hunderte von speziellen Fachrichtungen geben und auch deren Wissensvermittlung würde der technischen Entwicklung immer mit einer gewissen Phasenverschiebung hinterherhinken. Die eigentliche Spezialausbildung wird durch die Einarbeitung im Betrieb erfolgen. Die Schulen sollen dafür die Voraussetzungen schaffen. Sie sollen dem Studenten und Schüler ein bewegliches, festes Grundwissen mitgeben und lehren, wie man Wissen erwirbt und es grundsätzlich anwendet. Sie sollen nicht ausbilden, sondern bilden.

Das gilt auch für das Fach Steuerungs- und Regelungstechnik. Und zwar in verstärktem Maße.

Das Fach abstrahiert als ein technisches Querschnittsfach die grundsätzlichen Merkmale aller Steuerungen und Regelungen aus den verschiedenen technischen Disziplinen. Davon können an den Schulen nun wiederum nur die wichtigen Dinge vermittelt und typische Beispiele gezeigt werden. Es soll dem Studierenden damit der Weg zur eigenen Weiterarbeit mittels der inzwischen umfangreich vorhandenen Literatur und mittels seiner späteren betrieblichen Tätigkeit geebnet werden.

In diesem Bemühen entstehen auch die vorliegenden Lehrbriefe. Das Lehrfach "Regelungs- und Steuerungstechnik" ist noch sehr jung. Vor etwa 8 Jahren erschien in Deutschland die erste Fachzeitschrift (Regelungstechnik, Verlag R. Oldenbourg, München), bald darauf wurde die erste Professur des Faches an einer technischen Hochschule eingerichtet und die Ingenieurschulen schlossen sich nach wenigen Jahren der Aufnahme des Faches in das Lehrprogramm an.

Natürlich wurden Dinge des Faches auch schon früher gelehrt. Aber sie waren verteilt in Regelungen und Steuerungen anwendende Fächer (Regelung der Kraftmaschinen, Regelung in Dampfanlagen usw.). Heute zieht sich in unserer Republik die Vermittlung regelungstechnischen Wissens von den Technischen Hochschulen, über Lehrgänge der Kammer der Technik, über Zeitschriften, über die Ingenieurschulen, über die Berufsschulen (neuer Lehrberuf: Meß- und Regelungsmechaniker) bis zur allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule, wo im Physikunterricht einige Stunden der Regelungstechnik vorbehalten sind.

#### 1.7 Wie eignet man sich Grundkenntnisse der "Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik an?

Antwort: Eine Dreiteilung erweist sich als sinnvoll:

- 1.) Betriebsmeßtechnik
- 2.) Grundlagen der Regelungs- und Steuerungstechnik
- 3.) Bauelemente der Regelungs- und Steuerungstechnik

Diese Gliederung erhöht die Übersicht.

Sie erhalten zu allen 3 Fächern Lehrbriefe.

Denken Sie aber immer daran, daß auch die Lehrbriefe anderer Fächer (Elektrotechnik, Elektronik, Konstruktionslehre z.B.)

zu Ihrem Studium der Regelungs- und Steuerungstechnik beitragen.

Von den Grundlagen der Regelungs- und Steuerungstechnik, aus denen also die genaue Behandlung der Meßtechnik und der

Bauelemente ausgeklammert sind, soll in den vorliegenden Lehrbriefen die Rede sein. Nun studieren Sie die 3 Fächer zeitlich nebeneinander. Deshalb ist es gut, sich anfangs in einer Übersicht einen groben Überblick über die gesamte Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik zu verschaffen. Man kann dann Einzelfakten besser einordnen.

Somit liegt das Programm der vorliegenden Lehrbriefreihe fest:

1. Einleitung
2. Übersicht
3. Die wesentlichen, von den verschiedenen gerätemäßigen Ausführungsformen abstrahierten Eigenschaften der Regelkreis- und Steuerkettenglieder (Strecken, Regler)
4. Das Zusammenwirken der Glieder im Regelkreis und in der Steuerkette.

Die letzten beiden Punkte werden sich dabei in mehrere Lehrbriefe gliedern.

## 1.8 Literaturhinweise

Zu Ihrem Studium der Regelungs- und Steuerungstechnik gehört auch unbedingt dazu, daß Sie wissen, was es auf diesem Fachgebiet an Veröffentlichungen gibt. Sie werden allerdings während Ihres Studiums kaum die Zeit haben, auch nur einige der vielen Bücher neben den Lehrbriefen gründlich durchzuarbeiten. Sie müssen aber die wichtigsten Bücher und Zeitschriften einmal ausleihen und darin "blättern", um einen Überblick über das "Drinstehende" zu erhalten. Dieser Überblick wird Ihnen helfen, bei offenen Problemen während des Studiums oder später zum richtigen Buch zu greifen.

Im Literaturverzeichnis am Ende des ersten Lehrbriefes sind etliche Titel angegeben. In der 1. Konsultation wird Ihnen der Sie betreuende Dozent dazu Hinweise geben und Ihnen sagen, welche Veröffentlichungen auf welcher Wissensstufe zu welchem Zweck geeignet sind.

## Wiederholungsfragen

Diese Fragen sind für Ihr Studium als Selbstkontrolle gedacht. Sie müssen alle Fragen beantworten können, anderenfalls haben Sie den betreffenden Lehrbriefabschnitt noch nicht richtig verstanden und müssen ihn wiederholen. Am günstigsten wird es sein, wenn Sie sich diese Fragen in kleinen Studiengemeinschaften gegenseitig vorlegen und beantworten. Haben Sie nicht die Möglichkeit, mit einem oder zwei Kollegen zusammenzuarbeiten, so ist es empfehlenswert, die Fragen stichwortartig schriftlich zu beantworten und das Aufgeschriebene am Lehrbriefftext zu überprüfen. Die Fragen sind am Ende des Lehrbriefes nicht beantwortet. Die Antwort ergibt sich ja aus dem Inhalt des Lehrbriefes.

1. Was verstehen Sie unter den Begriffen Mechanisierung und Automatisierung? Unterschied?
2. Warum ist die sozialistische Gesellschaftsordnung die fruchtbarste Basis für eine umfassende Automatisierung?
3. Welche Bedeutung hat die Standardisierung für eine umfassende Automatisierung?
4. In welche Tätigkeiten kann man jeden Arbeitsablauf aufgliedern?
5. Was ist eine Steuerung?
6. Was ist eine Regelung?
7. Wann ist eine Regelung notwendig?
8. Was sind die Voraussetzungen zur Bildung von Regelkreisen?
9. Was sind die Merkmale einer Regelung?

## Aufgaben:

Beim Studieren der Lehrbriefe und bei der Beantwortung der Wiederholungsfragen nehmen Sie Wissen auf und kontrollieren das Aufgenommene.

Die Aufgaben sollen Sie zu einem ersten aktiven Anwenden des Gelernten anregen.

Die Lösungen der Aufgaben erscheinen, soweit das sinnvoll ist (bei Zahlenergebnissen u.ä.) am Ende des betreffenden Lehrbriefes.

Die Ausführung der Aufgaben wird der Sie betreuende Dozent in den Konsultationen kontrollieren.

1. Die Produktionstätigkeit eines Menschen und auch die durch Geräte selbsttätig gemachte Produktion gliedert sich in die Tätigkeiten speichern, messen, steuern, regeln, rechnen.

Gliedern Sie danach einige Tätigkeiten auf!

(Z.B. die Herstellung eines Drehteils nach einer Zeichnung, das Fahren eines Autos, die Tätigkeit eines Heizers, die Tätigkeit des "Anlagenfahrers" eines chemischen Betriebes usw.)

2. Welche der nachfolgend genannten Tätigkeiten sind Regelungen, welche Steuerungen?
  - a) Anwahl eines Fernsprechteilnehmers
  - b) Lenkung eines Autos, eines Flugzeuges
  - c) Arbeit eines Heizers, der sich betreffs Kohlenmenge nur nach der Außentemperatur richtet
  - d) Ansprechen des Sicherheitsventils eines Dampfkessels
  - e) Temperaturkonstanthaltung
  - f) Druckkonstanthaltung
  - g) Spannungsgleichhalter (für Fernsehgeräte usw.)
3. Suchen Sie einige in Ihrem Betrieb vorkommende Regelungen, einige Steuerungen.
4. Leihen Sie sich in der nächsten Zeit einige Hefte der "Zeitschrift für messen steuern regeln" (VEB Verlag

Technik, Berlin) aus oder kaufen Sie sich einige Hefte (Preis pro Heft DM 4,-).

Schauen Sie sich die Hefte, soweit Sie den Inhalt verstehen können, gründlich an.

Lernen Sie so die Art unserer Fachzeitschrift kennen.

Entscheiden Sie, ob Sie diese Zeitschrift eventuell abonnieren.

5. Kümmern Sie sich darum, daß Sie in der Bücherei Ihres Betriebes oder in einer entsprechenden öffentlichen Einrichtung einmal Einsicht in einige Hefte der folgenden in der DBR erscheinenden Zeitschriften nehmen können:

1. Regelungstechnik, Verlag R.Oldenbourg, München
2. Regelungstechnische Praxis, Verlag R.Oldenbourg, München
3. Automatik, R.v.Decker's Verlag, Hamburg
4. Automatisierung, K.M.Hageneier Verlag, Heidelberg

Entscheiden Sie, ob Sie in Ihrem Betrieb oder in der entsprechenden öffentlichen Bücherei zu den dauernden Lesern der einen oder anderen Zeitschrift gehören wollen.

## 2. Wichtige Benennungen und Begriffe, Blockschaltbilder

=====

### 2.1 Wichtige Benennungen und Begriffe

Die Entwicklung der Regelungstechnik als einer selbständigen technischen Wissenschaft brachte neue Benennungen und Begriffe hervor, die 1954 im DIN-Blatt 19226 zusammengefaßt wurden. Dieses DIN-Blatt wird zur Zeit vom Normenausschuß überarbeitet. Insbesondere sollen Benennungen und Begriffe der Steuerungstechnik aufgenommen werden, so daß auch auf diesem Gebiet die Techniker bald eine einheitliche Sprache haben werden.

Im folgenden sollen die wichtigsten Benennungen und Begriffe der Regelungstechnik erläutert werden. Die übrigen Bezeichnungen, die jeder Regelungstechniker kennen muß, erscheinen später an entsprechender Stelle der Lehrbriefreihe.

Es ist gut, von einem Beispiel auszugehen. Das gewählte Beispiel ist zwar nicht "sehr technisch", dafür aber allgemein

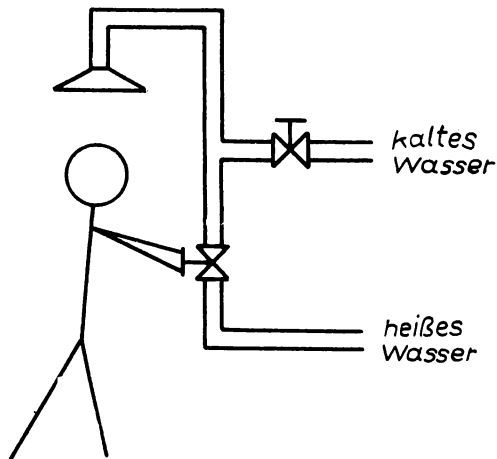


Bild 1

bekannt und einfach. Es handelt sich um eine Wassertemperaturregelung.

Ein unter einer Brause stehender Mensch wünscht eine konstante Wassertemperatur von - sagen wir -  $38^{\circ}\text{C}$ . Dem stehen mancherlei Einflüsse entgegen (Schwankungen der Vortemperaturen und der Vordrücke von Heiß- und Kaltwasser u.a.). Um die  $38^{\circ}\text{C}$  zu halten, muß der Mensch dauernd die Temperatur des Wassers messen (Temperaturempfinden der Haut), dauernd die Temperatur des Wassers mit der gewünschten Temperatur vergleichen und bei Abweichungen an einem Hahn (etwa am Heißwasserhahn) verstellen. Daß es sich tatsächlich um eine Regelung handelt, erkennen Sie an dem geschlossenen Wirkungsablauf: Wassertemperatur - Haut - Hirn - Hand - Hahn - Durchfluß des Heißwassers - Wassertemperatur.

Von diesem Beispiel ausgehend, sollen nun die wichtigsten Benennungen und Begriffe des Normblattes "Regelungstechnik" angeführt werden.

Regelung: Die Regelung ist ein Vorgang, bei dem der vorgegebene Wert einer Größe fortlaufend durch Eingriff auf Grund von Messungen dieser Größe hergestellt und aufrechterhalten wird.

Im Beispiel ist die zu regelnde Größe die Temperatur des Wassers, ihr vorgegebener Wert  $38^{\circ}\text{C}$ .

Wirkt der Mensch als übertragendes Glied im geschlossenen Wirkungsablauf mit, so spricht man von "Handregelung", erfolgt der Ablauf ohne menschliches Zutun, so liegt eine selbsttätige Regelung oder kurz Regelung vor. Das Wort "Regelung" soll also den Zusatz "selbsttätig" im allgemeinen einschließen.

Oben ist von "fortlaufend" die Rede. Ein Vorgang soll auch dann als fortlaufend angesehen werden, wenn er sich aus einer ausreichend häufigen Wiederholung gleichartiger Einzelvorgänge zusammensetzt. Trivial gesagt: Der Mensch im Beispiel einer Handregelung muß nicht immer die Hand am Hahn haben, wenn er es ausreichend häufig tut, so liegt auch eine (Hand-) Regelung vor, genauso wie das selbsttätige An- und



Abschalten von Kühlschränken bei zu hoher bzw. zu niedriger Temperatur eine Regelung ist.

Die Vorgabe des einzuhaltenden Wertes kann erfolgen:

- 1.) durch festes Einstellen (Festwertregelung),
- 2.) durch Änderung nach einem Zeitplan (Zeitplanregelung),
- 3.) durch eine andere veränderliche Größe, die selbst von der Regelung nicht beeinflusst wird (Folgeregelung),
- 4.) durch einen vorgeschriebenen Zusammenhang mehrerer Größen (Kennlinienregelung, Optimalwertregelung).

Regelkreis: Der Regelkreis wird gebildet durch die Gesamtheit aller Glieder, die an dem geschlossenen Wirkungsablauf der Regelung teilnehmen.

Der geschlossene Ablauf ist kein Mengen- oder Energiestrom, sondern ein Signalfluß. Die Signale durchlaufen den Kreis in einer Richtung. Die durchlaufenen Glieder sind gerichtete Glieder, d.h., sie werden nur in einer Wirkungsrichtung durchlaufen. (Die Temperatur z.B. beeinflusst die Haut, die Haut das Hirn, das Hirn die Hand, die Hand den Hahn usw., nicht umgekehrt).

Die Eingangsgröße bestimmt die Ausgangsgröße, während umgekehrt die Eingangsgröße durch die Ausgangsgröße nicht nennenswert beeinflusst wird.

Der Regelkreis besteht aus Regelstrecke und Regler.

Die Bezeichnung "Regelkreis" wurde offensichtlich gewählt, weil der Kreis das Symbol von etwas Geschlossenem ist und der geschlossene Wirkungsablauf gerade das typische Kennzeichen einer Regelung ist.

Regelstrecke: Die Regelstrecke ist der Bereich einer Anlage, in welchem eine Größe durch die Regelung beeinflusst wird und dessen Zustandsänderungen für den Ablauf der Regelung maßgebend sind.

Beispiele: Dusche (Temperaturregelstrecke), Ofen (Temperaturregelstrecke), Rohrleitung (Druckregelstrecke), elektrisches Netz (Frequenz- und Spannungsregelstrecke), Dampferzeuger (Regelstrecke für Druck, Temperatur, Wasserstand und

mehr), usw.

Regler: Der Regler ist die gesamte Einrichtung, die den Regelungsvorgang an der Regelstrecke bewirkt.

Im angeführten Beispiel ist der Mensch der Regler.

Die verschiedenen Regler kann man verschieden einteilen.

1.) Unterteilung nach der zu regelnden Größe:

1.1 Temperaturregler (und Steuerer, Steuerer immer dazu gedacht)

1.2 Druckregler

1.3 Durchflußregler

1.4 Kursregler

usw. usw.

2.) Unterteilung nach der Art der Hilfsenergie:

2.1 Regler ohne Hilfsenergie

2.2 Regler mit Hilfsenergie

2.21 Handregelung

2.22 mechanische Regler

2.23 pneumatische Regler

2.24 hydraulische Regler

2.25 elektrische Regler

2.26 elektronische Regler

2.27 gemischt (elektro-pneumatische Regler usw.)

3.) Grobe Unterteilung nach dem Arbeitsprinzip:

3.1 analog arbeitende Regler und Steuerer (analoge Systeme)

3.2 digital arbeitende Regler und Steuerer (digitale Systeme)

4.) Grobe Unterteilung nach dem Zeitverhalten:

4.1 stetige Regler und Steuerer

4.2 unstetige Regler und Steuerer

5.) Unterteilung nach dem Zeitverhalten:

5.1 P - Regler

5.2 I - Regler

5.3 PI - Regler

5.4 PD - Regler

5.5 PID - Regler

5.6 Schrittreger (stetig-ähnliche Regler)

5.7 Zweipunktreger (unstetige Regler)

5.8 Getastete Regler (unstetige Regler)

Die Unterteilung nach 1 ist nicht sinnvoll, weil sie wenig aussagt. Man würde sich verlieren in der Vielzahl regelbarer Größen und dabei grundsätzliche Unterschiede der verschiedenen Regler nicht erfassen. Ein industrieller Regler kann bis auf wenige Spezialregler im allgemeinen zur Regelung verschiedener Größen eingesetzt werden. Es wird davon noch die Rede sein.

Auch die Unterteilung nach 2 trifft nicht den Kern der Sache. Sicher kann man manche Regelungsaufgabe sowohl mit pneumatischer als auch mit elektrischer Hilfsenergie lösen, ohne grundsätzlich andere Regelungsergebnisse zu erzielen.

Die Unterteilung nach 3 gibt dagegen eine wesentliche Grobgliederung. In analogen Systemen erfolgt eine ausschließlich analoge Signalübertragung und Signalverarbeitung.

In digitalen Systemen tritt außer der analogen auch eine digitale Signalübertragung und -verarbeitung auf.

Bei der analogen Signalübertragung und -verarbeitung wird die Eingangsgröße auf eine physikalische Größe, die Ausgangsgröße abgebildet. Es werden unendlich viele Werte übertragen und verarbeitet.

Die Ausgangsgröße ist ein Analogon der Eingangsgröße.

So kann beispielsweise die Temperatur durch einen Druck dargestellt werden (Dampfdruckthermometer), die Drehzahl einer Welle durch eine Spannung (Tachodynamo) usw. Dampfdruckthermometer, Tachodynamo usw. sind analoge Glieder. Ihr "Ausgang" ist eine dem Eingang analoge Größe zur Weitergabe oder Verarbeitung (z.B. zur Bildung eines Regelbefehls, zum Subtrahieren, Addieren, Multiplizieren, Integrieren, Differenzieren).

Bei der digitalen Signalübertragung und -verarbeitung erscheinen die Größen als Ziffern eines Zahlensystems, meist

des dualen Zahlensystems, das auf der Basis 2 aufbaut. So wie das bekannte dezimale Zahlensystem die Ziffern 0, 1, 2 bis 9, also 10 Ziffern hat, gibt es im dualen nur 2 Ziffern, 0 und 1 bezeichnet, mit einer entsprechenden Stellenwertigkeit. Diese Ziffern werden dann durch Schaltzustände (etwa Kontakt offen entspricht 0, Kontakt geschlossen entspricht 1) gerätemäßig verwirklicht.

Bei der Umsetzung vom Analogen ins Digitale werden ganzen Intervallen der Eingangsgröße bestimmte Zustände (Zahlen) der Ausgangsgröße zugeordnet. Ein Analog-Digital-Umsetzer (AD-Umsetzer) quantisiert also. Es werden nur endlich viele Werte übertragen und verarbeitet. Durch genügend feine Quantisierung kann eine große Genauigkeit erzielt werden.

Ebenso unterscheidet die Unterteilung 4 grundsätzliche Arten von Regelungen und Steuerungen.

Stetige Geräte (stetige Glieder) sind solche, bei denen die statische Kennlinie (Ausgangsgröße in Abhängigkeit der Eingangsgröße) keine Sprünge aufweist, also stetig ist. Die Ausgangsgröße kann also stufenlos verändert werden.

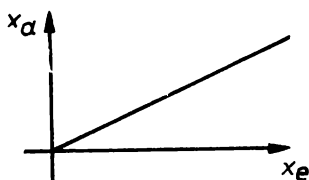


Bild 2  
lineare stetige Glieder



Bild 3  
nichtlineare stetige Glieder

Unstetige Geräte (unstetige Glieder) sind alle anderen, also alle nicht stetigen Glieder.

Die Unstetigkeit kommt im wesentlichen auf zweierlei Art und Weise zustande:

1.) stufenweises Verhalten

Beispiele:

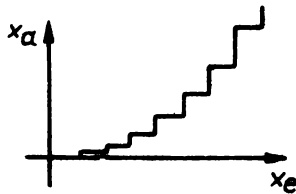


Bild 4  
quasistetige Glieder

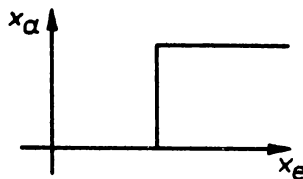


Bild 5  
Relaisglieder

## 2.) getastetes Verhalten

(Die Ausgangsgröße wird mit zeitlichen Unterbrechungen übertragen)

Beispiel: Fallbühgelregler

Sie erkennen den Zusammenhang der Unterteilungen 3 und 4:

Digitale Systeme sind selbstverständlich unstetig.

Unstetige Systeme sind nicht unbedingt digital.

Analoge Systeme können stetig sein, müssen es aber nicht.

Stetige Systeme sind selbstverständlich analog.

Die Unterteilung nach 5 schließlich ist die regelungstechnisch wesentliche.

Es ist so, daß P - Regelkreise, Zweipunktregelkreise usw.

(der Name des Regelkreises richtet sich nach dem Namen des Reglers) bestimmte Eigenschaften haben, die sie von anderen Regelkreisen unterscheiden. Das ist unabhängig davon, ob der Regler ein elektrischer oder pneumatischer usw. ist und auch unabhängig davon, ob der Regler zur Regelung einer Temperatur oder einer Standhöhe usw. dient.

Die Behandlung der Regler innerhalb dieser Lehrbriefreihe wird sich also sinnvollerweise nach der Unterteilung 5 richten.

Die beiden "Grobteilungen" 3 und 4 gehen in der "Feinteilung" 5 auf. (P, I, PI, PD, PID - stetig und analog.

Schritt-, Zweipunkt-, Getastete Regler - unstetig und analog oder digital. Alles Digitale ist unstetig, man nennt aber nicht alles Unstetige digital.)

Soviel zunächst zu dem Begriff "Regler". Was dazu an späterer Stelle noch zu sagen ist, liegt nach den Aufzählungen der letzten Seiten auf der Hand. Doch jetzt weiter in der Erläuterung von Grundbegriffen.

Regelgröße: Die Regelgröße ist die Größe, die geregelt wird.

Im Beispiel (Mensch unter der Brause) ist es die Temperatur.

Jede Größe, die meßbar und willkürlich beeinflussbar ist, kann Regelgröße sein, denn zum Regeln gehört das Messen, das

Vergleichen und das Stellen.

Beispiel: Die Temperatur eines Raumes (meßbar und beeinflussbar) kann Regelgröße sein, nicht aber die Temperatur einer ganzen Landschaft (eventuell meßbar durch Messungen an verschiedenen Orten, aber mit dem Beeinflussen hapert es (noch!)).

Die Meßtechnik ist heute soweit gediehen, daß die meisten physikalischen Größen als Regelgrößen erschlossen sind.

Man denke an:

- 1.) Geometrische Größen: Länge, Niveauhöhe, Drahtdicke, Banddicke, Winkel, usw.
- 2.) Kinematische Größen: Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit, Beschleunigung, Winkelbeschleunigung bei festen Körpern, Strömungsgeschwindigkeiten von Flüssigkeiten und Gasen, usw.
- 3.) Mechanische Größen: Kraft, Gewicht, Dichte, Druck, Arbeit usw.
- 4.) Hydraulische Größen: Druck, Druckdifferenz, Durchfluß von Flüssigkeiten, usw.
- 5.) Pneumatische Größen: Druck, Druckdifferenz, Durchsatz von Gasen, usw.
- 6.) Kalorische Größen: Temperatur, Wärmemenge, Wärmestrom, usw.
- 7.) Akustische Größen: Lautstärke, Tonhöhe, usw.
- 8.) Magnetische Größen: magnetische Feldstärke, magnetischer Fluß, Induktivität, usw.
9. Elektrische Größen: Strom, Spannung<sup>\*</sup>, Leistung, Phasenverschiebung, usw.
- 10.) Optische Größen: Leuchtdichte, Lichtabsorption, usw.
- 11.) Kernphysikalische Größen: Neutronenfluß, Neutronendichte, Gamma-Strahlen-Absorption, usw.
- 12.) Chemische Größen: Dichte von Säuren und Basen, Gaskonzentrationen, Analysenwerte, usw.
- 13.) Physiologische Größen: Pulszahl, Blutdruck, elektrische Spannung an Nerven, usw.

(Es ist beispielsweise möglich, durch Messung physiologischer Größen die Dosierung eines Narkosemittels so zu gestalten, daß die Tiefe der Narkose geregelt wird.)

Der Begriff "Regelgröße" gilt allgemein für die geregelte Größe, von der man verschiedene Werte unterscheidet.

Der Istwert  $X$  der Regelgröße ist der Wert, den diese Größe jeweils tatsächlich hat (35 °C, 200 V, 49,5 Hz, usw.).

Der Aufgabenwert der Regelgröße ist der durch die Aufgabenstellung vorgeschriebene Wert der Regelgröße (38 °C, 220 V, 50 Hz, usw.).

Der Sollwert  $X_K$  der Regelgröße ist der am Sollwerteinsteller des Reglers eingestellte Betrag der Regelgröße. *Es ist der Sollwert des zu regelnden Wert*

Eine Abweichung des Sollwertes vom Aufgabenwert kann durch die sogenannte P-Abweichung (davon wird beim P-Regelkreis die Rede sein) und durch ungenaue Eichung der Sollwertskala eintreten. Meistens spricht man aber vom Sollwert als von dem Wert, der sein soll.

Bei der Zeitplanregelung und der Folgeregelung folgt der Sollwert dem Wert einer veränderlichen Größe, der Führungsgröße  $W$ , die den Wert des Sollwertes bestimmt und die selbst von der Regelung nicht beeinflusst wird.

Die Regelabweichung  $x_w$  ist die Abweichung des Istwertes der Regelgröße vom Sollwert.

$$x_w = \bar{x} - X_K$$

Es gibt bleibende und vorübergehende Regelabweichungen.

(Man verwendet zur Bezeichnung von Abweichungen durchweg kleine Buchstaben, zur Bezeichnung der Größen selbst große Buchstaben).

Die Stellgröße  $Y$  ist die Ausgangsgröße des Reglers und damit die Eingangsgröße der Regelstrecke.

(Hahnstellung in Umdrehungen von der geschlossenen Stellung aus, Ventilstellung in cm, Widerstandsabgriff, Erregerstrom,



usw.) Der Bereich, innerhalb dessen die Stellgröße vom Regler eingestellt werden kann, ist der Stellbereich  $Y_h$ .

Die Abweichung der Stellgröße  $Y$  von einer Bezugsstellgröße  $Y_0$  bezeichnet man wieder mit kleinem Buchstaben  $y$ .

$$y = Y - Y_0$$

Es ist naheliegend und sinnvoll, als Bezugsregelgröße  $X_0$  den Sollwert  $X_K$  zu wählen und diesem Regelgrößenbezugswert  $X_0 = X_K$  für den Normalzustand der Regelung den Stellgrößenbezugswert  $Y_0$  zuzuordnen.

Am Beispiel betrachtet:  $X_0 = X_K = 38^\circ\text{C}$

Im "normalen" Brausebetrieb (bei normalen Vordrücken und Vortemperaturen des kalten und des heißen Wassers) werden diese  $38^\circ\text{C}$  durch die Bezugsstellgröße  $Y_0$  (z.B. 2 Umdrehungen auf) gewährleistet.

Tritt dann ein  $x_w$  (Abweichung, kleiner Buchstabe, kann positiv oder negativ sein) auf, so muß der Mensch mit einem  $y$  (Abweichung, kleiner Buchstabe, kann positiv oder negativ sein) eingreifen.

Dabei muß, wenn  $x_w$  positiv (d.h. Temperatur zu hoch) mit einem negativen  $y$  (d.h. Hahn von Bezugsstellung  $Y_0$  aus um  $y$  zu) eingegriffen werden. Diese sogenannte Inversion muß in jedem Regelkreis stattfinden. (Gerätetäglich etwa durch das Ventil (direkt-, indirekt wirkende Ventile!) oder durch besondere Invertierungsglieder (selten) oder durch einfache Maßnahmen im Regler (elektrisch: + und - vertauschen, pneumatisch: Membranseiten vertauschen usw.).

Störgrößen  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$  sind die Größen, die den Wert der Regelgröße in unzulässiger Weise zu ändern suchen.

Im Beispiel: Vortemperaturen und Vordrücke von heißem und kaltem Wasser. Ihre Änderung ist der eigentliche Grund für die Notwendigkeit einer Regelung. Wären die Störgrößen konstant, so könnte ihr Einfluß beim Bau der Anlage auch ohne Regelung berücksichtigt und damit ausgeschlossen werden.

Wäre dem duschenden Menschen beispielsweise bekannt, daß er kein Heißwasser von  $80^\circ\text{C}$ , sondern solches von konstant

60 °C zur Verfügung hat, so wird er, wenn auch die Kaltwassertemperatur und die Vordrücke konstant sind, mit einer einmaligen Einstellung der gewünschten Temperatur von 38 °C auskommen und nicht zu regeln brauchen.

Als wirkliche Störgrößen können also nur die Abweichungen:  $z_1, z_2, z_3, \dots$  der unerwünschten Einflußgrößen von Bezugswerten angesehen werden.

$z_1$  = Abweichung der Temperatur des heißen Wassers von einem Bezugswert

$z_2$  = Abweichung der Temperatur des kalten Wassers von einem Bezugswert

$z_3$  = Abweichung des Vordruckes des heißen Wassers von einem Bezugswert

$z_4$  = Abweichung des Vordruckes des kalten Wassers von einem Bezugswert

### Wiederholungsfragen:

1. Was ist a) eine Festwertregelung  
b) eine Zeitplanregelung  
c) eine Folgeregelung  
d) eine Optimalwertregelung?
2. Erläutern Sie die Begriffe: Regelstrecke, Regler, Regelkreis.
3. Warum ist die Unterteilung der Regler nach der zu regelnden Größe für eine Regelungssystematik nicht sinnvoll?
4. Wie unterteilt man Regler nach ihrer Hilfsenergie?
5. Was ist ein analoges, was ein digitales Regel- oder Steuersystem?
6. Was sind a) stetige, b) unstetige, c) lineare, d) nichtlineare, e) analoge, f) digitale Glieder? Welche dieser Eigenschaften schließen welche anderen dieser Eigenschaften ein?
7. Erläutern Sie die Begriffe: Regelgröße, Istwert, Aufgabenwert, Sollwert, Führungsgröße, Regelabweichung, Stellgröße, Störgröße.

### Aufgaben:

1. Nennen Sie etwa 20 Regelgrößen und die dazugehörigen Regelstrecken, Stellgrößen und eventuelle Störgrößen.

## 2.2 Blockschaltbilder

Bei der Darstellung des grundsätzlichen Zusammenwirkens von Regelstrecke und Regler, wie auch bei der Behandlung des prinzipiellen Aufbaues von Reglern oder auch Teilen des Reglers stört eine genaue Zeichnung aller Teile die Übersichtlichkeit und läßt eventuell das Prinzipielle in Einzelheiten untergehen. Es ist deshalb üblich, grundsätzliche Zusammenhänge in sogenannten Blockschaltbildern darzustellen. Dabei wird je nach dem eine ganze Anlage, ein ganzes Gerät, eine Baugruppe oder ein Bauteil als Kästchen dargestellt. Das Kästchen ist als Regelkreisglied oder auch als Steuerkettenglied ein gerichtetes rückwirkungsfreies Glied, was durch Pfeile angedeutet wird. Ein auf das Kästchen zugerichteter



Bild 6

Pfeil bedeutet die Zuführung einer Eingangsgröße  $x_e$ , ein weggerichteter Pfeil steht für eine Ausgangsgröße  $x_a$ .  $x_e$  und  $x_a$  sind allgemein Signale, keine Energie- oder Mengenströme.

Dem Blockschaltbild hat beim Entwurf von Regelungen und Steuerungen jeweils ein gerätetechnisches Schemabild der zu automatisierenden Anlage voraus- und nebenherzugehen. Das Blockschaltbild stellt die Abstraktion bezüglich des Zusammenwirkens der einzelnen Teile dar. Gerade die Art und Weise des zeitlichen Zusammenwirkens, das Zeitverhalten, die Dynamik des Ablaufes ist regelungstechnisch wichtig. Das soll am "Dusche-Beispiel" erläutert werden.

Zur Statik der betrachteten Temperaturregelung gehört:

Wieviel Wasser wird pro Zeiteinheit gebraucht?

Wie groß müssen also die Leitungen und Hähne sein?

usw.

Zur Dynamik der betrachteten Temperaturregelung gehört:

Wie soll der Regler (der Mensch) auf eine Temperaturabweichung reagieren, damit möglichst geringe Abwei-

chungen vom Sollwert eintreten?

Soll er bei der geringsten Abweichung gleich - gewissermaßen vorbeugend - heftig eingreifen?

Oder soll er proportional zur Abweichung schnell am Heißwasserhahn drehen?

Vielleicht wäre es auch gut, wenn er langsam und vorsichtig dreht.

Von Vorteil wäre sicher ein Fernthermometer, das dem Regler die Temperatur des in der nächsten Zeit am Brauseort zu erwartenden Heißwassers mitteilt. Wie soll der Regler diesen Meßwert seiner Tätigkeit "aufschalten"? usw. usw.

Offensichtlich hängt vom Entscheid dieser Fragen die Güte der Regelung ab

Selbstverständlich setzt dabei die optimale Dynamik die richtige Statik der betreffenden Anlage voraus.

Im Blockschaltbild ist die Anlage vom Gerätetechnischen weg zum regelungsdynamisch Wichtigen hin vereinfacht dargestellt.

#### Beispiele:

##### 1.) Dampfdruckthermometer

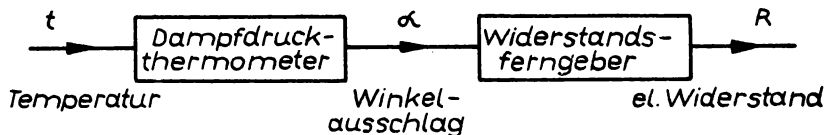


Bild 7

Eingang: Temperatur

Ausgang: Zeigerausschlag, der in einem angebauten Potentiometer in einen elektrischen Widerstand umgeformt wird.

## 2.) Motor mit Getriebe

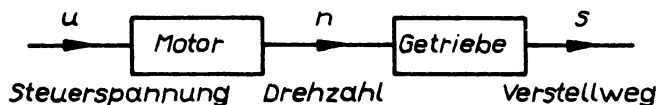
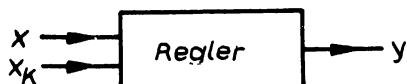


Bild 8

Eingang: Steuerspannung

Ausgang: Drehzahl, die über ein Getriebe zur Verstellung eines Stellgliedes benutzt wird.

## 3.) Regler



Eingänge: Istwert und Sollwert der Regelgröße

Ausgang: Stellgröße

Bild 9

In das Kästchen wird zur Charakterisierung etwas geschrieben oder gezeichnet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten:

1.) Hineinschreiben, um was für ein Glied es sich handelt



Bild 10

2.) Die zugehörige Übergangsfunktion hineinzeichnen. Die Übergangsfunktion gibt an, wie sich der Ausgang in Abhängigkeit von der Zeit ändert, wenn der Eingang sprungförmig verstellt wurde.

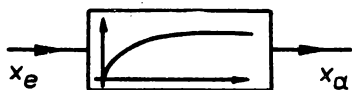


Bild 11

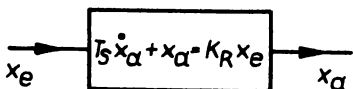


Bild 12

3.) Die das betreffende Glied charakterisierende Gleichung hineinschreiben.

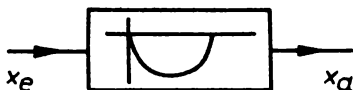


Bild 13

4.) Die zugehörige Ortskurve hineinzeichnen.

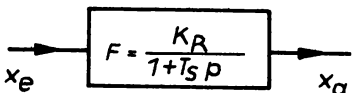


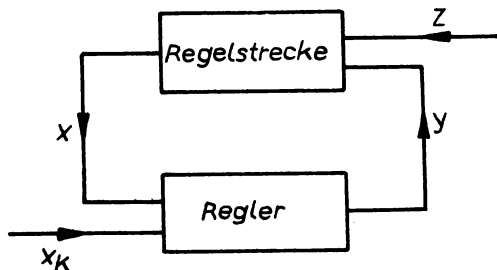
Bild 14

5.) Den zugehörigen Frequenzgang hineinschreiben.

Von den unter 2 bis 5 genannten Begriffen wird später noch ausführlich die Rede sein. Hier sind sie nur im Zusammenhang mit der "Kästchensprache" genannt worden.

Es ist jetzt einfach, sich die allgemeinen Blockschaltbilder einer Regelung und einer Steuerung zu überlegen.

Blockschaltbild einer Regelung:



Typisch:  
Geschlossener  
Wirkungsablauf.

Bild 15

Beispiel:

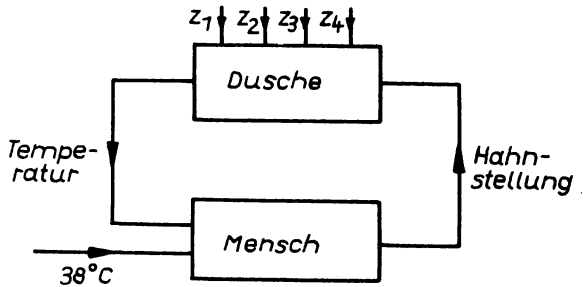


Bild 16

Blockschaltbild einer Steuerung:

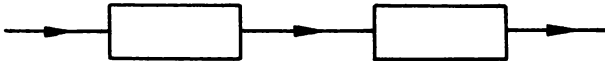


Bild 17

Typisch: Offene Wirkungskette,  
keine Rückmeldung

Beispiel:

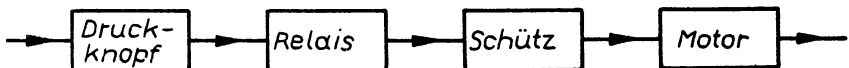


Bild 18

Durch Betätigung eines Druckknopfes wird über Relais und Schütz ein Motor angelassen. Der Ausgang des Motors, seine



Drehzahl, wirkt auf den Eingang der Steuerkette, die Knopf-  
betätigung, nicht zurück.

Das sind die typischen Unterschiede zwischen einer Regelung  
und einer Steuerung.

Dabei sind aber Regelungen und Steuerungen nicht voneinander  
zu trennen.

Denn:

- 1.) Jeder Ausschnitt eines Regelkreises stellt eine Steuerung  
dar (z.B. die Regelgröße wird durch die Stellgröße ge-  
steuert).
- 2.) Eine Regelung ist von der Führungsgröße zur Regelgröße  
hin gesehen eine Steuerung. (Die Führungsgröße wird ja  
von der Regelgröße nicht beeinflusst, also liegt ein  
offener Wirkungsablauf vor.)

Die Regelung sorgt dabei dafür, daß die Steuerung ent-  
gegen von Störgrößen im gewünschten Sinne abläuft.

Also:

Regelungen und Steuerungen zwar unterscheiden, aber auch ihre  
Verkettung sehen.

(In anderen Sprachen gibt es für beide ein gemeinsames Wort.)

### Wiederholungsfragen:

1. Was ist ein Blockschaltbild?
2. Warum ist in der Regelungstechnik die "Kästchensprache", die Darstellung in Blockschaltbildern üblich?
3. Wie kennzeichnet man im Blockschaltbild ein symbolisch dargestelltes Gerät?
4. Skizzieren Sie das Blockschaltbild a) einer Steuerung  
b) einer Regelung.

### Aufgaben

1. Sie kennen viele Steuerungen. Zeichnen Sie von etwa zehn Ihnen bekannten Steuerungen die zugehörigen Blockschaltbilder.  
Sie merken dabei, daß man natürlich ein ganzes Gerät oder aber dessen Teile als einzelne Blöcke darstellen kann. Gliedern Sie soweit auf, wie es Ihnen sinnvoll erscheint.
2. Sie kennen viele Regelungen.  
Denken Sie dabei nicht nur an technische Regelungen, sondern auch an Regelungen in der Biologie und in der Volkswirtschaft.  
(Etwa: Das Gehen des Menschen ist ein Regelungsvorgang, denn: Das "Stellen" (Bewegung der Beine) bewirkt eine Schwerpunktverlagerung, diese wirkt auf das Gleichgewichtsorgan des Menschen und im Gehirn wird aus dieser Lagemessung heraus die nächste Beinbewegung dergestalt berechnet, daß die stabile Aufrechterlage des Menschen nebst der gewünschten Fortbewegung aufrechterhalten wird. Jede Störung (Wind, Unebenheiten im Gelände usw.) werden vom Rechenzentrum eingearbeitet. Diese Regelung ist schon ungeheuer kompliziert. Sie kann übrigens durch Alkoholeinwirkung auf das "Rechenzentrum" an den Stabilitätsrand und auch ins instabile Gebiet gebracht werden...)  
Zeichnen Sie von etwa zehn Ihnen bekannten Regelungen die zugehörigen Blockschaltbilder.

### 3. Einige Beispiele von Steuerungen und Regelungen

=====

In diesem Abschnitt sollen an Hand von Beispielen die Begriffe Steuerungen und Regelungen ohne Hilfsenergie, Steuerungen und Regelungen mit Hilfsenergie, stetige Steuerungen und Regelungen, unstetige Steuerungen und Regelungen, mechanische, pneumatische, hydraulische, elektrische, elektronische Steuer- und Regelgeräte deutlich gemacht werden.

Dabei wird vorerst die Beschreibung nur erläuternd ohne Rechnung erfolgen.

Sie werden dazu in einer Konsultation auch noch eine Anzahl von Lichtbildern sehen.

## 1. Beispiel

=====

### Aufgabenstellung:

Der Flüssigkeitsstand in einem Behälter soll trotz wechselnden Abflusses konstant gehalten werden.

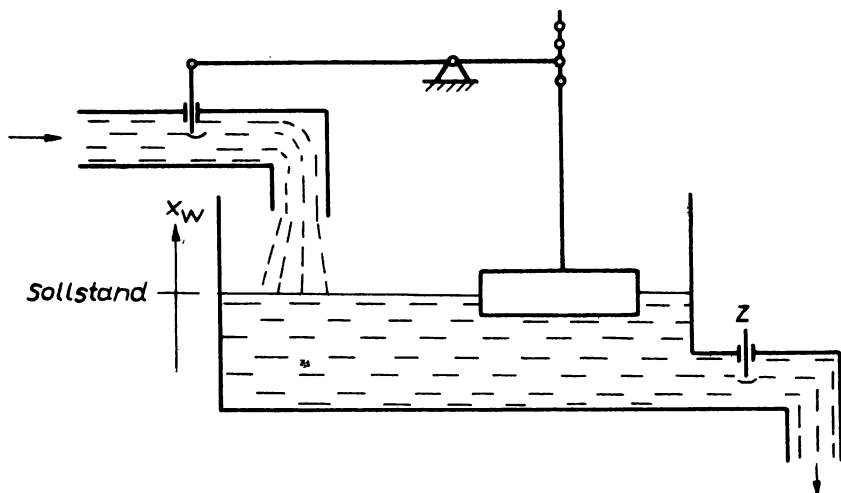


Bild 19

### Ausführung:

Ein Schwimmer drosselt über einen Hebel den Zufluß mehr oder weniger. Der Sollwert wird durch die Anlenkung des Schwimmers am Hebel eingestellt.

### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine stetige mechanische Regelung ohne Hilfsenergie. Bei verändertem Abfluß kann der genaue Sollstand übrigens nicht genau eingehalten werden, denn zu etwas größerem Abfluß gehört eine größere Öffnung des Zulaufes und da der Zulaufschieber mit dem Schwimmer starr verbunden ist, eine etwas tiefere Stellung des Schwimmers und damit des

Flüssigkeitsstandes. Die hier auftretende sogenannte bleibende Regelabweichung ist eine Eigenschaft von Regelkreisen, bei denen Meßwert und Stellwert einander proportional sind.

## 2. Beispiel

=====

### Aufgabenstellung:

Die Drehzahl eines Gleichstromnebenschlußmotors soll einstellbar sein.

### Ausführung:

Ein Stellwiderstand im Feldkreis ermöglicht eine Verände-

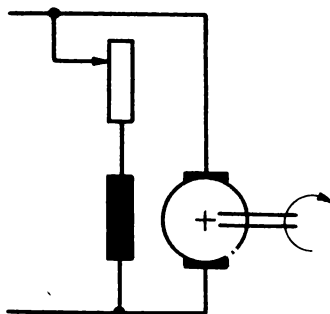


Bild 2o

rung des magnetischen Feldes. Bei größer werdender Feldstärke sinkt die Motordrehzahl.

### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine stetige elektrische Steuerung.

### 3. Beispiel

=====

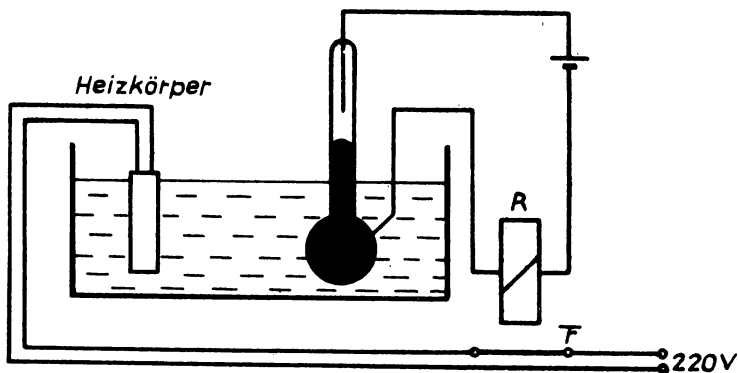


Bild 21

#### Aufgabenstellung:

Die Temperatur des Wassers eines Behälters soll annähernd konstant gehalten werden.

#### Ausführung:

Über ein Kontaktthermometer wird der Erregerkreis eines Relais R bei Erreichen der Solltemperatur geschlossen. Dadurch wird der Ruhekontakt  $\bar{F}$  geöffnet und so die elektrische Heizung abgeschaltet. Die Wassertemperatur sinkt daraufhin bis bei Unterschreitung der Solltemperatur das Relais R wieder abfällt. Die Temperatur des Wassers pendelt um den Sollwert.

Selbstverständlich ist die beschriebene Ausführung nur möglich, wenn die Solltemperatur über der Außentemperatur liegt.

Der Sollwert wird durch die Stellung des oberen Kontakt drahtes am Thermometer eingestellt.

#### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine Zweipunktregelung mit elektrischer Hilfsenergie.



5. Beispiel  
=====

Aufgabenstellung:

Der Unterdruck in einem Feuerungsraum soll zur Gewährleistung einer gleichmäßigen, ökonomischen Verbrennung konstant gehalten werden.

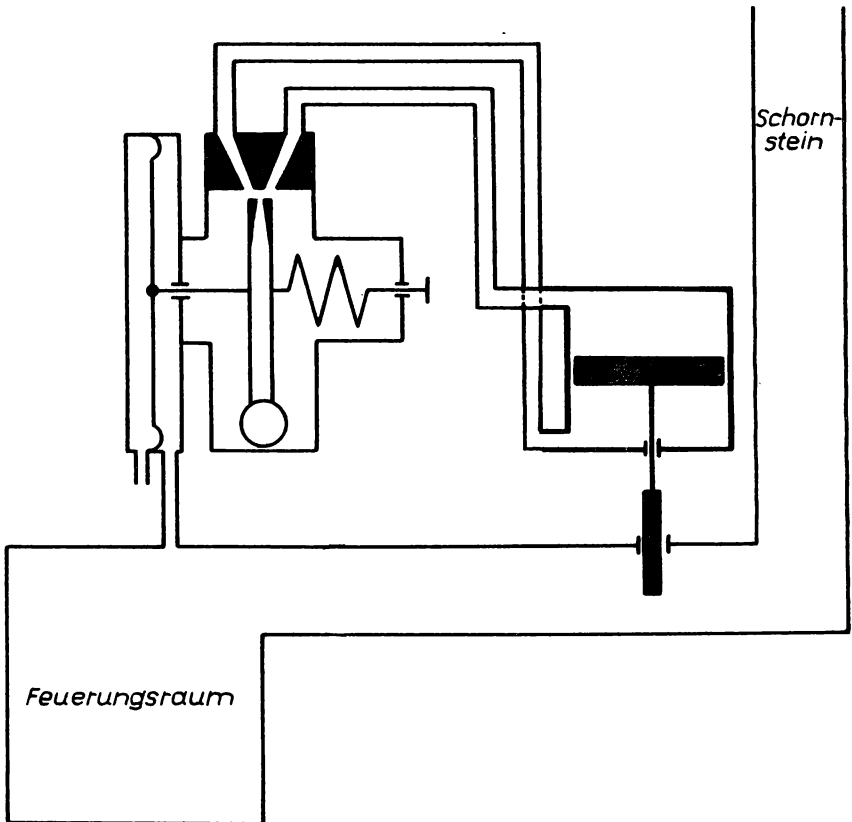


Bild 23



### Ausführung:

Die Differenz von Atmosphärendruck und Saugunterdruck wirkt entgegen einer einstellbaren Federkraft (Sollwert) auf ein schwenkbares Strahlrohr. Aus dem Strahlrohr wird Drucköl (etwa 8 at Ü) als Hilfsenergieeträger in einem millimeterdünnen Strahl gegen zwei Druckaufnehmeröffnungen gerichtet. Bei Mittelstellung des Strahlrohres herrscht in beiden angeschlossenen Leitungen derselbe Druck, bei Abweichungen des Strahlrohres bewirkt die Druckdifferenz eine Verstellung des Kamin-schiebers. Damit ändert sich der Saugunterdruck so, daß das Strahlrohr wieder in Mittelstellung gebracht wird.

### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine stetige Regelung mit hydraulischer Hilfsenergie.

## 6. Beispiel

=====

### Aufgabenstellung:

In der Wasseraufbereitungsanlage eines chemischen Werkes soll der Druck vor den Wasserfiltern so geregelt werden, daß er unabhängig von Schwankungen des Vordruckes und des Durchflusses konstant bleibt.

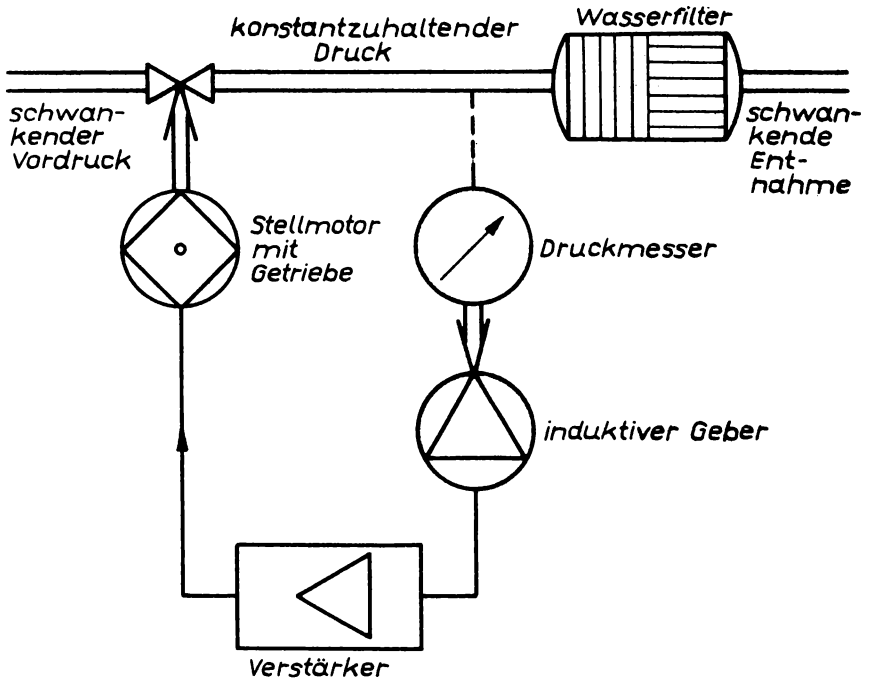


Bild 24

### Ausführung:

Der Druckmesser verstellt einen induktiven Geber so, daß bei Abweichungen des Druckes vom Sollwert eine der Abweichung nach Betrag und Richtung proportionale Fehlerspannung, vom Verstärker leistungsverstärkt einen Motor auf langsamen oder schnelleren (je nach Betrag der Abweichung) Rechts- oder Linkslauf (je nach Richtung der Abweichung) bringt. Der Motor verstellt über ein Getriebe ein Ventil. Wird der konstant zu haltende Druck zu hoch, so wird das Ventil selbsttätig so lange mehr geschlossen, bis der so größer werdende Druckabfall über dem Ventil ein Absinken des zu regelnden Druckes auf den Sollwert bewirkt hat. Dann ist die Fehlerspannung des induktiven Gebers zu null geworden, der Motor steht. Der Sollwert kann durch die verschiedene Ankopplung des induktiven Gebers am beweglichen Organ des Manometers eingestellt werden.

### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine stetige Regelung mit elektrischer und elektronischer Hilfsenergie.

## 7. Beispiel =====

### Aufgabenstellung:

Die über dem Verbraucher B abfallende Spannung  $U_2$  soll trotz schwankender Speisespannung  $U_1$  weitgehend konstant sein.

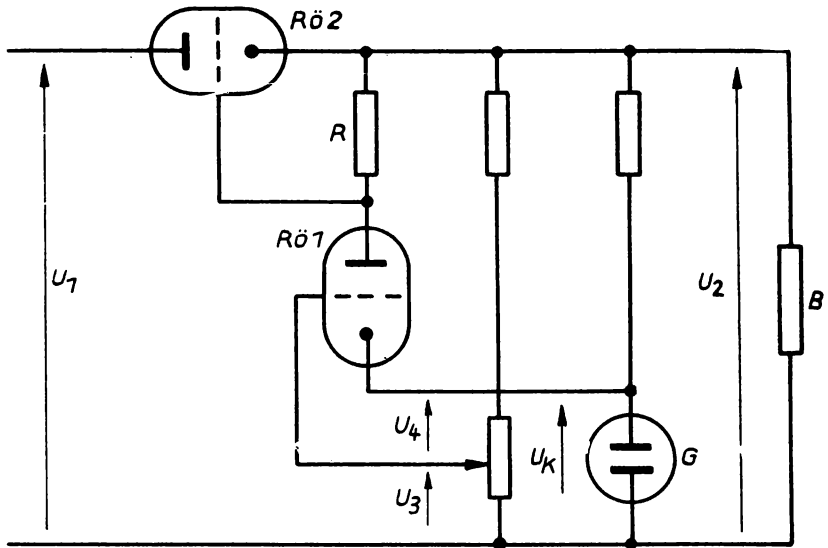


Bild 25

### Ausführung:

Über die Glimmstrecke  $G$  fällt eine konstante Spannung  $U_K$  ab (Eigenschaft von Glimmstrecken). Die Spannung  $U_3$  ist der zu regelnden Spannung  $U_2$  proportional (Spannungsteilung). Die Differenz  $U_4 = U_K - U_3$  steuert als Gitterspannung den Anodenstrom der Röhre  $RÖ1$ . Dieser Anodenstrom ändert mittels seines Spannungsabfalls über  $R$  (Gitterspannung von  $RÖ2$ ) den Anodenstrom von  $RÖ2$  und so die über  $B$  abfallende Spannung.

Wirkungsablauf: Angenommen,  $U_2$  wolle größer als der Sollwert werden, dann  $U_3$  größer als normal,  $U_4 = U_K - U_3$  kleiner, größerer Anodenstrom durch R61, größerer Spannungsabfall über R, damit größere negative Gitterspannung an R62, damit kleinerer Anodenstrom von R62 und so ist dem Zugroßwerden-Wollen von  $U_2$  begegnet.

Bemerkung:

Es handelt sich um eine stetige elektronische Regelung.

## 8. Beispiel =====

### Aufgabenstellung:

Ein Motor soll durch kurzzeitiges Drücken einer Taste  $T_1$  eingeschaltet und durch kurzzeitiges Drücken einer Taste  $T_2$  ausgeschaltet werden. Versehentliches Drücken beider Tasten sei ausgeschlossen.

### Ausführung:

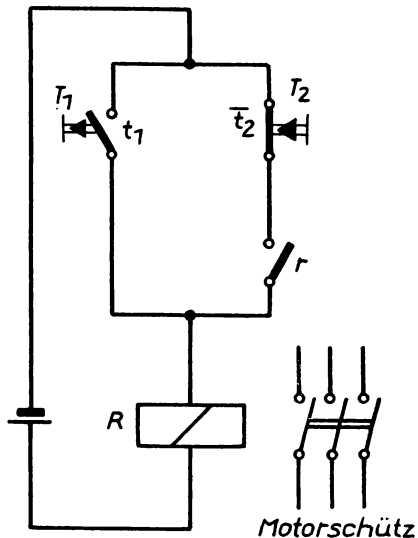


Bild 26

Kurzzeitiges Drücken von  $T_1$  (Arbeitskontakt  $t_1$  wird kurzzeitig geschlossen) schaltet über das Relais R und den Motorschutz den Motor ein. Über den Haltekontakt  $r$  bleibt der Motor eingeschaltet, bis kurzzeitiges Drücken von  $T_2$  (Ruhekontakt  $\bar{t}_2$  wird kurzzeitig geöffnet) den Motor ausschaltet und den Haltekontakt  $r$  abfallen läßt.

### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine unstetige elektrische Steuerung.

## 9. Beispiel

=====

### Aufgabenstellung:

Der Schlitten eines Koordinatenbohrwerkes soll selbsttätig auf gewünschte, an einem Befehlsgeber  $A_2$  einstellbare Koordinaten gebracht werden. Die Einregelung wird nur längs einer Koordinatenachse betrachtet.

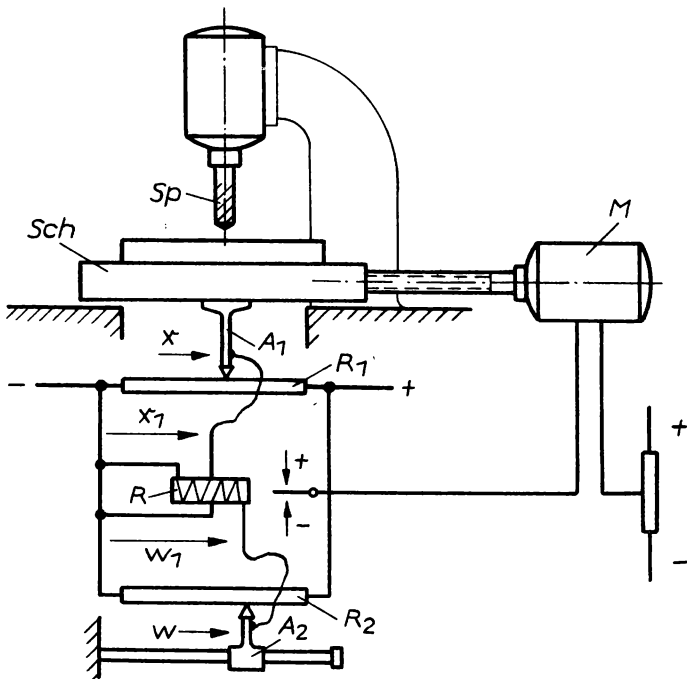


Bild 27

### Ausführung:

Die Stellung des Schlittens Sch wird mittels Spannungsteilerwiderstand  $R_1$  und Schleifer  $A_1$  in eine analoge elektrische Spannung  $x_1$  umgeformt. In gleicher Weise wird die Befehlsgröße  $w$  in eine Spannung  $w_1$  umgeformt. Ein gepoltes Relais R vergleicht die beiden Spannungen. Es steht nur in Mittelstellung bei  $x_1 = w_1$ . Ist dies nicht der Fall, wird der Motor M solange eingeschaltet, bis die Spannungsgleichheit erreicht ist. Dann steht der Schlitten in der befohlenen Lage.

### Bemerkungen:

Es handelt sich um eine stetig-ähnliche Folgeregelung.

Stetig-ähnlich: Ein unstetiger Dreipunktschalter Links-Aus-Rechts (Relais) steuert einen stetigen Motor.

Folgeregelung: Die Schlittenstellung folgt der Führungsgröße  $w$ . Die vorliegende Regelung ist eine analoge Regelung, weil die Befehlseingabe und Signalverarbeitung in physikalischen Größen (Spannungen) geschieht, die ein Analogon der Regelgröße (Lage) sind.



# 10. Beispiel

=====

## Aufgabenstellung:

Wie beim vorhergehenden Beispiel; die Führungsgröße  $w$  soll aber nicht als dem Lochabstand analoge Länge, sondern als Zahl eingestellt werden können.

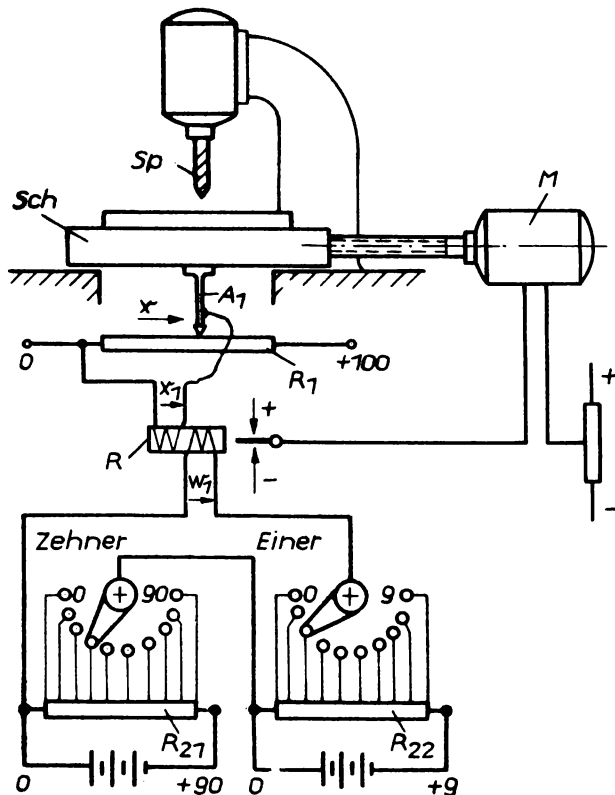


Bild 28

Ausführung:

Die Befehlsspannung  $w_1$  wird aus "Zehnern" und "Einern" (etwa 1 mm und 0,1 mm Lage entsprechend) zusammengesetzt. An den Einstellern kann zahlenmäßig (digital) die gewünschte Koordinate befohlen werden.

Bemerkungen:

Es handelt sich um eine digitale, stetig-ähnliche Nachlauf-Lageregelung.

Selbstverständlich ist die betrachtete Regelung nicht rein digital. Man bezeichnet aber ein System als digital, wenn neben analogen auch digitale Signale auftreten.

## 11. Beispiel =====

### Aufgabenstellung:

Wie beim vorhergehenden Beispiel, doch soll das lästige Einstellen der Bohrkoordinaten selbsttätig geschehen.

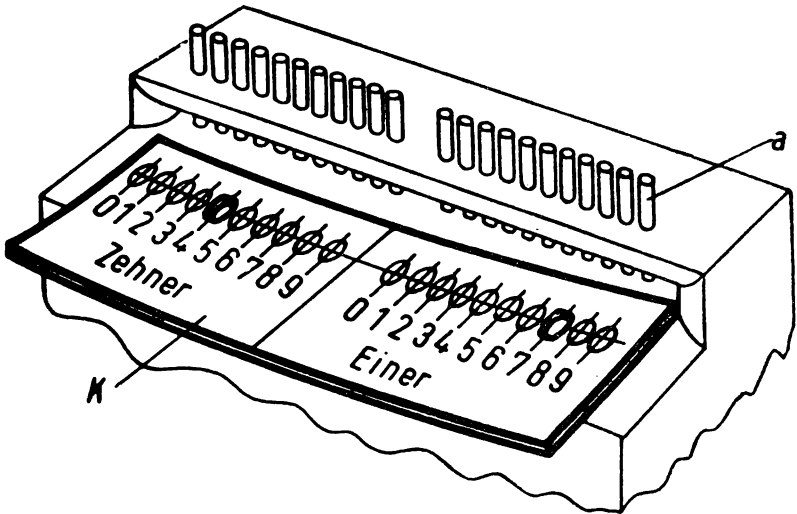


Bild 29

### Ausführung:

Die Befehlsspannungen  $w_1$  ergeben sich durch Abtastung einer unter federnden Kontaktstiften a entsprechend durchlaufenden Lochkarte K.

### Bemerkungen:

Auch das An-, Ab- und Umstellen der Maschine, sowie das Spannen und Weiterbewegen des Werkstückes kann durch weitere Löcher auf der Lochkarte oder auf einem Lochband befohlen werden. Das ist der grundsätzliche Weg zur selbsttätig gesteuerten Werkzeugmaschine.

### Wiederholungsfragen:

1. Warum kann im Beispiel 1 bei verändertem Abfluß der genaue Sollstand nicht gehalten werden?  
Wie ist die Genauigkeit des Sollstandhaltens von der Lage des Hebeldrehpunktes abhängig?
2. Warum wird beim Gleichstromnebenschlußmotor die Drehzahl mit größer werdender Erregerfeldstärke kleiner?
3. Was ist eine Zweipunktregelung?
4. Welches ist der Unterschied zwischen einer Zweipunktregelung und einer stetigen Regelung?
5. Im Beispiel 4 ist der Durchfluß (Menge pro Zeiteinheit) als Differentialquotient  $\dot{M}$  angegeben. Machen Sie sich klar, daß diese Bezeichnung sinnvoll ist.
6. Wie wirkt ein Membranventil?
7. Was ist ein Düse-Prallplatte-System?
8. Was kann an der Feder im 4. Beispiel eingestellt werden?
9. Was ist ein Strahlrohrregler, wie wirkt er?
10. Was ist ein induktiver Geber? Wie wirkt er prinzipiell?
11. Was ist der Unterschied zwischen einer elektrischen und einer elektronischen Regelung?
12. Was geschieht im Beispiel 8, wenn beide Tasten  $T_1$  und  $T_2$  gleichzeitig gedrückt würden?
13. Das gepolte Relais von Beispiel 9 arbeitet als "Null-indikator". Machen Sie sich diese Bezeichnung klar.
14. Wie ist das 9. Beispiel zu ergänzen, damit der Schlitten in zwei Koordinatenrichtungen verstellt werden kann?
15. Wie muß im Beispiel 10 die digitale Einstellung vorgenommen werden, damit Schlitten und Schleifer  $A_1$  ganz nach links gefahren werden?
16. Wie muß im 11. Beispiel die Verdrahtung der Taststifte (Kontaktbürsten) in Anlehnung an Beispiel 10 erfolgen?

1. Nennen Sie Ihnen bekannte Zweipunktregelungen.
2. Wie werden sich Verschmutzungen von Vordrossel oder Düse im Beispiel 4 auf die Regelung auswirken?
3. Bei Ausfall der Regelung (Membranriß, Druckluftausfall) von Beispiel 4 würde das Ventil öffnen.  
Wie müßte die Regelung verändert werden, damit bei ihrem Ausfall das Ventil geschlossen wird (aus Sicherheitsgründen kann das erwünscht sein!)?
4. Was geschähe, wenn im Beispiel 5 die Druckanschlüsse des Membranmeßwerkes (gegen Atmosphäre und in den Feuerungsraum) vertauscht würden?  
(Es würde damit im geschlossenen Wirkungsablauf die Inversion fehlen. Der Regler würde an der Regelstrecke keine Gegenkopplung, sondern eine Mitkopplung darstellen.)
5. Wie ließe sich die Aufgabenstellung von Beispiel 6 durch eine Regelung ohne Hilfsenergie verwirklichen?
6. Wie könnte man der Aufgabenstellung von Beispiel 6 mit einem Kontaktmanometer gerecht werden?
7. Zeichnen Sie die Blockschaltbilder aller angegebenen Beispiele 1 bis 9.

Anleitung:

Blockschaltbild des Beispiels 1:

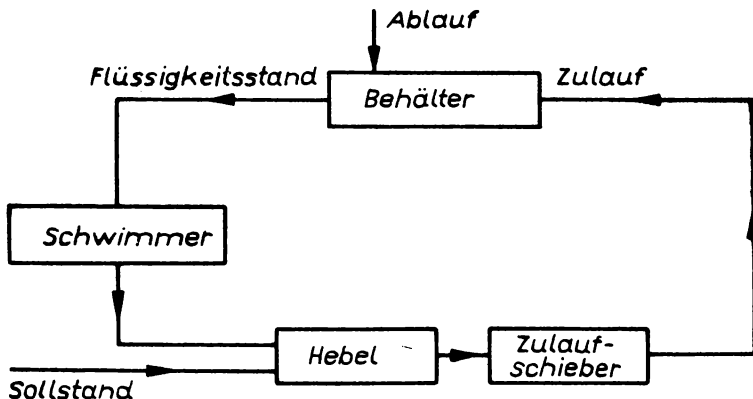


Bild 30

## Literaturverzeichnis

\*\*\*\*\*

1. Automatisierung, Stand und Auswirkungen in der Bundesrepublik Deutschland, Carl Hanser Verlag München 1957, 259 Seiten

Beihefte zur Regelungstechnik:

2. Bd.1: Die Laplace-Transformation und ihre Anwendung in der Regelungstechnik (R.Herschel) 1956, 142 Seiten
3. Bd.2: Regelungsvorgänge in der Biologie (H.Mittelstaedt) 1956, 177 Seiten
4. Bd.3: Nichtlineare Regelungsvorgänge (W.Hahn) 1956, 108 Seiten
5. Bd.4: Volkswirtschaftliche Regelungsvorgänge im Vergleich zu Regelungsvorgängen der Technik (H.Geyer und W.Oppelt) 1957, 143 Seiten
6. Bd.5: Regler und Regelungsverfahren der Nachrichtentechnik (G.Hässler und E.Hölzler) 1958, 119 Seiten
7. Bd.6: Anwendung von Rechenmaschinen zur Berechnung von Regelvorgängen (W.Oppelt) 1958, 128 Seiten  
Sämtlich erschienen im R.Oldenbourg Verlag, München
8. Braunschweig, K.: Höhere Mathematik für Regelungstechniker, Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium, Herausgeber: Ingenieurschule für Feinwerktechnik, Jena, Lehrbrief 1, 1959 (124 Seiten), Lehrbrief 2, 1960 (115 Seiten)
9. Curth, W.: rohre -regler - chemie. Ein leicht verständlicher Einblick in die Apparate-, Meß- und Regelungstechnik der chemischen Industrie, Urania-Verlag Leipzig/Jena 1960, 205 Seiten
10. Elektronische und magnetische Steuerungen und Regelungen in der Antriebstechnik, Nach Vorträgen einer Fachtagung des VDE-Bezirksvereins Frankfurt (Main) am 16. und 17. Mai 1952 bearbeitet von Professor Dr.-Ing. O. Mohr, Berlin, 2.Aufl. 1955, VDE-Verlag, Wuppertal und Berlin, 124 Seiten
11. Ferner, V.: Anschauliche Regelungstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin 1960, 380 Seiten
12. Gawrilow, M.A.: Relaischalttechnik für Stark- und Schwachstromanlagen, VEB Verlag Technik, Berlin 1953, 324 Seiten

13. Gille, J.C., Pelégrin, M. und Decaulne, P.: Lehrgang der Regelungstechnik, Band 1: Theorie der Regelungen, VEB Verlag Technik, Berlin und R.Oldenbourg, München, 1960, 447 Seiten  
In Vorbereitung: Band 2: Bauelemente des Regelkreises  
Band 3: Entwurf von Regelkreisen
14. Handbuch für Hochfrequenz- und Elektro-Techniker, 4. Band enthält einen 85-seitigen Abschnitt über: Die Elektronik in der Steuerungs- und Regelungstechnik, Bearbeiter: H.Brungsberg und G.Weitner, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin
15. Handbuch für Hochfrequenz- und Elektro-Techniker, 6. Band enthält einen 45-seitigen Abschnitt über: Schaltalgebra, Bearbeiter: K.Fischer, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin
16. Hartmann und Braun AG Frankfurt/Main, Druckschriften
17. Hengstenberg, J., Sturm, B. und Winkler, O.: Messen und Regeln in der Chemischen Technik, Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg 1957, 1261 Seiten
18. Henze, F.: Schaltungen der Starkstromtechnik, Band 2: Steuer- und Regelschaltungen, 2. Teil, Fachbuchverlag Leipzig 1959, 215 Seiten
19. Henze, F.: Schaltungen der Starkstromtechnik, Band 3: Relais-schaltungen, Fachbuchverlag Leipzig 1958, 195 Seiten
20. Hofmann, W.: Meß- und Regelungstechnik, Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium, Herausgeber: Ingenieurschule für Aufbereitung und Hüttentechnik Unterwellenborn, Lehrbriefe 1 bis 5, 1957, 1958. (91, 110, 97, 114, 95 Seiten und Bildbeilagen, Format DIN A 4)
21. Holzmüller, W.: Technische Physik Band 1, VEB Verlag Technik Berlin 1959, 536 Seiten, der Band enthält die Abschnitte Mathematische Ergänzungen, Technische Mechanik, Regelungstechnik
22. Hornauer, W.: Industrielle Automatisierungstechnik, VEB Verlag Technik Berlin, 2.Aufl. 1956, 185 Seiten
23. Hutarew, G.: Regelungstechnik, Kurze Einführung am Beispiel der Drehzahlregelung von Wasserturbinen, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1955, 177 Seiten

24. Kindler, H.: Grundlagen der Regelungstechnik, Lehrbriefe für das Hochschul-Fernstudium, Herausgeber: TH Dresden, 1959, Lehrbrief 1 (60 Seiten), Lehrbrief 2 (60 Seiten), Lehrbrief 3 (60 Seiten), bearbeitet von H.Wiessenhütter
25. Kindler, H.: Bauelemente der Regelungstechnik, Lehrbriefe für das Hochschul-Fernstudium, Herausgeber: TH Dresden, 1959, Lehrbrief 1 (60 Seiten), Lehrbrief 2 (60 Seiten), Lehrbrief 3 (60 Seiten), bearbeitet von H.Wiessenhütter
26. Kretzmann, R. und Mitarbeiter: Handbuch der Automatisierungs-Technik, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1959, 411 Seiten
27. Kretzschmer, F.: Pneumatische Regler, VDI-Verlag, Düsseldorf 1958, 156 Seiten
28. Kröners Taschenbuch der Maschinentechnik, Erster Band, Teil 5, Abschnitt 12: Regelungstechnik, bearbeitet von W.Oppelt, Alfred Kröner Verlag Stuttgart 1954
29. Leonhard, A.: Die selbsttätige Regelung, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 2.Aufl. 1957, 376 Seiten
30. Megede, W.: Zur Einführung in die Technik selbsttätiger Regelungen, W.de Gruyter Verlag, Berlin 1956 (Sammlung Göschen, Bd.714/714 a), 176 Seiten
31. Mejerow, M.W.: Grundlagen der selbsttätigen Regelung elektrischer Maschinen, VEB Verlag Technik, Berlin 1954, 171 Seiten
32. Normblatt DIN 19226 Regelungstechnik, Benennungen, Begriffe
33. Oldenbourg, R.C. und Sartorius, H.: Dynamik selbsttätiger Regelungen, Verlag von R.Oldenbourg, München, 2.Aufl. 1951, 258 Seiten
34. Oppelt, W.: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr., 3.Aufl. 1960, 632 Seiten
35. Patentedokumentation Regelungstechnik Ordnungssysteme Herausgegeben von der VDI-VDE-Fachgruppe Regelungstechnik, VDI-Verlag Düsseldorf, VDE-Verlag Berlin, 98 Seiten



36. Pavlik, E. und Machei, B.: Ein kombiniertes Regelsystem für die Verfahrensindustrie, Methodik, Elemente und Geräte der Teleperm-Telepneu-Technik, Verlag R.Oldenbourg, München 1960, 204 Seiten
37. Regelungstechnik - Moderne Theorien und ihre Verwendbarkeit, Bericht über die Tagung der VDI-VDE-Fachgruppe Regelungstechnik in Heidelberg vom 25. bis 29. September 1956, herausgegeben von G.Müller, Verlag R.Oldenbourg, München 1957, 483 Seiten DIN A 4
38. Regelungstechnik, Vorträge des VDI-VDE-Lehrganges in Bonn 1953 und Essen 1954, VDI-Verlag und VDE-Verlag, Düsseldorf, Wuppertal und Berlin, 2.Aufl., 1956, 285 Seiten
39. Schäfer, O.: Grundlagen der selbsttätigen Regelung, Franzis-Verlag, München 1957, 2.Aufl., 180 Seiten
40. Schmid, Wolfgang: Automatologie, Grundlagen der Selbststeuerung von Fertigungsmaschinen, Carl Hanser Verlag, München 1952, 281 Seiten
41. Schönfeld, H.: Regelungstechnik, Ausgewählte Kapitel, VEB Verlag Technik, Berlin 1953, 84 Seiten
42. Schuler, M.: Einführung in die Theorie der selbsttätigen Regler, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, Leipzig 1956, 278 Seiten
43. Seemann, J.: Einführung in die Regelungstechnik, Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium, Herausgeber: Ingenieurschule für Feinwerktechnik, Jena 1959, Lehrbrief 1 und Lehrbrief 2 (91 und 113 Seiten)
44. Sokolow, T.N.: Elektrische Nachlaufregler, VEB Verlag Technik Berlin und Porta Verlag München, 1957, 276 Seiten
45. Solodownikow, W.W. und Mitarbeiter: Grundlagen der automatischen Regelung, Teil 1 727 Seiten (1958), Teil 2 460 Seiten (1959), Verlag R.Oldenbourg München und VEB Verlag Technik Berlin
46. Taschenbuch für Messen und Regeln in der Wärme- und Chemietechnik, Siemens und Halske Aktiengesellschaft, 2.Aufl. 1959, 248 Seiten, DIN A 6
47. Trnka, Z.: Einführung in die Regelungstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin 1956, 404 Seiten

48. Truxal, J.G.: Entwurf automatischer Regelsysteme,  
Verlag R.Oldenbourg, Wien und München, 726 Seiten
49. Tsien, H.S.: Technische Kybernetik, Verlag Berliner  
Union Stuttgart und VEB Verlag Technik Berlin,  
1958, 287 Seiten
50. Wahl, H.: Die Technik elektrischer Steuerschaltungen,  
Sonderdruck, Metzner und Jung GmbH, Wuppertal
51. Westhoff, G.: Temperaturmessung und Temperaturregelung  
im Betrieb, VEB Verlag Technik, Berlin 1954, 168  
Seiten
52. Weyh, U.: Elemente der Schaltalgebra, Verlag R.Oldenbourg,  
München 1960
53. Winckler, R.: Faustformeln des Regelungstechnikers,  
R.v.Decker's Verlag, Hamburg-Berlin-Bonn, 1960,  
48 Seiten
54. Wittmers, H.: Lehrbuch der Regelungstechnik, Band 1,  
Regelkreis und Steuerkette, Allgemeinverständliche  
Einführung in die Elemente der Automatik, Fach-  
buchverlag Leipzig, 1959, 143 Seiten
55. Wunsch, G.: Das Regel- 1 x 1, Askania-Sonderdruck R 1290,  
1955, 36 Seiten
56. Zühlsdorf, W.: Grundlagen der Steuerungstechnik für die  
Elektroautomatisierung von Industrieanlagen, VEB  
Verlag Technik, Berlin 1955, 203 Seiten, 2.Aufl.,  
1957, 206 Seiten

### Zeitschriften:

- Z 1   Automatik, R.v.Decker's Verlag, Hamburg
- Z 2   Automatisierung, K.M.Hageneier Verlag, Heidelberg
- Z 3   Regelungstechnik, Verlag R.Oldenbourg, München
- Z 4   Regelungstechnische Praxis, Verlag R.Oldenbourg, München
- Z 5   Zeitschrift für messen steuern regeln, VEB Verlag Technik, Berlin
- Z 6   Archiv für Elektrotechnik, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg
- Z 7   Archiv für technisches Messen, Verlag R.Oldenbourg, München
- Z 8   Elektrie, früher Deutsche Elektrotechnik, VEB Verlag Technik, Berlin
- Z 9   Elektronik, Franzis Verlag, München
- Z 10   Elektronische Rundschau, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin-Borsigwalde
- Z 11   Elektrotechnische Zeitschrift, VDE-Verlag, Berlin
- Z 12   Feingerätetechnik, VEB Verlag Technik, Berlin
- Z 13   Feinwerktechnik, Wintersche Verlagshandlung, Füssen
- Z 14   Ölhydraulik und Pneumatik, Krausskopf Verlag, Wiesbaden
- Z 15   Siemens-Zeitschrift
- Z 16   VDI-Zeitschrift, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Z 17   Die Technik, VEB Verlag Technik, Berlin
- Z 18   Zeitschrift für Instrumentenkunde, Friedr.Vieweg und Sohn, Braunschweig

Quellennachweis:

52 und Entwurf für die Neufassung vom 29.6.1959

34

Lwow: Albert Einstein, Leben und Werk, Urania-Verlag,  
Berlin-Jena

Z 12: 9.Jg., 1960, Heft 10, Artikel von Kortum

Z 17: 1961, Heft 1, Artikel von Thiessen

Z 18: 1960 Artikel von Verhagen

Bildnachweis:

Bild 24 aus 16

Bilder 25, 27, 28, 29 aus 34

# I n h a l t s v e r z e i c h n i s

\*\*\*\*\*

	<u>Seite</u>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Automatisierungstechnik und Gesellschaft	1
1.2 Was ist Automatisierung?	3
1.3 Warum Automatisierungstechnik?	5
1.4 Wie automatisieren?	5
1.5 Was ist eine Steuerung, was ist eine Regelung?	7
1.6 Automatisierungstechnik als Lehrfach	9
1.7 Wie eignet man sich Grundkenntnisse der "Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungs- technik" an?	11
1.8 Literaturhinweise	12
Wiederholungsfragen	13
Aufgaben	14
 <b>2. Wichtige Benennungen und Begriffe, Blockschaft- bilder</b>	 <b>16</b>
2.1 Wichtige Benennungen und Begriffe	16
Wiederholungsfragen	28
Aufgaben	28
2.2 Blockschaftbilder	29
Wiederholungsfragen	35
Aufgaben	35
 <b>3. Einige Beispiele von Steuerungen und Regelungen</b>	 <b>36</b>
Wiederholungsfragen	53
Aufgaben	54
 <b>Literaturverzeichnis</b>	 <b>55</b>
<b>Quellennachweis</b>	<b>61</b>



# INGENIEUR- FERNSTUDIUM

BIRNSTIEL

## EINFÜHRUNG IN DIE REGELUNGS- UND STEUERUNGSTECHNIK

2

HERAUSGEBER  
INGENIEURSCHULE FÜR  
FEINWERKTECHNIK JENA

1008-02/62

**Herausgeber:**  
**Ingenieurschule für Feinwerktechnik**  
**Jena**

# **Einführung in die Regelungs- und Steuerungstechnik**

**Lehrbrief 2**

**Übersicht über die Glieder von Regelkreisen und Steuerketten**

**von**

**Horst Birnstiel**

**2. Auflage**

**1962**

---

**Zentralstelle für Fachschulausbildung**  
**— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —**  
**Dresden**



**Alle Rechte vorbehalten**

**Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium**

---

**Gebühr DM 3,-**

**Ag 616/ 265/62**

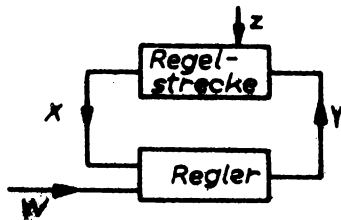
**Best.-Nr. 1008-02/62**

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Das aufgegliederte Blockschaltbild	1
2. Meßfühler	8
3. Meßumformer	22
4. Sollwertgeber	31
5. Differenzglieder	36
6. Zeitglieder, Rechner	44
7. Verstärker, Energieschalter	56
8. Stellantriebe	66
9. Stellglieder	74
10. Regelstrecken	80
Ergänzung zum Literaturverzeichnis	87
Quellennachweis	88

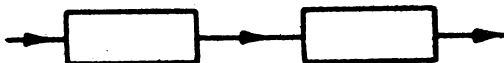
## 1. Das aufgegliederte Blockschaltbild

Die allgemeinen Blockschaltbilder einer



Regelung

und einer



Steuerung

charakterisieren die betreffenden Vorgänge und ihre Unterschiede. Sie abstrahieren von dem speziellen gerätemäßigen Aufbau und geben den Signalfluß an. Diese Signalabläufe kommen in den vielfältigsten Formen vor. Es liegt nahe, sich solche Abläufe dadurch schematisch vereinfacht klarzumachen, daß man jedes signalverarbeitende Gerät oder auch Geräteteil durch ein Kästchen ersetzt, also aufgegliederte Blockschaltbilder zeichnet. Wird die Aufgliederung weit getrieben, so bekommt wohl jede Regelung und jede Steuerung ein nur für sie gültiges Blockschaltbild. Wird nur bis zu solchen Teilen aufgegliedert, die irgendwie verwirklicht jede Regelung und Steuerung enthält, so führt das zu den folgenden Blockschaltbildern.

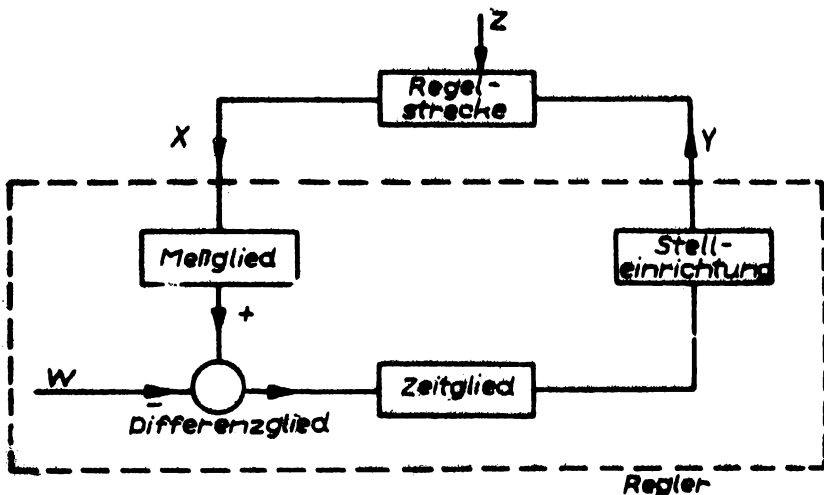


Bild 1

Bild 1 erläutert die wesentlichen Aufgaben eines jeden Reglers.

Der Regler muß

1. die Regelgröße messen (Meßglied),
2. den gemessenen Wert mit dem jeweiligen Sollwert vergleichen und die Regelabweichung  $x_w = X - W$  bilden (Differenzglied),
3. der Regelabweichung ein Zeitverhalten aufprägen, um damit eine Anpassung an die Regelstrecke und an die betreffende Aufgabenstellung zu ermöglichen (Zeitglied) und
4. mit der im Zeitglied verarbeiteten Regelabweichung eine Beeinflussung der Regelgröße erreichen (Stelleinrichtung).

Damit hat sich der Ablaufkreis (Regelkreis) geschlossen.

Nach Bild 1 muß man zunächst denken, daß für jede Regelungsaufgabe ein spezieller Regler erforderlich sei. Also: Eine Temperaturregelung brauche einen Temperaturregler, eine Druckregelung einen Druckregler usw. Das wird für manche Regelungen auch immer so sein (z.B. Turbinenregler, Kursregler). Für viele Aufgaben, insbesondere in der Verfahrenstechnik, wo Fließgüter (im Gegensatz zu Stückgütern) hergestellt werden, können aber Einheitsregler eingesetzt werden. Das sind moderne, baukastenmäßig zusammensetzbare Regelungssysteme. Wie deren Verwendung möglich wird, liegt auf der Hand: Das Meßglied darf nicht mehr die verschiedensten Größen weitergeben, sondern es muß Einheitsgrößen weitermelden. Alle Teile des Reglers, bis auf das Meßglied, das natürlich der betreffenden Regelungsaufgabe angepaßt sein muß, können dann (weil sie Einheitsgrößen zu verarbeiten haben) einheitliche Geräte einer Baukastenreihe sein. Voraussetzung dafür sind Umformer, welche die zu regelnde Größe in eine Einheitsgröße umsetzen.

International vereinbart sind als Einheitsgrößenbereiche

1. der Druckbereich 0,2...1,0 at Ü und
2. der Strombereich 0...20 mA bei maximal 24 V Gleichspannung.

Es gibt also elektrische, pneumatische und hydraulische Baukastensysteme, die sich mit Übergangsgliedern von einem zum anderen gegenseitig ergänzen können. (Elektro-pneumatische Regelungssysteme, usw.)

Beispiele solcher Systeme sind:

IEB-System	( <u>I</u> nternationales <u>E</u> inheitliches <u>B</u> aukastensystem der sozialistischen Länder) Einheitsgrößen 0,2...1,0 at Ü; 0...20 mA
UMC-System	(Hartmann und Braun, Schoppe und Faeser)
TRIC-System	Einheitsgrößen 0,2...1,0 at Ü; 0...20 mA

Elektrische Trans-  
mitterregelung

Teleperm-Teleneu-  
Regelsystem

(Askania, Berlin-Friedenau)

Einheitsgrößen 0...120 mA

(Siemens und Halske)

Einheitsgrößen 0,2...1,0 at Ü;

0...50 mA

usw.

Solche Systeme umfassen etwa die im aufgegliederten Block-  
schaltbild angegebenen Geräte. Dabei müssen aber die an-  
gegebenen Kästchen nicht Geräte für sich sein. Die Auftei-  
lung ist eine funktionelle, keine örtliche.

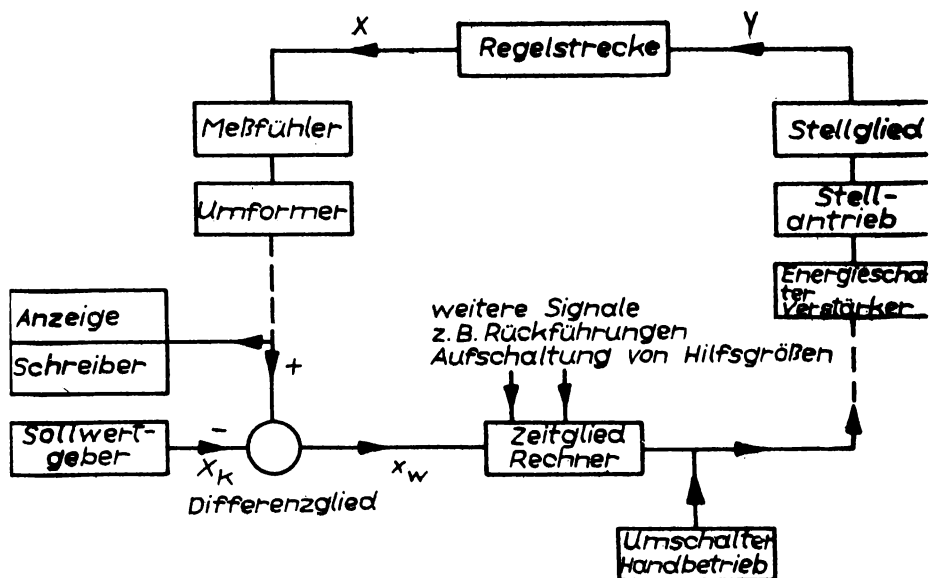


Bild 2

Da in modernen Betrieben der Verfahrenstechnik die Meß- und Regelgeräte zentral in Warten zusammengefaßt sind, müssen die gemessenen Größen dorthin übertragen und andererseits die Regelbefehle zurück in die Anlage geleitet werden. Die Übertragung von elektrischen Größen (durch Kabel) ist leichter möglich als die von pneumatischen (durch Kapillarleitungen). Man wählt deshalb die Übertragungsleitungen (im Bild 2 gestrichelt gezeichnet) in örtlich verzweigten Anlagen gern elektrisch. An der Regelstrecke wird dann das Regelsignal leistungsmäßig verstärkt und es beeinflußt über Stellantrieb und Stellglied die Regelgröße.

Bild 3 erläutert die wesentliche Aufgabe einer Steuerung:

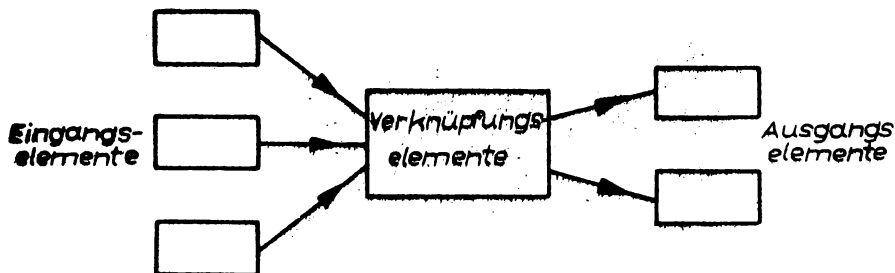


Bild 3

**Eingangselemente** (Fühler, Befehlsgeber, Tastschalter, Endkontakte usw.) leiten die Steuervorgänge ein.

**Verknüpfungselemente** (Relais mit oder ohne Kontakten, Mischverstärker usw.) sorgen für die gewünschte Verarbeitung der einzelnen Einflußgrößen.

**Ausgangselemente** (Verstärker, Energieschalter, Stellantriebe, Stellglieder) verstärken die Ausgangssignale der Verknüpfungselemente und greifen in den zu steuernden Vorgang ein.

So wie es Baukastensysteme für Regelungen gibt, gibt es auch welche für Steuerungen (z.B. Logistat (AEG), Simatic (Siemens)).

Man erkennt, daß sich Regelungen und Steuerungen vom gerätemäßigen Aufbau her nicht unterscheiden. Hier wie dort wird gemessen, umgeformt, weitergeleitet, verarbeitet, verstärkt, eingegriffen (Kybernetik!).

Betrachtet man einen Ausschnitt eines Regelkreises, so ist das eine Steuerung. Betrachtet man den gesamten Regelkreis in seinem Ablauf von der Führungsgröße nach der Regelgröße hin gesehen, so ist das eine Steuerung. Einmal ist die Steuerung ein Teil der Regelung, das andere Mal ist die Regelung ein Teil der Steuerung. Die Begriffe Steuern, Regeln (und Messen als dritter im Bunde) gehören zusammen, und so bildete sich ja die richtige aber leider ellenlange Bezeichnung Betriebsmeß- Steuerungs- und Regelungstechnik.

Im Folgenden soll übersichtsmäßig von den aus Bild 2 hervorgehenden wichtigsten Gliedern von Regelkreisen und Steuerketten die Rede sein.



### Wiederholungsfragen:

1. Welche Teilaufgaben hat jeder Regler zu erfüllen?
2. Wie wird es möglich, für verschiedene Regelungsaufgaben dieselben Geräte zu verwenden?
3. Was sind Einheitsgrößen?
4. Wie sieht das aufgegliederte Blockschaltbild eines Regelkreises aus?
5. Wie sieht das aufgegliederte Blockschaltbild einer Steuerkette aus?
6. Was haben eine Regelung und eine Steuerung für gemeinsame Merkmale, was unterscheidet beide?

### Aufgaben:

1. Teilen Sie einige Ihnen bekannte Regelungen auf in Regelstrecke, Meßglied, Differenzglied, Zeitglied, Stelleinrichtung.
2. Teilen Sie einige Ihnen bekannte Steuerungen auf in Eingangselemente, Verknüpfungselemente und Ausgangselemente.  
(z.B. Anwahl eines Fernsprechteilnehmers, Signalsteuerung durch fahrende Züge).

## 2. Meßfühler

Das Messen ist Voraussetzung für das Regeln.

Wenn der Regler die Regelgröße auf gewünschte Werte bringen und dort halten soll, so muß er immer wissen "woran er ist", indem er die zu überwachende Größe dauernd mißt.

Eingang eines jeden Reglers ist das Meßglied.

Gegenüber Meßgeräten, die nur einfach anzeigen, haben Reglermeßglieder Besonderheiten, die sich aus ihrer Funktion ergeben.

1. Das Reglermeßglied hat immer eine "Abgriffeinrichtung", die den gemessenen Wert im Regler weitergibt.  
Häufig wird dabei ein Ausschlag (Weg) in einen elektrischen Wert (der leicht weiterzugeben ist) umgeformt.  
(Widerstandsferngeber, induktive Geber, kapazitive Abgriffe).
2. Das Reglermeßglied hat oft nur einen kleinen Meßbereich, da es nur Schwankungen um den Sollzustand zu messen hat.  
Typisches Beispiel: Standmessung an Behältern, deren Füllstand geregelt wird. Vom Meßglied wird nur ein kleiner Bereich um den Sollstand erfaßt. Weicht der Stand nach unten ab, so öffnet der Regler den Zulauf mehr und umgekehrt. Die gesamte Standhöhe von etwa einigen Metern braucht gar nicht erfaßt zu werden.
3. Das Reglermeßglied hat oft eine "Einstellungsmöglichkeit" des Sollzustandes.  
Damit ist gemeint, daß häufig direkt am Meßwerk der Sollwert eingestellt werden kann, daß also Meßglied, Differenzglied und Sollwertgeber ein Gerät sind.
4. Das Reglermeßglied hat oft große Verstellkräfte.  
Wenn das Meßglied große Verstellkräfte, die zur Betätigung des Stellgliedes ausreichen, aufbringen kann, so wird eine Regelung ohne Hilfsenergie möglich. Das ist natürlich von Vorteil.

Beispiele: Standregelung: Großer Schwimmer verstellt  
Zulauf

## **Temperaturregelung: Dampfdruckfühler verstellt Ventil.**

Diese Besonderheiten werden Sie teils immer, teils häufig bei Reglermeßgliedern finden.

Es folgt eine "Übersicht über die Meßfühler".

Weil das, was meßbar und beeinflussbar ist, auch zu regeln oder zu steuern geht, gibt die Tabelle gleichzeitig eine Übersicht über regelbare oder steuerbare Größen.

Gehen Sie die Übersicht aufmerksam durch, am besten zusammen mit Studienkollegen.

Erinnern Sie sich dabei an bereits Bekanntes.

Denken Sie von der Messung ausgehend mögliche Regelungen durch.

Etwa so: Abstandsregelung: Der Schlitten einer Werkzeugmaschine verstellt einen Widerstandsgeber, der Teil einer Brückenschaltung als Eingang eines Verstärkers ist. Vom Verstärker wird der Motor für die Schlittenbewegung gesteuert usw.

Diese Überlegungen werden zunächst sehr grob sein. Sie schulen aber das regelungstechnische Denken.

Viele der hier einfach aufgezählten Meßmöglichkeiten werden Sie in den Lehrbriefen über Betriebsmeßtechnik genauer kennenlernen. Die Übersicht bereitet Sie darauf vor.

**Übersicht über die Meßfühler  
(nach Holzmüller)**

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
<b>1. Räumliche Lage</b>			
<b>1.1 Abstand Entfernung Winkel</b>		Mechanischer Taster zur Be- tätigung von Strahlrohr, Prallplatte	Chemische Indu- strie, Kraft- werke, Maschi- nenbau
	Induktivitäts- änderung	Drehfeldge- ber	Fernsteuerung,
	Widerstands- änderung	Potentiometer, Widerstands- streifen	Nachführung von
	Lichtsteue- rung	Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	Werkzeugen in der Metallindu- strie
<b>1.2 Schicht- dicke</b>		Taster	Herstellung von
		kapazitiver	Folien,
		Meßfühler, ver- änderliche In- duktivität (Brückenschal- tung)	Kalanderein- stellung, Ka- schieren von Gewebe
<b>1.3 Abtastung von Kurven und Zeich- nungen</b>	Lichtschwan- kungen	Fotozelle, Foto- element, Foto- widerstand	Fräsen und Dre- hen nach Zeich- nungen, Folge- regler
<b>1.4 Entfer- nung, Flughöhe, Meeres- tiefe</b>	Ultraschall	Ultraschallge- ber, Echoauf- zeichnung	Luftfahrt, Schiffssteue- rung,
	Ultrakurz- wellen	Radargerät	Flugsicherung, Blindflug,
	Luftdruck- messung	Aneroidbaro- meter	Schiffsnaviga- tion, Flughöhe

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
1.5 Flüssig- keits- höhe		Überlauf, Schwimmer	Kesselanlagen, Autoklaven, Flüssigkeitsbe- hälter
	Druckmessung	Manometer zur Bestimmung der Druckhöhe Quecksilber- kontakt	Behälter, Kessel
	Lichtschwan- kungen	Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	Chemische Indu- strie
	Kapazitäts- änderung	Kondensator (Zylinderkon- densator)	Hochdruckanlagen, stetige Flüssig- keitsstandrege- lung
	Widerstands- änderung	Widerstands- draht (und Quecksilber)	
	Absorption von $\gamma$ - Strahlen		Hochdruckanlagen
2. Zeit	Speicher	Uhren, Impuls- geber, langsame chemische Vor- gänge	Zeitplanregelung, Steuerungstech- nik, Sprengungen
3. Geschwin- digkeit			
3.1 geradlinig	Druckunter- schied	Stauraehr, Mem- bran, Ringwaage, Blende, Düse	Strömung, Flug- geschwindigkeit, Transport von Flüssigkeiten (Durchflußrege- lung), Strang- pressen
	Lichtimpulse	Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	Papierbänder in Druck-, Falz- und Schneide- maschinen, Textilindustrie
	Schall Doppler- effekt	Mikrophon	Fluggeschwindig- keit

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
3.2 Winkel- geschwin- digkeit, Drehzahl	Widerstands- änderung	Schleifdraht	Vorschub von Maschinen, Strangpressen
		Zentrifugal- meßwerk	Drehzahlregelung in Kraftmaschi- nen, Schallplat- tenabtastung, Magnetophonbän- der, Filmvorführ- geräte, Motoren
		Differential- getriebe, Pla- netengetriebe Vergleich mit Solldrehzahl	Belastungsrege- lung
	elektrische Spannung	Gleich- oder Wechselspan- nungserzeugung, Tachometer- dynamo, Wirbel- stromtachometer	Kraftfahrzeuge, Maschinen
	Drehmoment	Wirbelstrom- prinzip, mecha- nische Schritt- schaltwerke	Massenfertigung, Textilindustrie, graphische Indu- strie, Spulen- wickelrichtungen
3.3 Frequenz	Impulse	Kondensator (Integration), Zählwerke, Lichtimpulse, Fotozelle, Stroboskop	
	elektrische Impulse		Steuerung von Zeilen- und Bild- wechselzahl in Fernsehgeräten
	Resonanz- schwingungen	Pendel, Reso- nanzkreis, Schwingquarz, Stimmgabel	HF-Sender und Empfänger, Quarzuhren, Wechselstrom- und Drehstrom- netze

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
	Vergleich mit Normalfrequenz	Phasenlampen, Stroboskop, Mikrophon, Synchron- motor	Uhren, elektri- sche Anlagen
4. Beschleunigung	Kräfte	Kraftmeßfühler	Antriebe, z.B. Raketenantrieb, Erschütterungs- messer
5. Masse	Kraft- oder Abstands- änderung, elastische Verformung	Neigungswaage, Federwaage, mechanische Verknüpfungen mit Verriegelungen	automatische Waagen, Ver- packungsindustrie
6. Kraft		Federwaage, hydraulische Untersetzer, Membran, Kolbenmano- meter	Antriebe, Werk- zeugmaschinen, Kraftmaschinen, Pressen
	elastische Formände- rung	Federkörper	
	Widerstands- änderung	Kohleldruck- körper	
	elektrische Spannungen	Piezoquarz, Turmalin- kristall, Seignettesalz, Widerstands- streifen	
	Kapazitäts- änderung	Meßkondensator (elastisch verformt)	
	Induktivi- tätsänderung	induktiver Geber	
	magnetische Effekte	magnetoelasti- sche Taster	
7. Drehmoment	elektrische Stromstärke	Kompensation durch Dreh- spulmeßwerk	

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
8. Druck und Druckände- rung	elastische Verformung	Federkörper und Winkelmeßfühler  Manometer, z.B. Kolbenmanometer, Wellrohr, Rohr- feder, Membran- meßwerk, Ring- waage, Quecksil- bermanometer mit Kontaktdrähten	chemische Indu- strie, Kessel- anlagen, Hütten- anlagen, Hydrierwerke, Vakuumdestil- lation, Küh- lung, Nieder- druckanlagen
	Widerstands- änderung	Quecksilber- manometer mit Widerstands- draht Manganinmano- meter	Höchstdruckan- lagen
	Piezoeffekt	Quarzkristall Bariumtitanat	Kraftmaschinen (schnelle Druck- änderungen)
	Gasentladung Wärmeleit- fähigkeit	Meßelektroden Widerstands- draht	Vakuumtechnik
9. Durchfluß	Druckunter- schiede	Meßblende, Ringwaage, U-Rohr, Rota- messer	chemische Indu- strie, Farben, Lacke, Kunst- stoffe, Kühl- wasser für Röntgenanlagen und Sender
	Widerstands- änderung	Widerstands- draht, dessen Temperatur (Kühlung) vom Durchfluß abhängt	
10. Menge	Lichtimpulse	Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	Massengüter, keramische Industrie, Ver- packungsindustrie
	Impfen mit künstlich ra- dioaktiven Isotopen	Zählrohr	chemische Indu- strie, Ölleitungen



Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
11. Dichte	Potential- differenz	Flügelrad, Gasuhr, Ovalradzähler, Ringkolben- zähler	chemische Industrie
12. Konzentra- tion und Zusammen- setzung		Aräometer, Eintauchtiefe von Schwimmern	chemische Industrie
12.1 Wasser- stoffionen- konzentra- tion, pH-Wert		Normalelektro- den, Glaselek- troden, Anti- monoelektroden (Brückenschal- tungen, Kompen- satoren)	chemische Indu- strie, Nahrungs- mittelindustrie, Färbereien, Gärungschemie, Zuckerfabrika- tion, Lack- und Farbenfabriken
12.2 Konzentra- tion von schwach und stark dissoziier- ten Elektro- lyten		Leitfähigkeits- elektroden für Wechselstrom (Brückenschal- tung)	
12.3 Lösungen (Zusammen- setzungen)		Senkwaagen, Manometer, Ringwaagen	
12.4 Zusammen- setzung, Gehalt an bestimmten Beimengun- gen		Brechungs- index  Farbänderung durch Zusatz von Indika- toren, z.B. Cl <sub>2</sub> -Gehalt durch Zusatz von Orthoto- ludin, Farb- reaktion	Refraktometer mit Fotozelle  Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
12.5 Gaszusammensetzung	Kolorimetrie	Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	schwere Elemente, chemische Industrie
	Zähigkeits- änderung	Kapillar- und Couette-Vis- kosimeter	
	Zusatz radio- aktiver Iso- tope	Zählrohr, Ionisations- kammer	
	Absorption von Röntgen- strahlen	Zählrohr	
	Reaktions- wärme	Temperatur- meßfühler	
	Änderung der Wärmeleit- fähigkeit	Widerstands- draht (Brücken- schaltung)	
	Paramagneti- sche Effekte, verbunden mit Strömungs- und Druckän- derung	Widerstands- draht (Brückenschal- tung)	
12.6 Organische Flüssigkei- ten und Dämpfe	Reaktionswärme		Kesselanlagen, Gasgeneratoren, chemische Groß- industrie, Sauerstoffbe- stimmung
	Ultrarotab- sorption	Thermoelement, Bolometer (Uras)	
	Gaschromato- graphie	Wärmeleit- zelle	
13. Luftfeuch- tigkeit	Flammenfär- bung	Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	chemische Indu- strie (leicht anregbare Ele- mente)
	Temperatur- differenz	Psychrometer, Kontaktther- mometer	Textilindustrie, graphische In- dustrie, Labo- ratorien, Tabak- industrie, Kühl- häuser, Trock- nung
	Längenände- rung	Haarhygrometer	
	Leitfähigkeits- änderung	Meßelektro- den	

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
14. Wassergehalt	Dielektrizitätskonstante  Dampfdruck  Leitfähigkeit Lithiumchlorid  Siedepunktänderung  Gewichtsänderung, automatische Wägung  Zusatz von Indikatoren (Farbreaktionen durch $H_2O$ )	Meßkondensator  Druckmeßfühler  Widerstandsmesser    Temperaturfühler    Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	keramische Industrie, Holzindustrie, Papierfabriken, Textilien, Nahrungsmittel, Filme
15. Zähigkeit	Kraft- oder Abstandsänderung	Zylinderviskosimeter (Couette-viskosimeter), Kapillarviskosimeter	chemische Industrie, Textilindustrie, Spinnlösungen, Druckfarben
16. Tonhöhe und Schallintensität		Mikrophon, Vergleich mit Normalfrequenz	automatische Stimmung von Musikinstrumenten, automatische Regelung der Füllung von Kugelmühlen
17. Wärmemenge	Temperaturänderung	Durchflußkalorimeter	Überwachung chemischer Prozesse, z.B. Polymerisation, Heizungsanlagen
18. Temperatur		Thermoelement niederohmige, z.B. magnetische Verstärker, Spiegelgalvanometer,	chemische Industrie, Metallurgie und Keramik, Textilindustrie, Kunststoff- und Gummiindustrie,



Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
		<p>Elektronenröhren in Verbindung mit Batterien, Glühstrecken und Normalelementen (hochohmig)</p> <p>Kompensatoren, Brückenschaltungen mit niederohmigen Zweigen, Strom- und Spannungsrelais, Kugelfunkstrecken</p> <p>Kathodenfallableiter</p> <p>Hörnerblitzableiter</p> <p>Elektromagnet in Verbindung mit Kohledruckreglern</p> <p>Maschinenregler, Tirrillregler, Leonardsätze, Compoundierung durch Zusatzwicklung</p> <p>Regelung durch Selbstausgleich, Glühstrecken, Eisen-Wasserstoffwiderstände, Sättigungsstrom, Ferroresonanztransformatoren, Varistoren</p>	<p>elektrische Kraftanlagen, Kraftwerke, geregelte Netze</p> <p>Laboratorien</p>
20. Verstärkungsgrad		Regelröhren mit Exponentialkennlinien	Rundfunkgeräte, Fernsehempfänger, Fernsprechanlagen

Zu regelnde oder zu steuernde Größe	Überführung in bzw. Messung durch	Meßfühler	Verwendung
21. Automati- sche Ein- stellung von Rund- funkempfän- gern		spezielle Gleich- richter- schaltungen	Rundfunk- geräte
22. Lichtstrom		Fotozelle, Fotoelement, Fotowiderstand	graphische Industrie Fotografie (hier meist Abschaltung nach genügender Belichtung), Spektralanalyse

### **Wiederholungsfragen:**

1. Warum enthält jeder Regelkreis ein Meßglied?
2. Gibt es Steuerketten mit Meßgliedern?
3. Welche Besonderheiten hat ein Reglermeßglied?
4. Wie kann man folgende Größen meßtechnisch erfassen und übertragen:
  - a) Länge
  - b) Druck
  - c) Durchfluß
  - d) Temperatur
  - e) Gaszusammensetzung
  - f) Spannung?

### 3. Meßumformer

Unmittelbar zum Meßfühler des Regelkreises oder der Steuerkette gehört ein Meßumformer, der die gemessene Größe in eine weitergebbare Größe umformt. Meßfühler und Meßumformer bilden das Meßglied.

Nun ist eigentlich ein jeder Meßfühler auch Meßumformer (Thermoelement formt Temperatur in Spannung um, Manometer formt Druck in Winkelausschlag um usw.).

(Siehe auch: Übersicht über die Meßfühler, Spalte: Überführung in bzw. Messung durch).

Es herrscht, weil die Worte Meßumformer, Meßgrößenumformer, Meßwertumformer, Meßwandler, Meßgrößenwandler, Meßwertwandler, Meßumsetzer, Transmitter noch nicht einheitlich gebraucht werden, ein gewisses begriffliches Durcheinander. Folgende Begriffsfestlegungen scheinen sich aber durchzusetzen:

Die Begriffe Umformer, Umsetzer, Wandler sind gleichwertig. Ein Meßwertumformer ist ein Gerät mit gleicher physikalischer Größe am Ein- und Ausgang. (Beispiel: Trafo, Eingang = Spannung, Ausgang = Spannung).

Ein Meßgrößenumformer ist ein Gerät mit unterschiedlichen physikalischen Größen am Eingang- und Ausgang. (Beispiel: Induktiver Geber, Eingang = Winkel, Ausgang = Spannung)

Ein Transmitter ist ein Umformer in Einheitsgrößen, der meist kompensierend arbeitet. (Beispiel: Gerät, welches eine Temperatur von 30...135 °C umformt in einen Druck von 0,2...1,0 at Ü).

Und schließlich bezeichnet man meist nur deutlich vom eigentlichen Meßfühler unterscheidbare Bauelemente oder Geräte als Umformer (bzw. Umsetzer oder Wandler). In diesem Sinne wäre also ein Thermoelement kein Meßgrößenumformer, wohl aber ein an einem Manometer angebauter Widerstandsfernegeber.

Nach der Wirkungsweise der Bauelemente unterscheidet man:



**kontaktelektrische Umformer,**  
**photoelektrische oder strahlungselektrische Umformer,**  
**induktive Umformer,**  
**magnetische Umformer,**  
**kapazitive Umformer,**  
**Umformer nach dem Dehnungsmeßprinzip,**  
**piezoelektrische Umformer,**  
**radioaktive Umformer,**  
**pneumatische Umformer, die einen Weg oder eine Kraft in**  
**einen Druck umformen,**  
**hydraulische Umformer, die einen Weg in einen Durchfluß**  
**umsetzen.**

**Nach der F o r m des Ausganges unterscheidet man:**

**Analog - Analog - Umformer,**

**Analog - Digital - Umformer (Verschlüsseler),**

**Digital - Analog - Umformer (Zuordner).**

**Analog - Analog - Umformer verwandeln beliebige stetig vorliegende Meßgrößen in analoge (stetig entsprechende) elektrische oder auch andere stetige Signale. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß sie kontinuierlich messen und theoretisch unendlich viele Meßwerte umwandeln können.**

**Das Kennzeichen von Analog - Digital - Umformern ist es, daß sie stetig anfallende Meßwerte quantisiert erfassen. Die Meßgröße wird nicht durch unendlich viele Werte dargestellt, sondern erhält je nach Aufgabenstellung eine begrenzte Anzahl diskreter Werte (Zahlen) zugeordnet. Durch Unterteilung (Quantisierung) dieser diskreten Werte kann eine beliebige Genauigkeit erreicht werden.**

**Digital - Analog - Umsetzer schließlich ordnen diskret vorliegenden Werten (z.B. von Lochkarte, Lochband oder von einem Digitalrechner) elektrische oder auch andere stetige Signale zu.**

**Für manche Aufgaben bringt die Digitaltechnik erhebliche Vorteile. Das trifft vor allen Dingen für Rationalisierungsaufgaben und sonstige ins rein wirtschaftliche hinüberspie-**

lende Probleme zu. Meßwerte, die früher mehrmals täglich abgelesen und in umfangreiche Listen eingetragen, Diagramme von Registriergeräten, die mühsam ausgewertet und integriert werden mußten, können heute, wenn man sie digital, d.h. in Ziffernform umsetzt, selbsttätig erfaßt und von Rechenautomaten verarbeitet und ausgedruckt werden. Diese Rechenautomaten können außerdem Regelbefehle aus empfangenen Meßwerten ableiten. Solche digitalen Regelungen sind vielseitiger und für umfangreiche Aufgaben auch billiger als analoge Regelungen. Die digitale Meß- und Regelungstechnik wird sich in den nächsten Jahren noch stürmisch entwickeln. So sind im Institut für Regelungstechnik in Berlin sogenannte Betriebskontrollanlagen entwickelt worden, welche zyklisch 100 Meßstellen (BKA 100) (auch mehr oder weniger) abfragen, die analog anfallenden Meßwerte digital umsetzen, als Zahlen ausdrucken und bei Über- bzw. Unterschreitung von Grenzwerten Signale auslösen.

In der vorliegenden Übersicht soll der Begriff "Transmitter" noch etwas erläutert werden, weil Transmitter als Umformer in Einheitsgrößen zu den modernen Einheitsregelsystemen (Baukastensystemen) gehören. Die normierten Übertragungsgrößen können sowohl auf Anzeiger und Schreiber, als auch auf Regler und kleine Analogrechner (z.B. Radizierer) gegeben werden. Alle diese nachgeschalteten Geräte sind Einheitsgeräte. Das verbilligt Herstellung, Projektierung, Anschaffung, Ersatzgerätehaltung, gibt den Reglerwarten ein einheitliches Bild, erhöht die Übersicht und Kombinierbarkeit.

Somit ist die Transmittertechnik aus der modernen Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik nicht wegzudenken. Man unterscheidet wegabgreifende, wegkompensierende und kraftkompensierende Transmitter. Die Kompensation der Meßgröße hat den großen Vorteil der leistungslosen Messung, was in den meisten Fällen zu größerer Genauigkeit führt.

### Wegabgreifende Transmitter:

Der Ausschlag des Meßgliedes verstellt einen Geber (Potentialometer, induktiver Geber, Düse-Prallplatte-System usw.) der so ausgelegt ist, daß sein Ausgang sich in einem Einheitsgrößenbereich bewegt.

Vorteil dieser Methode: Sehr einfach.

Nachteil dieser Methode: Proportionalität zwischen Eingang und Ausgang schwer zu erreichen.  
Störeinflüsse (Speisespannungsschwankungen, Vordruckschwankungen, Widerstandsänderungen) wirken sich voll auf den Geber aus.

### Wegkompensierende Transmitter:

Der Weg des Meßgliedes betätigt einen empfindlichen Energieschalter (z.B. Düse-Prallplatte, Blende-Fotozelle), dieser steuert die Einheitsgröße, welche aber ihrerseits einen Weg steuert, der dem Weg des Meßgliedes in seiner Wirkung auf den Energieschalter entgegenwirkt.

Das Ganze ist eine Gegenkopplung des Ausganges (Einheitsgröße) auf den Eingang (Weg des Meßwerkes), also eine Regelung.

Kompensierende Meßgeräte enthalten einen Regelkreis, der die Steuerung Eingangsmeßgröße - Ausgangsweitergabegröße störungsfähig macht.

Bild 4 zeigt einen wegkompensierenden Transmitter, der eine Temperatur (etwa von 200 bis 285 °C) umsetzt in Einheitsdruck (0,2 bis 1,0 at Ü).

Der Temperatur von 200 °C entspricht ein Druck von 0,2 at Ü, der Temperatur von 285 °C ein solcher von 1,0 at Ü.

Wirkungsweise: Die über die Vordrossel eingespeiste Hilfs-luft kann je nach der Stellung der Prallplatte mehr oder weniger über die Düse abblasen, und so baut sich ein mehr oder weniger großer Druck  $p_a$  auf. Steigt die Temperatur am Fühler, so steigt der Dampfdruck der verwendeten Meßflüssigkeit, die Röhrenfeder biegt sich auf und über die Hebel will die Prallplatte die Ausströmdüse schließen. Indem aber damit der Ausgangsdruck  $p_a$  ansteigt, wird die Membran M entgegen der Federkraft nach unten bewegt. Dieser Weg kompensiert den Aufbiegungsweg der Röhrenfeder in seiner Wirkung auf das Düse-Prallplatte-System. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, demzufolge der Ausgangsdruck  $p_a$  von der Temperatur  $\vartheta$  abhängig ist.

#### Vorteile der Wegkompensation:

Rückkopplung, Regelung, Störeinflüsse sind weitgehend ausgeschaltet.

(Sinkt z.B. in Bild 4 der Vordruck etwas ab, so wird mit sinkendem  $p_a$  die Membrane M durch die Feder etwas nach oben gedrückt. Damit geht die Prallplatte etwas näher an die Düse und wirkt so dem Absinken von  $p_a$  entgegen. Schwankender Vordruck hat also kaum einen Einfluß auf  $p_a$ .)

#### Nachteile der Wegkompensation:

Da die Ausgangseinheitsgröße über ein elastisches Glied (Feder) einen rückkoppelnden Weg zur Folge hat, wirken sich die Eigenschaften (z.B. Hysterese) dieses elastischen Gliedes natürlich aus.

Weiterhin tritt in den Lagern, die für die Bewegungen notwendig sind, Reibung auf.

### Kraftkompensierende Transmitter:

Die Kraft des Meßwerkes betätigt einen empfindlichen Energieschalter (z.B. Düse-Prallplatte, induktiver Abgriff mit Verstärker), dieser steuert die Einheitsgröße, welche aber ihrerseits eine Kraft zur Folge hat, die der Kraft des Meßwerkes entgegenwirkt. Es stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein.

Damit wird, wenn die Meßwerkskraft der Meßgröße proportional und die Gegenkopplungskraft der Einheitsgröße proportional sind, die Einheitsgröße der Meßgröße proportional.

Bild 5 zeigt das Prinzip der sogenannten Stromwaage. An einem Hebel greifen zwei Kräfte an, die Meßkraft (im Bild von einem Differenzdruckmeßwerk herrührend) und die entgegengesetzt gerichtete Kraft, mit der eine einen Elektromagneten darstellende stromdurchflossene Spule aus dem Magnetfeld eines starken Dauermagneten herausgestoßen wird. Ein induktiver Abgriff steuert über einen Verstärker hoher Verstärkung den Ausgangsleichstrom.

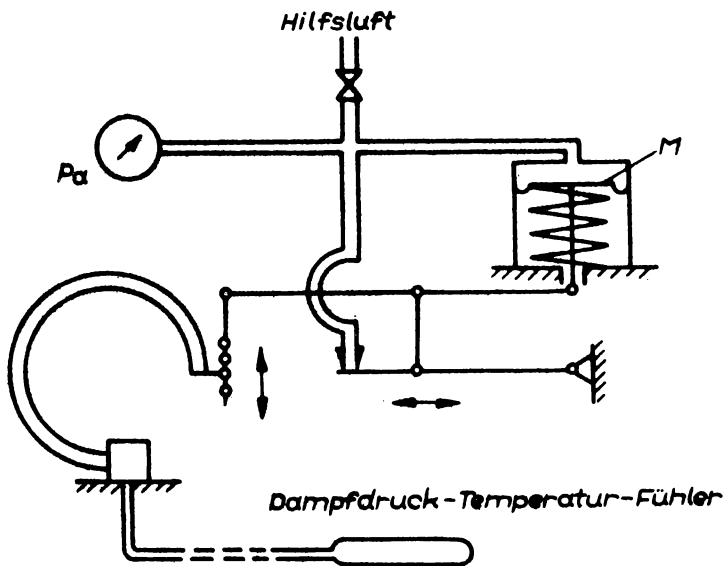


Bild 4

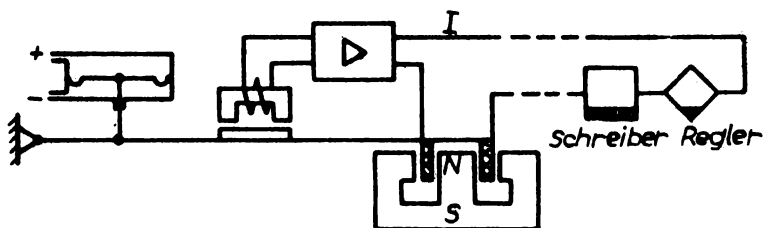


Bild 5

Wächst der Differenzdruck, so will der Hebel nach unten schwenken. Damit vergrößert sich aber der Luftspalt des induktiven Abgriffes. Die dadurch hervorgerufene Änderung der Induktivität würde über eine entsprechende Verstärkerschaltung ein sehr starkes Ansteigen des Gleichstromes  $I$  bewirken. Indem der steigende Strom aber sofort eine Kraft an der Tauchspule zur Folge hat, die der weiteren Vergrößerung des Luftspaltes entgegenwirkt, kommt es gar nicht zu einem sehr starken Ansteigen des Stromes, sondern der Strom steigt nur so weit, bis die von ihm hervorgerufene Kraft der Kraft des Differenzdruckmeßwerkes das Gleichgewicht hält. Die Tauchspule ist nun so ausgelegt, daß ein Gleichstrom von 0 bis 20 mA angesteuert wird. Der zu einer bestimmten Eingangskraft gehörende Strom ist unabhängig von der Größe der Widerstände im Ausgangsstromkreis. Es brauchen deshalb dort keine Justierungen vorgenommen zu werden. Erhöht sich etwa der Widerstand der Leitungen durch erhöhte Temperatur, so könnte man zunächst an ein Absinken des Stromes glauben. Damit tritt aber die Regelung: "Strom zu niedrig - Kompensationskraft zu niedrig - Luftspalt wird größer - Strom wird größer" in Aktion und der Strom sinkt eben nicht ab. Man spricht von "eingepprägtem" Gleichstrom. (Entsprechend könnte man bei pneumatischen Transmittern von eingepprägtem Druck sprechen!). Der Strom ist dem Eingangsdifferenzdruck streng proportional. Der Meßbereich (ob Drücke von 0...100 mmWS oder 0...200 mmWS usw. in Gleichströme von 0...20 mA umgesetzt werden) läßt sich durch Verschieben des Eingangsmeßsystems längs des Hebelarmes verändern.

#### Vorteile der Kraftkompensation:

Genau, strenge Proportionalität, betriebssicher, sehr kleine Wege (kleiner als 0,1 mm) zur Betätigung der Energieschalter machen die konstruktive Ausführung meist einfacher als bei der Wegkompensation, statt Lager biegeelastische Befestigung möglich (der sehr kleinen Wege wegen), keine Reibung.

**Nachteile der Kraftkompensation: keine**

Deshalb werden Transmitter fast durchweg kraftkompensierend gebaut.

**Wiederholungsfragen:**

1. Was ist a) ein Meßwertumformer  
b) ein Meßgrößenumformer  
c) ein Transmitter?
2. Welche Aufgabe haben Meßumformer?
3. Welche Wirkungsweisen von Meßumformern gibt es?
4. Was ist ein Digital-Analog-Umformer?
5. Welche Vorteile bringt der Einsatz von Transmittern?
6. Was ist Wegkompensation? Vorteile-Nachteile
7. Was ist Kraftkompensation? Vorteile-Nachteile
8. Beschreiben Sie die in Bild 4 und Bild 5 skizzierten Geräte.



#### **4. Sollwertgeber**

Vom Meßglied (Meßfühler und Umformer) wird eine dem Istwert der Regelgröße proportionale Größe weitergegeben. Diese Größe muß mit einer den Sollwert darstellenden Größe (dem Sollwert proportionalen Größe) verglichen werden. Es muß die Differenz Istwert  $x$  minus Sollwert  $x_K$  gleich Regelabweichung  $x_w$  gebildet werden. Dem Gerät oder Geräteteil, welches diese Differenzbildung bewerkstelligt, muß also außer der dem Istwert proportionalen Größe eine dem Sollwert proportionale Größe zugeführt werden. Wie diese dem Sollwert proportionale Größe gerätemäßig erzeugt wird, soll im Folgenden kurz dargelegt werden.

Zunächst gibt es für die Beeinflussung des Sollwertes in Abhängigkeit von der Zeit verschiedene Möglichkeiten:

1. Sollwert fest, zwar einstellbar, aber nach der durch den Menschen am Sollwerteinsteller vorgenommenen Einstellung konstant.

Man spricht von Festwertregelung und -steuerung.

Es muß also Geräte oder Geräteteile geben, die eine den Sollwert darstellende, einstellbare, konstante Größe abgeben.

2. Sollwert nach einem "stur" ablaufenden Zeitplan veränderlich.

Man spricht von Zeitplanregelung und -steuerung.

(Regelung oder Steuerung, je nachdem wie man den Vorgang betrachtet).

Es muß also Geräte oder Geräteteile geben, die eine sich mit der Zeit ändernde, den Sollwert darstellende Größe abgeben (z.B. Zeitplanscheiben). Die Art und Weise der zeitlichen Änderung muß wählbar sein.

3. Sollwert derart veränderlich, daß eine neue Änderung erst dann eintritt, wenn der mit der vorherigen Änderung des Sollwertes verbundene Befehl ausgeführt wurde. (Die Sollwertänderungen laufen hier wie ein Programm ab: Eine Darstellung beginnt erst dann, wenn die vorherige beendet ist.)

Man spricht von Programmregelung und -steuerung.

Es muß also Geräte oder Geräteteile geben, die sich ändernde Befehlsgrößen abgeben, wobei ein neuer Befehl erst nach gemeldeter Ausführung des vorhergehenden gegeben wird.

4. Sollwert wird von einem anderen Vorgang diktiert. Der Sollwert folgt dem Wert einer veränderlichen Größe, der Führungsgröße W, die den Wert des Sollwertes bestimmt, selbst aber von der Regelung nicht beeinflusst wird.

Man spricht von Folgeregelung und -steuerung.

Beispiele: Der Luftdurchfluß zu einem technischen Ofen wird so geregelt, daß sein Sollwert dem irgendwie anders beeinflussten Gasdurchsatz in einem bestimmten Verhältnis folgt.

Ist das Folgen ein mechanisches Nachlaufen, spricht man auch von Nachlaufregelung und -steuerung.

Beispiel: Bei Kompensationsschreibern läuft die Zeigerstellung der Meßgröße als Führungsgröße nach.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, daß im jetzigen Normblatt "Regelungstechnik" nur von Festwert-, Zeitplan- und Folgeregelung gesprochen wird. Man sollte deshalb die Begriffe Nachlaufregelung und -steuerung nur gebrauchen, wenn das mechanische Folgen betont werden soll und man sollte von Programmregelung und -steuerung nur reden, wenn der genannte Unterschied zur Zeitplanregelung und -steuerung betont werden soll.

Nun übersichtsmäßig einige Möglichkeiten für die gerätemäßige "Erzeugung" des Sollwertes.

Zur Signalübertragung im Regelkreis oder in der Steuerkette werden vorzugsweise verwendet:

- a) Wege von Hebeln und Gestängen (auch als Drehwinkel von Wellen),
- b) Kräfte auf Hebel und Gestänge,
- c) Drücke von Luft oder Flüssigkeiten,
- d) elektrische Spannungen,
- e) elektrische Ströme.

Also werden zur Darstellung des Sollwertes fest eingestellt oder (meist mechanisch) selbsttätig veränderlich gemacht:

a) Wege:

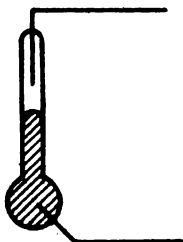


Bild 6

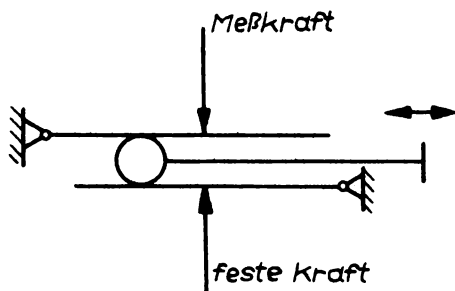


Bild 7

1. Bei Zweipunktreglern (nicht getastet oder getastet) wird der Kontakt an die Stelle gerückt, wo das Meßwerk den Sollwert anzeigt.  
So kann beim Kontaktthermometer (Bild 6) der obere Kontakt verschoben werden.
2. Durch Verschiebung eines Stiftes zwischen zwei Hebeln (Bild 7), an denen die Meßkraft und eine feste Kraft (Feder) angreifen, wird eingestellt, mit welcher Sollkraft die Meßkraft verglichen wird.  
Die bei Abweichungen erfolgende Bewegung des Doppelhebels muß zur Auslösung eines Stellbefehls ausgenutzt werden (z.B. Strahlrohr, Düse-Prallplatte als Abgriffssysteme).
3. Zeitplanscheiben, Schablonen
4. Nockenwellen, Schaltwalzen, Zeitschalter (unstetige Sollwertvorgabe)
5. optisch abgetastete Zeichnungen  
usw.

b) Kräfte:

1. Vorspannung einer langen (Hookesches Gesetz!) Feder.
2. Mittels Kurvenscheibe zeitabhängig veränderliche Federkraft.
- usw.

c) Drücke:

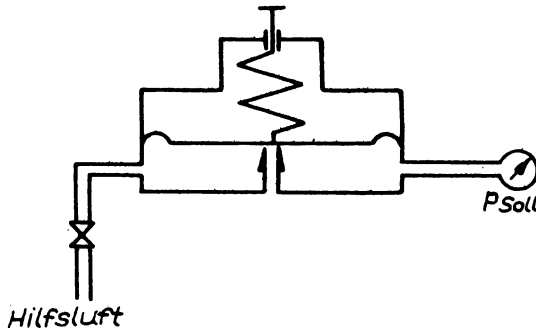


Bild 8

1. Einstellung eines den Sollwert darstellenden Druckes (Bild 8) bei pneumatischen Reglern.
2. Mittels Kurvenscheibe und Düse-Prallplatte-System zeitabhängig veränderlicher Druck.

d) Spannungen:

1. Spannungsabgriff an schwach belasteten Batterien.
2. Elektronisch stabilisierte Spannung
3. Einstellung eines Widerstandes, über dem eine entsprechende Spannung abfällt, Brückenschaltungen
4. Lochkarten, die digital verschlüsselte Sollwertbefehle geben

- 5. Schaltwalzen
- 6. Magnetbänder

e) Ströme:

- 1. Einstellung von Strömen an stromstabilisierenden Geräten.

Wiederholungsfragen:

- 1. Welche Aufgabe hat der Sollwertgeber im Regelkreis?
- 2. Was ist a) eine Festwertregelung  
b) eine Zeitplanregelung  
c) eine Folgeregelung?
- 3. Welche Größen werden zur Signalübertragung im Regelkreis und in der Steuerkette vorzugsweise verwendet?
- 4. Wie wirkt der im Bild 8 skizzierte Druckeinsteller?  
Dieser Druckeinsteller ist für sich bereits ein vollständiger Regelkreis. Machen Sie sich das klar. (Blockschaltbild!)

Aufgaben:

- 1. Bezeichnen Sie die im Bild 7 vorkommenden Abstände und stellen Sie die Beziehung zwischen Meßkraft, fester Kraft und Stiftstellung auf. Diskutieren Sie diese Beziehung.
- 2. Wie ist beim Druckeinsteller von Bild 8 der Druck von der Federkraft und der Membranfläche abhängig?

## 5. Differenzglieder (Vergleicher, Mischgeräte)

Die vom Meßwerk gemeldete, dem Istwert der Regelgröße  $X$  proportionale Größe muß mit der vom Sollwertgeber befohlenen, dem Sollwert  $X_K$  proportionalen Größe verglichen werden. Es wird dann eine Größe weitergegeben, die vom festgestellten Unterschied abhängt.

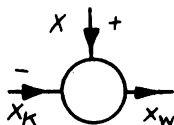


Bild 9

Vereinfacht symbolisch gesagt: Es wird gebildet

Istwert minus Sollwert = Regelabweichung

$$\dot{X} - X_K = x_w$$

Diese symbolische Darstellung kann benutzt werden, um sich die prinzipielle Wirkungsweise von Regelkreisen klar zumachen.

Beim realen Differenzglied hat man es meist nicht mit  $X$ ,  $X_K$  und  $x_w$  zu tun, sondern mit anderen Größen, die von  $X$ ,  $X_K$  und  $x_w$  in bekannter Weise abhängen.

Beispiel: Temperaturregelung: Ein Thermoelement gibt eine der Temperatur proportionale Spannung auf ein Drehspulmeßwerk, welches entgegen einer Federrückstellkraft ausschlägt. Die Zeigerstellung wird schrittweise durch ein Stufenblech abgetastet. Steht der Zeiger in der Sollstellung, so geschieht nichts, steht er etwas zu niedrig, so wird ein Motor kurz eingeschaltet, um die Heizleistung etwas zu erhöhen, steht er sehr zu niedrig, so wird der Motor länger eingeschaltet usw., steht er zu hoch, so läuft der Motor in der anderen Drehrichtung. Die Differenzbildung geschieht hier über Wege. Die Ist-Temperatur erscheint als Zeigerausschlag, die Solltemperatur ist als Kontaktstellung gegeben und die Regelabweichung wird als Wegunterschied erfaßt. Das Blockschaltbild des Differenzgliedes muß also wie in Bild 10 dargestellt aussehen. Nicht Temperaturen, sondern den Temperaturen proportionale Wege werden verglichen. Da  $X$ ,  $X_K$  und  $x_w$  die Dimension  $\text{grd}$  haben, hat der Proportionalitätsfaktor  $m$  die

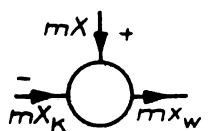


Bild 10

Dimension Länge<sub>grd</sub>. Hier ist das Differenzglied "dimensionsrein". Es werden Größen gleicher Dimension verglichen. Das ist bei jeder Differenzbildung so. Die wichtigsten Differenzglieder vergleichen entsprechend den bevorzugten Übertragungssignalen:

- a) Istwege (Meßwege) mit Sollwegen  
(Istwinkelstellungen mit Sollwinkelstellungen)

- b) Istkräfte (Meßkräfte) mit Sollkräften

- c) Istdrücke (Meßdrücke) mit Solldrücken

- d) Istspannungen (Meßspannungen) mit Sollspannungen

- e) Istströme (Meßströme) mit Sollströmen

Stimmen die verglichenen Größen nicht überein, so löst das Differenzglied eine Aktion des übrigen Reglers aus.

Nun stellt aber Bild 10 nur den "Kern" der Differenzbildung dar. Man kann ja auch, etwas weiter vom "Kern" weggehend, die Sache so betrachten:

Dem Differenzglied fließen folgende Signale zu:

Istwert als Spannung, Sollwert als Wegeinstellung. Es gibt ein Differenzsignal ab: Regelabweichung als Einschaltzeit des Verstellmotors. Bei dieser Betrachtungsweise ist einiges zusammengefaßt:

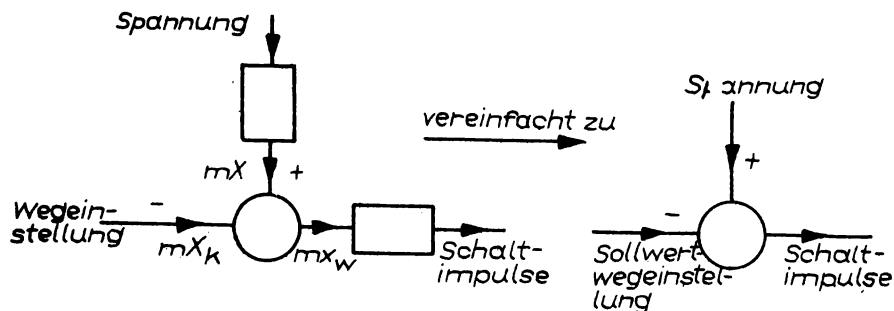


Bild 11

Der Kreis als Symbol für das Differenzglied ist hier "nicht dimensionsrein". Er selbst beinhaltet die Dimensionsumwandlung.

Das ist für das Zeichnen von Blockschaltbildern praktisch günstig. Der Kreis soll deshalb im Folgenden in diesem Sinne aufgefaßt werden.

#### a) Vergleich von Wegen

1. Bei allen Meßwerken mit Ausschlag kann an der Stelle des Sollausschlages ein unstetiger Schalter oder auch eine stetige Abgriffseinrichtung angebracht werden.

Die Sollwerteinstellung erfolgt durch eine Wegeinstellung, der Istwert erscheint ebenfalls als Weg.

Die Auslösung des Regelbefehls kann erfolgen:

- 1.1 durch Abtastung der Zeigerstellung, wenn das Meßwerk nur sehr geringe Kräfte aufbringt (Fallbügelregler).
- 1.2 durch das Meßwerk selbst, wenn es genügend Kräfte aufbringt (Kontaktmanometer, Kontaktthermometer, Bimetallrelais)

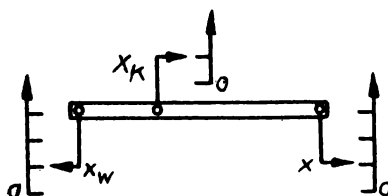


Bild 12

#### 2. Wegvergleich am Hebel

Der Weg  $x_w$  wird mit größer werdendem  $x$  kleiner, mit größer werdendem  $x_K$  größer. Das ist eine Differenzbildung.

(Anwendung: Schwimmerregler)



## b) Vergleich von Kräften

1. Die Meßkraft wirkt gegen eine durch Federvorspannung einstellbare Sollkraft. Stimmen beide Kräfte nicht überein, so wird ein den Regelbefehl auslösender Abgriff betätigt.

1.1 Düse-Prallplatte

1.2 Strahlrohr

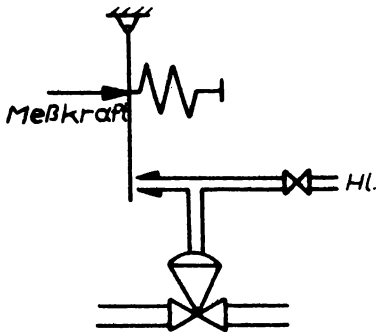


Bild 13

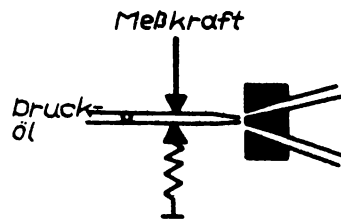


Bild 14

## c) Vergleich von Drücken

Der Vergleich von Drücken geschieht durchweg über die Kräfte, welche von den Drücken auf Membranen oder andere Druckmeßwerke ausgeübt werden.

1. Das auf den Hebel ausgeübte Drehmoment ist ein Maß für den Unterschied von  $p_1$  und  $p_2$ .

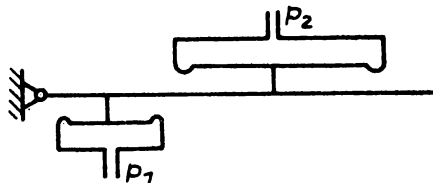


Bild 15

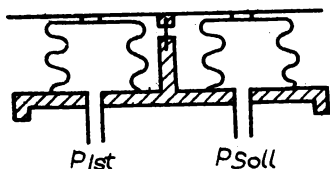


Bild 16

eine Wippenverstellung auslösen.

d) Vergleich von Spannungen

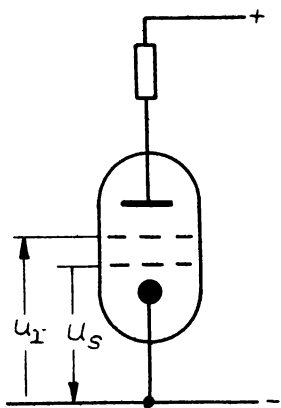


Bild 17

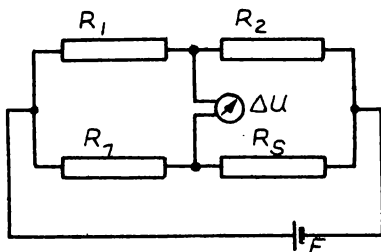


Bild 18

1. Bei einer Mehrgitterröhre läßt sich der Anodenstrom von den Gittervorspannungen beeinflussen. Die Abweichung des Anodenstromes von einem Mittelwert ist von der Differenz der beiden Gittervorspannungen abhängig.

2. Bild 18:  $R_1$ ,  $R_2$  Festwiderstände,  $R_1$  Istwertgeber-Widerstand,  $R_S$  Sollwerteinstell-Widerstand, Span-

nungsmesser mit sehr hohem Innenwiderstand.

Die Diagonalspannung  $\Delta U$  ist u.a. von den Widerständen  $R_I$  und  $R_S$  abhängig.

$$\Delta U = \frac{R_I R_S - R_1 R_2}{(R_I + R_2) \cdot (R_S + R_1)} E$$

Das ist eine mittels der Wheatstoneschen Brücke bewerkstelligte Differenzbildung. Es ist

$\Delta U$  positiv, wenn  $R_I$  größer als  $\frac{R_1 R_2}{R_S}$

$\Delta U$  negativ, wenn  $R_I$  kleiner als  $\frac{R_1 R_2}{R_S}$

Sie sehen, daß am Differenzglied keineswegs immer eine einfache Differenz  $X - X_K$  gebildet wird. Der Vergleich von Ist- und Sollwert geht häufig über nichtlineare Beziehungen. Das bereitet dem Konstrukteur Sorgen!

3. Die Schaltung nach Bild 19 kann den Eingang eines Röhrenverstärkers bilden. Was dann verstärkt und zur Bildung des Stellbefehls benutzt wird, ist die Differenzspannung  $u_w$ .

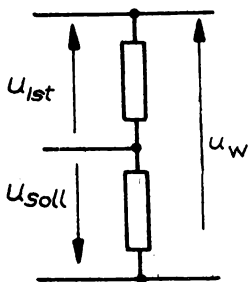


Bild 19

### e) Vergleich von Strömen

1. Relais (polarisiertes) mit zwei Wicklungen, eine Wicklung Iststrom, andere Wicklung Sollstrom, Magnetflüsse beider Ströme einander entgegengesetzt. Verglichen werden die Magnetflüsse. Relaiskontakt steht in der Mitte, wenn Istfluß gleich Sollfluß. Bei Abweichungen fällt der Kontakt nach rechts bzw. nach links und löst Regelbefehl aus.
2. Magnetverstärker mit zwei Gleichstromsteuerwicklungen

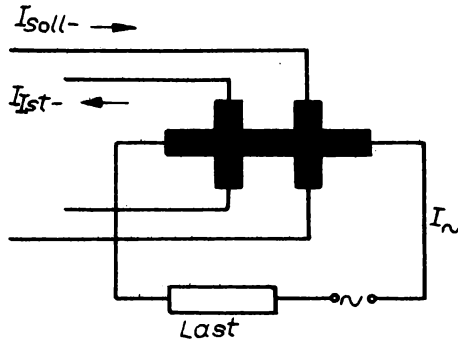


Bild 2o

Der Wechselstromwiderstand einer Spule mit ferromagnetischem Kern ist stark von ihrer Gleichstromvormagnetisierung abhängig. (Die Impedanz nimmt mit steigendem Vormagnetisierungsstrom stark ab.)

Der Gleichstrom  $I_{Soll}$  magnetisiert die horizontale gezeichnete Arbeitswicklung vor, der Gleichstrom  $I_{Ist}$  ebenfalls, aber in entgegengesetzter Richtung. Die wirkliche Vormagnetisierung ist von der Differenz der Amperewindungen abhängig. Diese Differenz beeinflusst die Abweichung des Arbeitswechselstromes  $I_{\sim}$  von einem Grundwert. Mit mehreren Steuerwicklungen (4-5 sind üblich) lassen sich noch andere Aufschaltungen vornehmen (Rückführung, Störgrößen, Hilfsgrößen).

3. Drehpulmeßwerk mit zwei Wicklungen, Ströme gegeneinander geschaltet, Spiralrgenfeder.. Der Ausschlag ist der Differenz der Amperewindungen proportional.

**Wiederholungsfragen:**

1. Warum findet in jedem Regelkreis eine Differenzbildung statt?
2. Wie können gerätemäßig
  - a) Wegdifferenzen
  - b) Kraftdifferenzen
  - c) Druckdifferenzen
  - d) Spannungsdifferenzen
  - e) Stromdifferenzengebildet werden?

**Aufgaben:**

1. Leiten Sie die unter 5-d-2 angegebene Beziehung für  $\Delta u$  ab.

## 6. Zeitglieder, Rechner

Vom Zeitglied wird die als elektrisches oder anderes Signal ankommende Regelabweichung  $x_w$  "verarbeitet", um einen Regelbefehl abzuleiten, welcher der Regelstrecke und der betreffenden Aufgabe angepaßt ist.

Was dabei getan wird, kann im Prinzip auch ein Mensch als Regler tun. Der Mensch würde mit den Augen die Regelgröße mittels eines anzeigenden Meßgerätes erfassen, im Gehirn mit dem Sollwert vergleichen und das "Wie?" seines Eingriffes, der über Energieverstärker und Stellantrieb (Muskeln) an das Stellglied ginge, je nach Charakter verschieden einrichten.

Menschen, die je nach Charakter verschieden eingreifen, sind mit den verschiedenen Reglertypen vergleichbar (bzw. umgekehrt!). Die folgenden Überlegungen sollen zwanglos deutlich machen, was für "Reglercharaktere" es gibt.

Als Regelungsaufgabe stellen Sie sich bitte vor, die Temperatur in einem industriellen, gasbeheizten Ofen (etwa zum Glasschmelzen) sei konstant zu halten.

Verschiedene Störungen (schwankender Gasvordruck, schwankender Heizwert des Gases, verschiedener Durchsatz des Ofens usw.) machen es notwendig, daß immer jemand auf die Temperatur "aufpaßt".

Der Mensch als Regler beobachtet also die Temperaturanzeige und betätigt, falls nötig, ein Ventil in der Gaszuführung. (Die Luftzuführung werde selbsttätig mitverstellt.)

**W I E** können verschiedene Menschen nun dieser Aufgabe gerecht werden?

1. Jemand könnte die Aufgabe zunächst recht einfach lösen. Bei  $x_w < 0$ , (d.h. Temperatur zu niedrig) reißt er das Ventil ganz auf und bei  $x_w \geq 0$  macht er es ganz zu. Seine Arbeitsweise wird ihn nie zur Ruhe kommen lassen. Die Temperatur des Ofens, die der Ventilverstellung ja verzögert

folgt, wird ständig um den Sollwert pendeln. Solches Zeitverhalten nennt man Zweipunktverhalten. Glauben Sie nicht, daß diese Art von Regelung (unstetige Regelung) schlecht sei. Wenn die Pendelung tragbar ist oder am Ende gar nicht merkbar in Erscheinung tritt, wird man gern zum billigen, einfachen, leicht verständlichen Zweipunktregler greifen. Sie kennen sicher viele solcher Regelungen. (U.a. Temperaturregelung in Kühlschränken, Bügeleisen, Heizkissen.) Setzt man alle überhaupt verwirklichten selbsttätigen technischen Regelungen (auch solche im Haushalt mitgezählt) als 100 % an, so sind gewiß über 90 % davon Zweipunktregelungen.

Nun würde der obige Bedienungsmann wahrscheinlich recht arge Temperaturschwankungen feststellen. Wenn die Gaszufuhr beim Zuhochwerden der Temperatur ganz abgestellt wird, steigt die Temperatur ja durch die Wärmeträgheit des Ofens (Wandungen, die stärker als das Füllgut, dessen Temperatur gemessen wird, erhitzt sind) zunächst noch an.

Der "Zweipunktmann" könnte aber unter Beibehaltung seines Zeitverhaltens noch eine Verbesserung erzielen, indem er die Gasleitung aufteilt.

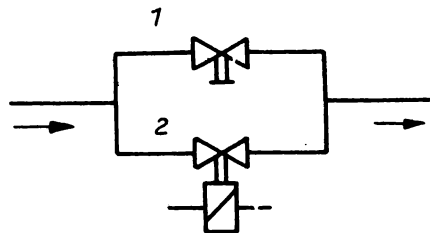


Bild 21

Ventil 1: Grundlast, wird einmal eingestellt und dann beim Regeln nicht betätigt.

Ventil 2: Regellast, wird nur ganz auf oder ganz zu betätigt (Magnetventil)

Ventil 1 so einstellen, daß bei 1 dauernd offen, 2 dauernd zu, sich eine Temperatur knapp unter dem Sollwert ergibt. Ventil 2 so wählen, daß bei 1 und 2 dauernd offen sich eine Temperatur knapp über dem Sollwert ergibt.

Der Regler mache nun nur Ventil 2 auf und zu (der sogenannte "Schaltsprung" wurde verkleinert) und die Schwankungen der Temperatur werden geringer sein. Das Ventil 2 muß natürlich mindestens soviel Gas sperren und wieder durchlassen können, daß die durch Störungen möglicherweise eintretenden Temperaturschwankungen ausgeglichen werden können. Man möchte den Schaltsprung so klein wie möglich halten (das ergibt im Normalbetrieb geringen Temperaturschwankungen), man muß aber damit rechnen, daß große Störungen dann nicht genügend bekämpft werden können.

Was tun? - Antwort:

## 2. Gaszuleitung noch weiter aufteilen!

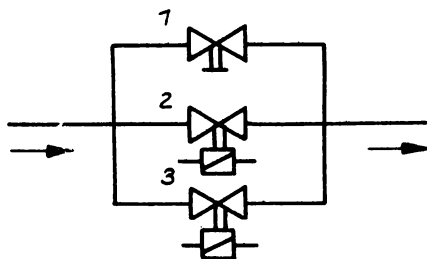


Bild 22

Das stetig verstellbare Ventil 1 werde bei geöffnetem Auf-Zu-Ventil 2 und geschlossenen Auf-Zu-Ventil 3 so eingestellt, daß sich bei normalem Ofenbetrieb gerade die Sollwerttemperatur ergibt. Was der "Dreipunktregler" zu machen hat, liegt auf der Hand:



Temperatur	Ventil 1	Ventil 2	Ventil 3
zu niedrig	Auf	Auf	Auf
normal	Auf	Auf	Zu
zu hoch	Auf	Zu	Zu

Vor allem bei elektrischen Heizungen (wo einzelne Heizwicklungen zu- oder abgeschaltet werden) sind auch Mehrpunktregelungen denkbar:

Temperatur	Grundlast	Regel- last 1	Regel- last 2	Regel- last 3	Regel- last 4
sehr zu niedrig	Ein	Ein	Ein	Ein	Ein
wenig zu niedrig	Ein	Ein	Ein	Ein	Aus
normal (Sollwert)	Ein	Ein	Ein	Aus	Aus
wenig zu hoch	Ein	Ein	Aus	Aus	Aus
sehr zu hoch	Ein	Aus	Aus	Aus	Aus

3. Die Arbeit des Reglermannes an der nun wieder unaufgeteilt gedachten Gasleitung sei mechanisiert. Der Mann brauche das

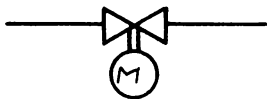


Bild 23

Ventil nicht mehr mit seiner Muskelkraft zu verstellen sondern ein von ihm durch einen Schalter betätigter Motor verändert über ein Untersetzungsgetriebe die Gaszufuhr. Das Ventil ist so gewählt, daß bei einem mittleren Öffnungsgrad gerade soviel Gas durchströmt,

um im Normalbetrieb des Ofens den Sollwert der Temperatur zu halten. Die Arbeit des Reglers sieht jetzt folgendermaßen aus:

$x_w < 0$ , d.h. Temperatur zu niedrig, Motor so einschalten (etwa auf Linkslauf), daß er das Ventil langsam mehr aufmacht.

$x_w = 0$ , d.h. Temperatur richtig, Motor ausschalten.

$x_w > 0$ , d.h. Temperatur zu hoch, Motor so<sup>o</sup> einschalten (etwa auf Rechtslauf), daß er das Ventil langsam mehr zumacht.

Bei dieser Arbeitsweise wird das Ventil nicht mehr ruckartig ganz auf und ganz zu gemacht, sondern (obwohl der Bedienungsmann den Motor unstetig an-und-aus-schaltet) stetig von einer Lage in die andere gefahren. Solche Regelungen nennt man stetig-ähnlich.

Die Temperatur des Ofens wird nicht mehr dauernd um den Sollwert pendeln. Sie wird nur wenn Störungen auftreten gedämpft auf den Sollwert einschwngen.

4. Alle folgenden Betrachtungen gehen vom Sollzustand aus. Das Ventil befinde sich in einer mittleren Stellung (Bezugsstellung), die Temperatur auf ihrem Sollwert. Verschiedene Menschen werden verschieden reagieren, wenn sie eine vom Sollwert abweichende Temperatur feststellen. Die Fälle 1...3 gaben dafür schon Beispiele. Nun weiter:

Ein Bedienungsmann habe sich aus langjährigen Erfahrungen heraus folgendes Regelschema zurechtgelegt:

Ist die Temperatur 10 grd zu hoch, drehst du von der Bezugsstellung aus gerechnet das Ventil schnell 1/2 Umdrehung zu; ist sie 5 grd zu niedrig, drehst du von der Bezugsstellung aus gerechnet schnell 1/4 Umdrehung auf, ist sie 40 grd zu hoch, drehst du (immer wieder von der Bezugsstellung aus gerechnet) schnell 2 Umdrehungen zu usw.

Er macht die Stellabweichung  $y$  von der Bezugsstellung proportional zur Regelabweichung  $x_w$ .

Mathematisch ausgedrückt ist  $y = K_R \cdot x_w$ ,

im Beispiel also  $y = \frac{1/2 \text{ Ventilumdrehung}}{10 \text{ grd}} \cdot x_w =$

$$\frac{1}{20} \frac{\text{Ventilumdrehung}}{\text{grd}} \cdot x_w$$

Man nennt proportional eingreifende Regler P-Regler.

$K_R$  ist die Verstärkung des P-Reglers. Sie gibt den Stell-eingriff pro Einheit der Regelabweichung an. Wird die Verstärkung des P-Reglers groß, so nähert sich sein Verhalten dem des Zweipunktreglers: Der P-Regelkreis "schwingt" periodisch. Das muß man vermeiden.

P-Regler greifen "schnell" ein. Das ist ihr Vorteil. Sie haben einen wesentlichen Nachteil: Genau können sie den Sollwert bei einer aufgetretenen Störung nicht wieder erreichen. Sie bedingen eine "bleibende Regelabweichung".

Das kann man sich leicht am Beispiel klarmachen.

Als Störung sei der Heizwert des Gases schlechter geworden. Der Regler muß, um dem zu begegnen, das Ventil weiter auf-machen. Angenommen, man weiß aus Erfahrung, daß  $y = + 1/4$  Umdrehung notwendig ist.  $y = + 1/4$  Umdrehung stellt der "stur" proportional arbeitende Regler aber laut  $y = 1/20$  Ventilumdrehung .  $x_w$  nur bei  $x_w = 5$  grd.

Dieser Zustand stellt sich ein. Ohne Regelung hätte die Störung eventuell einen Temperaturabfall von 30 grd zur Folge gehabt, mit Regler eben nur 5 grd. Die 5 grd stellen die bleibende Regelabweichung des P-Reglers dar.

5. Ein anderer Bedienungsmann habe sich folgendes Regelsche-ma angewöhnt:

Ist die Temperatur 10 grd zu hoch, drehst du das Ventil mit einer Geschwindigkeit von 2 Umdrehungen/min in Richtung zu, ist sie 5 grd zu niedrig, drehst du mit der halben Geschwin-digkeit in Richtung auf, ist die Temperatur 40 grd zu hoch, drehst du entsprechend mit einer Geschwindigkeit von 8 Umdrehungen/min in Richtung zu usw.

Er macht die Geschwindigkeit der Stellgröße proportional der Regelabweichung. Mathematisch ausgedrückt ist

$$\dot{y} = K_I \cdot x_w \text{ oder } y = K_I \int x_w dt$$

d.h. die Stellabweichung von einer Bezugsstellung ist dem Zeitintegral der Regelabweichung proportional.

Man nennt Regler mit diesem Zeitverhalten I-Regler.

Sie haben sicher das Gefühl, daß der I-Regler seine Aufgaben "langsam" erfüllt, daß es abklingende Schwingungen gibt und daß es nach einer aufgetretenen Störung eine ganze Weile dauert, bis das Ventil in die neue, richtige Lage gebracht ist.

Der I-Regler arbeitet aber, wenn auch langsam, so doch beharrlich so lange, bis die Regelabweichung zu Null geworden ist.

Laut  $\dot{y} = K_I \cdot x_w$  kommt das Stellglied ja nur mit  $x_w = 0$  zur Ruhe.

Vorteil des I-Reglers: Keine bleibende Regelabweichung

Nachteil des I-Reglers: Langsames Arbeiten

Das langsame Arbeiten könnte man durch Vergrößerung der Stellgeschwindigkeit schneller machen. Das führt aber an vielen Regelstrecken zu Dauerschwingungen und ~~manche~~ Regelstrecken sind mit einem I-Regler immer instabil.

6. Es liegt nahe, die Eigenschaften des P- und des I-Reglers zu kombinieren. Man erhält den PI-Regler. Seine beschreibende Gleichung lautet:

$$y = K_R x_w + K_I \int x_w dt.$$

Sein Eingriff bei Abweichungen der Regelgröße vom Sollwert ist eine Überlagerung der beim P-Regler und beim I-Regler schon beschriebenen Eingriffe. Wie ein Mensch bei Handregelung arbeiten müßte, um PI-Verhalten zu haben, ist leicht zu sagen.

Er muß im angeführten Beispiel das Ventil zunächst schnell proportional zur Regelabweichung und dann langsam weiter mit einer der Regelabweichung proportionalen Geschwindigkeit verstellen.

Der schnelle P-Eingriff sorgt dafür, daß sich Störungen nur gering auf die Regelgröße auswirken, und das langsame I-Nachstellen beseitigt diese kleine, noch vorhandene Auswirkung ganz.

Der schnelle, aber seine Aufgabe (Einhaltung des Sollwertes) nicht so genau nehmende P-Anteil macht gewissermaßen die grobe Arbeit und der langsame, aber beharrliche I-Anteil beseitigt fein säuberlich die vom P-Anteil noch gebliebene Abweichung vom Sollwert.

7. Der perfekte Bedienungsmann des betrachteten Ofens wird sicher neben dem PI-Verhalten (schnell grob stellen, fein nachstellen) noch etwas anderes beachten. Er wird sich sagen: Läuft die Temperatur, die du beobachtest, schnell vom Sollwert weg, dann wird es gut sein, sofort stark einzugreifen, auch wenn die wirkliche Abweichung noch nicht groß ist. Sie würde ja aber bei der bemerkten großen Änderungsgeschwindigkeit demnächst groß werden. Der kluge Mann baut also vor. Er greift mit "Vorhalt" ein. Er richtet seinen Eingriff außer proportional zur Abweichung und proportional zum Zeitintegral der Abweichung auch noch proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Abweichung ein. Er beachtet noch  $\dot{x}_w$ . Seine Handlungsgleichung lautet  $y = K_R x_w + K_I \int x_w dt + K_D \dot{x}_w$ . Er ist ein PID-Regler.

8. Was PD-Zeitverhalten ist, geht aus dem Vorhergehenden hervor. Es gibt entsprechend, da sich der Name eines Reglers nach seinem Zeitverhalten richtet, PD-Regler.

9. Der PID-Regler beachtet viel; es gibt Regler, die noch mehr beachten. Auch das kann man sich am Beispiel der Handregelung klarmachen.

Dem regelnden Menschen, der unentwegt das Meßgerät beobachtet und seine Eingriffe danach vornimmt, können von anderen Sinnesorganen (Meßfühlern) über andere Signalleitungen andere für die Regelung wichtige Meßwerte mitgeteilt werden.

So kann jemand rufen: Es kommt jetzt Gas mit einem besseren Heizwert. Ohne abzuwarten, daß als Folge die Temperatur demnächst zu hoch würde, dreht der Regler daraufhin das Ventil sofort etwas zu.

Noch andere Störgrößen können gemeldet werden (Erhöhung des

Ofendurchsatzes, veränderte Außentemperatur usw.).

Man spricht von "Störgrößenaufschaltung".

An einem Durchflußmeßgerät für das Heizgas kann jemand stehen und dem Reglermann mitteilen: Du hast jetzt zwar doppelt so viel aufgedreht wie vorhin, aber dennoch ist nicht doppelt so viel Gas hier durchgekommen wie vorhin. Da muß mit deiner Ventilkennlinie etwas nicht stimmen (Nichtlinearitäten). Richte dich mal nach dem, was ich dir auf deine Dreherei hin rückmelde.

Man spricht von "Rückführungen".

Schließlich könnte noch eine zusätzliche Leitung vom Ferngasnetz zu einigen Hilfsbrennern führen, die nur betätigt wird, wenn der Regler seine Aufgabe mit dem billigeren Generatorgas nicht ordentlich, etwa nicht schnell genug, erfüllen kann.

Man spricht von einer "Hilfsstellgröße".

Diese Aufschaltungen können ihrerseits wieder mit verschiedenem Zeitverhalten vorgenommen werden.

10. Zuletzt soll noch auf die höchste Form von Regel- und Steuergeräten, die Optimalwertregler und -Steuerer, hingewiesen werden. Das sind Maschinen, die aus einer Vielzahl von Informationen solche Befehle ableiten, daß eine qualitativ und quantitativ hochwertige Produktion bei optimal geringen Kosten möglich wird.

Programmänderungen und Sollwertverstellungen werden dabei nicht mehr vom Bedienungspersonal, sondern von der Maschine selbst vorgenommen. Die Maschine wird meist als wichtigsten Bestandteil einen Digitalrechner enthalten. Dieser kann weit mehr Informationen verarbeiten als die bisher angeführten Regler, die ja auch rechnen (multiplizieren, integrieren, differenzieren) und damit Informationen "verarbeiten".

Beispiel einer Optimalwertregelung:

Ein zentraler Rechner steuert und regelt Spannung, Frequenz und Leistung eines ganzen elektrischen Verbundnetzes. Dem Rechner fließen von allen Kraftwerken Informationen zu, die

er verarbeitet und daraus Befehle für die Regel- und Steuereinrichtungen der einzelnen Energieerzeuger ableitet. Dabei wird die Leistungsverteilung an Dampfkraftwerke, an Laufwasser- und Speicherwasserkraftwerke so eingerichtet, daß die von den Verbrauchern gewünschte Leistung bei konstanter Frequenz und Spannung mit minimalen Kosten erzeugt wird. Der Rechner berücksichtigt die in verschiedenen Kraftwerken verschiedenen Kosten der Energieerzeugung, die verschiedenen langen Übertragungswege, die Jahres- und Tageszeiten usw.

## 11. Zusammenfassung

Bei einer Regelung ist das "Wie?" des Stelleingriffes je nach Regelstrecke und Aufgabenstellung verschieden zu wählen. Es ist Aufgabe des Zeitgliedes oder Rechners, der vom Differenzglied gemeldeten Regelabweichung das gewünschte Zeitverhalten zu geben. In Baukastensystemen stellt das Zeitglied häufig ein Gerät für sich dar.

Das muß aber nicht sein. Der Name eines Reglers richtet sich nach seinem Zeitverhalten. Es gibt folgende Reglertypen:

1. Zweipunktregler
2. Dreipunktregler, Mehrpunktregler
3. Stetig-ähnliche Regler
4. P-Regler
5. I-Regler
6. PI-Regler
7. PID-Regler
8. PD-Regler
9. Regler der vorhergehenden Typen mit Aufschaltungen
10. Optimalwertregler

Jeder Regler arbeitet, wie jede noch so komplizierte Rechenmaschine, nach einem starren, ihm vom Menschen bei der Konstruktion eingegebenen Schema (Zweipunkt, PID usw.). Dieses Schema führt er besser (schneller, zuverlässiger, ausdauernder, billiger) aus als der Mensch. Regler und Maschinen sind "dumm". Sie werden nie etwas anderes können als das ihnen vom Menschen Vorgedachte und Eingebene.

Die komplizierteste rechnende Regelung oder Steuerung wird nie die Universalität des Menschen erreichen, sie wird nie "denken" im schöpferischen Sinne.

Die Typen von Reglern sind nur übersichtsmäßig, an einem Beispiel entwickelt, angegeben worden.

Es wird Aufgabe späteren Studiums sein, u.a. genaue Antwort auf folgende Fragen zu erhalten:

Nach welchen Prinzipien wird das verschiedene Zeitverhalten gerätemäßig verwirklicht?

Wie sehen ausgeführte industrielle Regler der verschiedenen Typen aus? Beispiele dazu.

Welche Eigenschaften haben Regelkreise des verschiedenen Zeitverhaltens?

Welches Zeitverhalten ist wo am Platze?

Wie können Regler, Regelkreise und Steuerketten berechnet werden?



### Wiederholungsfragen:

1. Warum ist es notwendig, der Regelabweichung ein Zeitverhalten aufzuprägen?
2. Machen Sie sich deutlich, daß auch das Zweipunktschalten ein Zeitverhalten, das der Regelabweichung gegeben wird, ist.
3. Was ist und wie arbeitet
  - a) ein Zweipunktregler
  - b) ein Dreipunktregler
  - c) ein stetig-ähnlicher Regler
  - d) ein P-Regler
  - e) ein I-Regler
  - f) ein PI-Regler
  - g) ein PID-Regler
  - h) ein PD-Regler?
4. Wieso kann man Regler als Rechner bezeichnen?

## **7. Verstärker, Energieschalter**

Im aufgegliederten Blockschaltbild (Bild 2) liegt im Wirkungsablauf des Regelkreises der Verstärker hinter dem Zeitglied.

Also fällt ihm die Aufgabe zu, den Ausgang des Zeitgliedes (das ist die Regelabweichung, der ein gewünschtes Zeitverhalten aufgeprägt ist) zu verstärken und damit den Stellantrieb zu beaufschlagen.

Es kann sein, daß die im Bild 2 genannten Glieder Geräte für sich sind, die wie angegeben hintereinander geschaltet werden.

Das muß aber nicht sein. Das aufgegliederte Blockschaltbild gibt ja nur eine funktionelle Aufgliederung an. Oft sind Differenzglied, Zeitglied und Verstärker ein Gerät. Der Regelabweichung wird dann durch Rückführungen im Verstärker oder durch Rückführungen vom Stellglied her das gewünschte Zeitverhalten aufgeprägt. Davon wird im Lehrbrief "Regler" noch ausführlich die Rede sein.

Jedenfalls findet zwischen Meßfühler und Stellglied im allgemeinen eine Energieverstärkung statt, denn die vom Meßfühler aufgebrachte Energie reicht meist nicht aus, um das Stellglied zu betätigen. Reicht die Energie doch aus (Ausdehnungstemperaturfühler, Druckmeßfühler u.ä.), so kann der Verstärker wegfallen. Es handelt sich dann um einen sogenannten unmittelbaren Regler oder um einen Regler ohne Hilfsenergie.

Von den Möglichkeiten der Energieverstärkung soll hier übersichtsmäßig die Rede sein. Genaues werden Sie darüber aus den Lehrbriefen über Bauelemente der Regelungstechnik erfahren.

Bei der Energieverstärkung steuert eine geringe Energie (etwa die Energie des Meßfühlers oder die Energie eines im 0-20 mA - Bereich arbeitenden Zeitgliedes) eine zugeführte Hilfsenergie.

**Nach der Art der Hilfsenergie unterscheidet man:**

- 1. mechanische Verstärker**
- 2. pneumatische Verstärker**
- 3. hydraulische Verstärker**
- 4. elektrische Verstärker**
- 5. elektronische Verstärker**

**Diese Verstärker können stetig oder unstetig arbeiten.**

**Beispiel eines stetigen Verstärkers:**

**Elektronischer Röhrenverstärker, wie er etwa in Radios verwendet wird. (Geringe Antennenempfangsenergie steuert stetig die elektronische Hilfsenergie)**

**Beispiel eines unstetigen Verstärkers:**

**Relais. (Geringe Erregerenergie löst den Schaltvorgang aus, wobei große Energien geschaltet werden können.)**

**Grundsätzlich können die meisten stetigen Verstärker auch unstetig betrieben werden, wenn nur der Verstärkereingang unstetig geändert wird. (Elektronenröhre als Schalter, Magnetverstärker als bistabiles Bauelement, Düse-Prallplatte als Schalter, usw.).**

**Es ist üblich, auch Schalter, Relais, also unstetige Energieschalter als Verstärker (eben unstetige Verstärker) zu bezeichnen. Andererseits nennt man auch stetige Verstärker Energieschalter (eben stetige Energieschalter).**

**Schließlich unterscheidet man nach dem Signalübertragungsverhalten P- und I-Verstärker.**

**Bei den proportionalen Verstärkern ist der Ausgang dem Eingang proportional. Beispiele: Röhrenverstärker, Düse-Prallplatte-Verstärker.**

**Bei den integralen Verstärkern ist die Geschwindigkeit des Ausganges dem Eingang proportional. Beispiele: Strahlrohrverstärker (Eingang = Strahlrohrverstellung, Ausgang = Stellkolbenbewegung), Motor (Eingang = Steuerspannung bzw. Feldstrom, Ausgang = verstellter Weg).**

Es folgt eine Übersicht über die wichtigsten Verstärker der Regelungs- und Steuerungstechnik.

### 1. Mechanische Verstärker

1.1 Kupplungen, rein mechanische, elektromagnetische, Magnetkupplungen, hydraulische Kupplungen.

1.2 einstellbare Getriebe, Reibradgetriebe

Bei allen diesen mechanischen Verstärkern steuert die "geringe" Einstellenergie (zum Anpressen der Reibbeläge, zur Erregung des kuppelnden Elektromagneten, zum Einstellen der Getriebeübersetzung usw.) die dadurch übertragene mechanische Hilfsenergie.

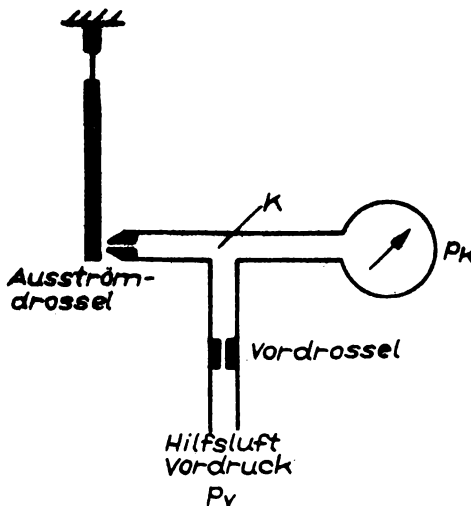


Bild 24

## 2. Pneumatische Verstärker

Alle pneumatischen Verstärker gehen auf die Anordnung Düse-Prallplatte zurück.

Die über eine Vordrossel in den Kaskadenraum K einströmende Hilfsluft (Hilfsenergeträger, Vordruck üblicherweise etwa 1,2 at ü) kann je nach Öffnung der Ausströmdrossel (durch Stellung der Prallplatte bestimmt) mehr oder weniger abblasen. Dadurch baut sich ein mehr oder weniger großer Kaskadendruck  $p_k$  auf. Dieser Kaskadendruck, durch sehr geringe Eingangsenergie steuerbar, kann auf entsprechend großen Membranen große Arbeit leisten (Verstärker). Die Düsendurchmesser liegen in der Größenordnung 0,1 mm - 1 mm. Die exakte mathematische Behandlung der auftretenden Strömungsvorgänge ist sehr schwierig. Man kann aber mit für viele Zwecke genügender Näherung eine vereinfachte Beziehung zwischen den Düsenöffnungsquerschnitten und den Drücken benutzen.

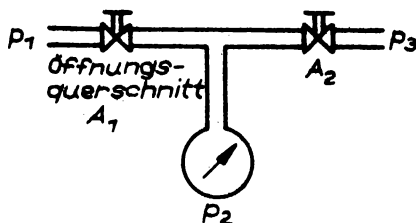


Bild 25

Für Bild 25 (Vordruck  $p_1$ , Kaskadendruck  $p_2$ , Ausströmdruck  $p_3$ ) gilt näherungsweise:

$$\frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_3} = \frac{A_2^2}{A_1^2} \quad \text{d.h.}$$

bei der unverzweigten pneumatischen Strömung verhalten sich

die Druckabfälle über den Drosseln umgekehrt wie die Quadrate der entsprechenden Drosselöffnungsquerschnitte. Setzt man  $\Delta^2 = \frac{1}{W}$  und definiert damit einen "Drosselwiderstand W", so lautet die Beziehung

$$\frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_3} = \frac{W_1}{W_2} ,$$

d.h.: Bei der unverzweigten pneumatischen Strömung verhalten sich die Druckabfälle über den Drosseln wie deren Widerstandswerte.

Dieses pneumatische Näherungsgesetz entspricht genau dem Ohmschen Gesetz der Elektrotechnik.

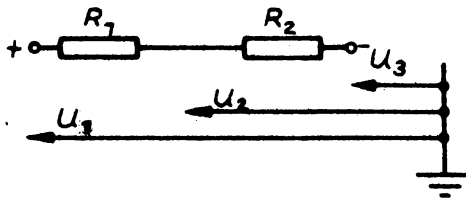


Bild 26

$$\frac{U_1 - U_2}{U_2 - U_3} = \frac{R_1}{R_2}$$

Es prägt sich deshalb leicht ein. Wir werden es bei der Durchrechnung pneumatischer Regler benutzen.

Auf die Anordnung Düse-Prallplatte angewandt, lautet es natürlich, da ja  $p_3 = 0$  ist:

$$\frac{p_v - p_k}{p_k - 0} = \frac{W_v}{W_D} = \frac{\Delta_D^2}{\Delta_v^2} \quad \text{oder} \quad p_k = \frac{p_v}{1 + \frac{\Delta_D^2}{\Delta_v^2}}$$

$A_D$  - Ausströmdrossel-Querschnitt

$A_V$  - Vordrossel-Querschnitt

Man sieht: Mit  $A_D = 0$  wird  $p_k = p_v$

Mit  $A_D \gg A_V$ , d.h. Düse ganz auf, wird  $p_k$  klein.  
Die Anordnung wird nun so justiert (Wahl der einstellbaren Vordrosselöffnung im Verhältnis zur vollen Ausströmöffnung), daß bei vollgeöffneter Düse  $p_k = 0,2$  at Ü ist. Das ist der "Nullpunkt" des Düse-Prallplatte-Systems.

Die Kennlinie  $p_k = f(A_D)$  ist nur in einem Teilbereich annähernd linear. Deshalb werden fast immer Rückführungen angebracht. Davon wird bei der Behandlung der P-Glieder noch gesprochen werden.

### 3. Hydraulische Verstärker

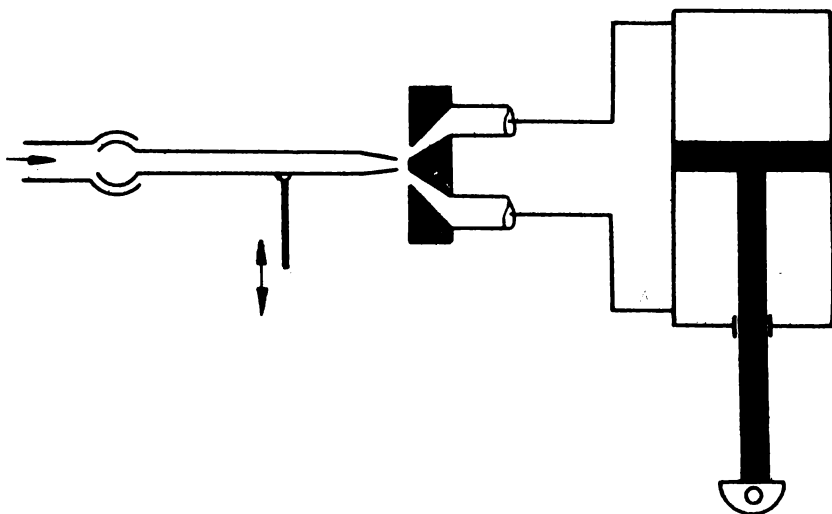


Bild 27

Das die Hilfsenergie tragende Drucköl (etwa 10 at ü) bläst in einem millimeterdünnen Strahl gegen einen Druckverteiler. Je nach Stellung des Strahlrohres (Mittelstellung, Linksauslenkung, Rechtsauslenkung) sind die Drücke über und unter dem angeschlossenen Kolben gleich groß (der Kolben steht) oder ungleich groß (der Kolben bewegt sich). Die kleine, zum Schwenken des Strahlrohres notwendige Energie steuert die große Energie des hydraulischen Kolbens. Sehr große Verstellkräfte lassen sich hydraulisch leicht aufbringen.

### 3.2 Hydraulische Steuerventile

Kleine, mit geringer Energie verstellbare Ventile steuern einen Druckölstrom, der über Kolben die Verstellung des Stellgliedes mit großer Energie bewirkt.

(Z.B. in der Werkzeugmaschinensteuerung)

## 4. Elektrische Verstärker

### 4.1 Mechanisch-elektrische Verstärker

Bei diesen Verstärkern steuert eine geringe mechanische Eingangsleistung eine große elektrische Ausgangsleistung.

Beispiele: verstellbarer Widerstand, Stelltransformator, Kontakte (Fallbügelregler, Quecksilberkippskontakte) Relais.

### 4.2 Elektromaschinenverstärker

Das sind im Prinzip Gleichstromgeneratoren, deren abgegebene elektrische Leistung wesentlich größer ist als die im Feldkreis aufgewendete Steuerleistung. Beispiele: normaler Generator, Leonard-Verstärker, Amplidyne.

Hilfsenergie ist die dem Generator zugeführte mechanische Energie, die meist von einem Wechselstrommotor geliefert wird. Durch verschiedene, galvanisch voneinander getrennte Feldwicklungen wird eine Signalmischung möglich (Differenzbildung, Hilfsgrößenaufschaltung usw.).



#### **4.3 Magnetverstärker**

Der Wechselstromwiderstand einer Spule mit ferromagnetischem Kern ist stark von ihrer Gleichstromvormagnetisierung abhängig. Mit steigendem Vormagnetisierungsstrom nimmt die Impedanz stark ab. Es besteht so die Möglichkeit, mit kleinen Gleichströmen große Wechselströme zu steuern. Das ist das Magnetverstärkerprinzip.

Dazu gibt es vielfältige und teils recht komplizierte Schaltungen. Die Lehrbriefe über Elektrotechnik berichten Ihnen davon.

#### **5. Elektronische Verstärker**

5.1 Bei den Verstärkern mit Vakuumröhren wird der Elektronenstrom, der in einer Vakuumröhre von der Glühkatode ausgeht, vom Potential eines Steuergitters fast leistungslos gesteuert.

5.2 Bei den Verstärkern mit gasgefüllten Röhren wird der Ionenstrom durch Steuergitter beeinflusst. (Gasentladungsröhren: Stromtore, Thyratrons, Senditrons; gittergesteuerte Stromrichter: Quecksilberdampf-Gleichrichter, Exitrons, Ignitrons)

5.3 Bei den Transistorverstärkern steuert der (geringe) Strom einer Halbleiterstrecke den (größeren) Strom einer anderen Halbleiterstrecke.

Für elektronische Verstärker gibt es eine Vielzahl von Schaltungsmöglichkeiten. Sie lernen die grundsätzlichen in den Lehrbriefen über Elektronik kennen.

Die in der Regelungs- und Steuerungstechnik gebräuchlichen Verstärker sind hier in diesem, eine Übersicht gebenden Lehrbrief nur aufgezählt worden. Sie werden anderswo Einzelheiten erfahren. Oranen Sie dann diese Einzelheiten gleich regelungstechnisch ein:

Verstärker dienen dazu, Signale in Regelkreisen oder Steuerketten zu verstärken. Über Verstärker können "schwache"

Meß- oder Befehlssignale (bis herunter zu  $10^{-11}$  Watt)  
"starke" Stellisignale (bis hinauf zu  $10^6$  Watt) auslösen.  
Durch Rückführungen kann man Verstärkern wünschenswertes  
Zeitverhalten geben.

### Wiederholungsfragen:

1. Welche Aufgabe fällt dem Verstärker im Regelkreis zu?
2. Was ist ein P-Verstärker, was ist ein I-Verstärker?
3. Nennen Sie einige
  - a) mechanische
  - b) pneumatische
  - c) hydraulische
  - d) elektrische
  - e) elektronische Verstärker.

### Aufgaben:

1. Welche Verstärkung hat ein Relais mit einer Erregerleistung von 3 W, das an einem 220 V - Gleichspannungsnetz einen Motor mit einer Stromaufnahme von 6 A schaltet?
2. Wie groß wird  $p_2$  im Bild 25, wenn die Drosseln aus Bohrungen mit  $d_1 = 0,6 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 0,3 \text{ mm}$  bestehen, sowie  $p_1 = 1,0 \text{ at}$  und  $p_3 = 0 \text{ at}$  sind?
3. Stellen Sie (Bild 25) die Abhängigkeit  $p_2 = f(A_2)$  für  $A_1 = 1 \text{ mm}^2$ ,  $p_1 = 1 \text{ at}$  und  $p_3 = 0 \text{ at}$  graphisch dar.  
Diskutieren Sie die Kennlinie.  
Ab welchem Verhältnis  $A_2 : A_1$  (ungefähr) hat eine weitere Vergrößerung von  $A_2$  kaum noch Einfluß auf  $p_2$ ?

## **8. Stellantriebe**

In vielen Fällen ist die Ausgangsgröße des Verstärkers Stellgröße einer Regelung oder Steuerung.

- Beispiele:
1. Ausgangsstrom eines Magnetverstärkers als Stellgröße für eine Motordrehzahl.
  2. Ausgangsstrom einer Elektronenröhre als Stellgröße für eine akustische Lautstärke.
  3. Ausgangsdruck einer Düse-Prallplatte-Anordnung als zu regelnde Größe. usw.

Überall aber, wo die Stellgröße  $Y$  ein mechanischer Weg ist (Ventil-, Drosselklappen-, Schieber-, Werkzeugschlitten-, Ruder-Verstellung usw.), muß ein vom Verstärker gespeister Stellantrieb diese Verstellung vornehmen.

Es gibt, nach der Hilfsenergie eingeteilt, pneumatische, hydraulische und elektrische Stellantriebe.

(Genauer müßte man natürlich sagen: pneumatisch-mechanische, hydraulisch-mechanische, elektrisch-mechanische Stellantriebe, denn in jedem Falle ist der Ausgang eine mechanische Verstellung.)

Die "rein mechanischen" Antriebe, dazu könnte man Kupplungen und einstellbare Getriebe rechnen, sind als Verstärker bereits genannt worden. Aber auch die mechanisch-mechanischen Verstärker und Stellantriebe müssen ja von einer anderen Hilfsenergie (meist elektrische) angetrieben werden. Andererseits können die mechanischen Verstärker auch als Stellantriebe angesehen werden. Ihnen ist sicher klar, daß es formalistisch wäre, da streng trennen und unterscheiden zu wollen.) Von dem Aufbau und den Eigenschaften der verschiedenen Stellantriebe werden Sie durch die Lehrbriefe "Bauelemente der Regelungs- und Steuerungstechnik" erfahren. In dieser einordnenden Übersicht soll wieder eine Aufzählung genügen.

## 1. Pneumatische Stellantriebe

### 1.1 Membranantriebe

Der Luftdruck wirkt auf eine elastische Membran oder auf eine Schlappmembran mit Gegenfeder und verstellt die mit der Membran verbundene Spindel.

(Membranventile, Membranhebel)

### 1.2 Langhubmembran, Rollmembran

Die durch Reibung (Stopfbuchse bei Membranventilen) und anderen Einflüsse hervorgerufene Unsicherheit der Einstellung wird oft durch angebaute Stellungsregler (Positioner) beseitigt.

## 2. Hydraulische Stellantriebe

2.1 Kolben, zweiseitig beaufschlagt (Bild 27)

2.2 Kolben, gegen Feder oder Gewicht einseitig beaufschlagt.

## 3. Elektrische Stellantriebe

3.1 Elektromagnete als Stellantriebe für "Auf" - "Zu"-Betätigung.

### 3.2 Elektromotoren

Es werden meist Motoren verwendet, deren Drehzahl und Drehrichtung gesteuert werden können:

Gleichstromnebenschlußmotoren

Zweiphaseninduktionsmotoren

auch Wechsel- und Drehstrommotoren.

Dabei wird die dem Motor zugeführte elektrische Energie gesteuert.

Bei Verwendung von einstellbaren Getrieben können auch Drehstrom-Kurzschlußläufer-Motoren benutzt werden.

Pneumatische, hydraulische und elektrische Stellantriebe und überhaupt pneumatische, hydraulische und elektrische Bauelemente haben Vor- und Nachteile. Es ist falsch, elektrische Geräte als "moderne" Geräte ansehen zu wollen. Modern

wird immer die der betreffenden Aufgabe angepaßt, die Möglichkeiten der inzwischen entwickelten Bauelemente nutzende Kombination pneumatischer, hydraulischer und elektrischer Geräte sein. Dabei gibt das Schlagwort "Elektrisch messen, elektronisch verstärken, pneumatisch stellen" für Regelungen der Verfahrenstechnik ein gewisses Optimum an. "Elektrisch messen" hat den Vorteil einfacher Signalweitergabe, "elektronisch verstärken" hat den Vorteil leichter Signalverarbeitung (Bildung des Zeitverhaltens, Aufschaltung von Hilfsgrößen, Anzeige und evtl. digitales Ausdrucken interessierender Betriebswerte usw.) und das pneumatische Stellen (nach vorheriger elektro-pneumatischer Energieverstärkung) ist schnell und wenig aufwendig.

Es folgte eine vergleichende Übersicht über die Eigenschaften der verschiedenen Bauelemente.

Vergleichende Übersicht der Eigenschaften pneumatischer, hydraulischer und elektrischer Bauelemente (nach Matuschka)

Pneumatische Bauelemente	Hydraulische Bauelemente	Elektrische Bauelemente
A l l g e m e i n e E i g e n s c h a f t e n		
Druckluftnetz (Motor, Kompressor, Rohrnetz) erforderlich.	Ständig laufender Motor mit Zahnradpumpe erforderlich.	Elektrische Hilfsenergie überall vorhanden, leicht verlegbar.
Arbeitsmedium (Luft) ist jederzeit und sofort greifbar.	Das Arbeitsmedium (Öl) muß in der richtigen Qualität stets bereitgehalten werden.	
Einigermaßen staub-, öl- und feuchtigkeitsfreie Druckluft herzustellen ist aufwendig und schwierig.	Unvermeidliche Fremdkörper und die Alterung (Verharzen) des Öls machen zuweilen ein Reinigen des gesamten Bauelementes notwendig.	
Bei Temperatur unter 0 °C führen die unvermeidlichen Feuchtigkeitsspuren zum Einfrieren und Versagen (evtl. also Heizung erforderlich).		kälteunempfindlich
Keine Änderung der Viskosität des Arbeitsmediums mit der Temperatur.	Die Viskosität des Arbeitsmediums ist stark temperaturabhängig	Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf das Übertragungssystem läßt sich mittels einfacher Null- und Kompensationsmethoden vollständig ausschalten.
Die Abluft kann man überall in die Atmosphäre entweichen lassen (Nur eine Hinleitung erforderlich).	Es sind Hin- und Rückleitungen erforderlich.	Die Übertragung elektrischer Größen bereitet praktisch keine Schwierigkeiten (selbst bei großen Entfernungen).

Pneumatische Bauelemente	Hydraulische Bauelemente	Elektrische Bauelemente
<p>Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Druckimpulsen ist etwa 300 m/s. Bei großen Leitungslängen sind für manche Aufgaben untragbare Totzeiten die Folge. (Kompressibilität der Luft)</p> <p>Bei Übertragungsstrecken um 60 m muß eine pneumatische Anlage sehr sorgfältig projektiert werden.</p> <p>Kleine Undichtigkeiten stören noch nicht.</p> <p>Das Arbeitsmedium ist explosions sicher. Bei Bedarf kann z.B. auch Stickstoff als Arbeitsmedium verwendet werden</p> <p>Einfache, robuste Geräte, im allgemeinen billiger als elektrische Geräte. Geringe Wartung</p>	<p>Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Druckimpulsen ist größer als 3000 m/s.</p> <p>Schon kleine Undichtigkeiten führen zum Versagen.</p> <p>Das Arbeitsmedium ist feuergefährlich</p>	<p>Wegfall komplizierter Rohrnetzen und Rohrführungen.</p> <p>Die Impulse pflanzen sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit fort.</p> <p>In explosionsgefährdeter Umgebung können besondere Schutzmaßnahmen erforderlich werden.</p> <p>Sehr anpassungsfähig, vielseitig. Automatische Auswertung von Betriebsdaten wird durchweg elektrisch ausgeführt. Optimale Führung eines Prozesses durch eine elektronische Rechenmaschine möglich.</p>



**Pneumatische  
Bauelemente**

**Hydraulische  
Bauelemente**

**Elektrische  
Bauelemente**

**Zeitglieder und Recheneinrichtungen**

Die Recheneinrichtungen erfordern viel feinmechanischen Aufwand und sind wenig anpassungsfähig und nicht sehr vielseitig.

Die Recheneinrichtungen erfordern viel feinmechanischen Aufwand und sind wenig anpassungsfähig und nicht sehr vielseitig.

Sämtliche vorkommenden Rechenoperationen lassen sich einfach und übersichtlich ausführen.

Die Zeitglieder lassen sich ohne Schwierigkeiten für sehr lange Zeiten ausbilden. (20 min. etwa)  
Die Konstanz der Einstelldaten ist ausreichend.

Die Einstelldaten der Zeitglieder sind wegen der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Arbeitsmediums nicht konstant.

Zeitglieder für lange Zeiten bereiten in elektronischen Reglern wegen der unvermeidlichen Leckströme der Kondensatoren Schwierigkeiten und sind aufwendig.  
Zeitglieder für kurze Zeiten (20 s etwa) lassen sich leicht realisieren.

Elektrische Zeitglieder (induktiver Geber, Ferrarismotor, Getriebe) lassen sich für beliebig große Zeitkonstanten ausbilden.

**V e r s t ä r k e r**

Die Verstärker sind robust und einfach.

Die Verstärker sind robust und einfach.

Der Anfälligkeit elektronischer Verstärker wird durch parallel arbeitende Langlebensdauerrohren und durch leicht austauschbare Steck-einsätze (Bau-

<b>Pneumatische Bauelemente</b>	<b>Hydraulische Bauelemente</b>	<b>Elektrische Bauelemente</b>
<b>Auch kleinste Meßleistungen lassen sich gut verstärken.</b>	<b>Kleine Meßleistungen können wegen der Rückwirkungen nicht verstärkt werden.</b>	kasten) wirksam begegnet. Elektronische Verstärker sind trägheitslos. Bei Vakuumröhren ist die Leistung begrenzt. Magnetische Verstärker sind robust und liefern bei tragbarem Verzögerungsverhalten hohe Leistungen.

### S t e l l a n t r i e b e

<b>Verstellkräfte begrenzt.</b>	<b>Praktisch unbegrenzte Verstellkräfte.</b>	<b>Wegen der hohen Drehzahlen der Elektromotoren sind aufwendige Getriebe erforderlich.</b>
<b>Hohe Verstellgeschwindigkeiten erreichbar.</b>	<b>Hohe Verstellgeschwindigkeiten bei großen Verstellkräften bereiten Schwierigkeiten.</b>	<b>Große Verstellgeschwindigkeiten erfordern hohe Motorleistungen, teure Verstärker und teure Getriebe.</b>
<b>Der Weg ist bei Membranen und Kolben begrenzt.</b>	<b>Der Weg ist bei Membranen und Kolben begrenzt.</b>	<b>Große Wege und Umdrehungszahlen leichter erzielbar als kleine.</b>
<b>Hoher Druckluftverbrauch bei großen Verstellkräften und Geschwindigkeiten.</b>	<b>Ständig laufende Ölpumpe erforderlich.</b>  <b>Dichtungen und Sicherheitsventile bereiten bei hohen Öldrücken Schwierigkeiten.</b>	
<b>Selbsthemmung schwer zu erreichen.</b>	<b>Selbsthemmung schwer zu erreichen.</b>	<b>Selbsthemmung leicht erreichbar.</b>

<b>Pneumatische Bauelemente</b>	<b>Hydraulische Bauelemente</b>	<b>Elektrische Bauelemente</b>
<b>Handverstellung schwierig.</b>	<b>Handverstellung schwierig.</b>	<b>Handverstellung leicht möglich.</b>

**Wiederholungsfragen:**

- 1. Welche Aufgabe hat der Stellantrieb im Regelkreis?**
- 2. Welches sind die Vor- und Nachteile pneumatischer, hydraulischer und elektrischer Bauelemente?**

## **9. Stellglieder**

Der Stellantrieb betätigt das Stellglied. Das Stellglied beeinflusst die Regelgröße. Mit diesem Eingriff in die Regelstrecke schließt sich der Wirkungskreis Regelstrecke - Meßglied - Umformer - Differenzglied - Zeitglied - Energieschalter - Stellantrieb - Stellglied.

Stellglieder der Regelungs- und Steuerungstechnik können alle Geräte oder Bauteile sein, mit denen eine physikalische Größe willkürlich beeinflussbar ist.

Die folgende Tafel bringt einige Beispiele von Stellgliedern. Stellgröße ist dabei die Ausgangsgröße des Reglers (der Regler ist die gesamte den Regelungsvorgang an der Regelstrecke bewirkende Einrichtung) und damit die Eingangsgröße der Regelstrecke.

Man fasse das aber nicht streng formal auf. Letztlich ist es unwichtig, ob man z.B. das Ventil in einer Gasleitung (Temperaturregelung) zur Strecke oder zum Regler rechnet. Laut Normblattdefinition würde es zum Regler gehören. Von den möglichen verschiedenen Betrachtungsweisen hängt es natürlich auch ab, was man als Stellgröße ansieht. Nimmt man die obige Temperaturregelstrecke "vom Ventilhub bis zur Temperatur", so ist der Ventilhub Stellgröße, nimmt man sie "vom Gasdurchsatz bis zur Temperatur", so ist der Gasdurchsatz Stellgröße.

**Beispiele für Stellglieder:**

<b><u>Stellglied</u></b>	<b>Der Eingang</b>	<b>wirkt über</b>	<b>auf den Ausgang (Stellgröße)</b>
<b>Ventil</b>	<b>Hub</b>	<b>Querschnitt</b>	<b>Flüssigkeits- durchsatz, Gasdurchsatz</b>
<b>Klappe, Hahn</b>	<b>Drehwinkel</b>		
<b>Stellgetriebe</b>	<b>Stufenver- stellung</b>	<b>Übersetzung</b>	<b>Drehbewegung</b>
<b>Ruder, Leitwerk</b>	<b>Hub des An- triebes</b>		<b>Anstellwinkel</b>
<b>Hydraulik- motor</b>	<b>Ölmenge</b>	<b>Drehzahl</b>	<b>Drehbewegung</b>
<b>magnetische Kupplung</b>	<b>Erreger- strom</b>	<b>Drehmoment</b>	<b>Drehbewegung</b>
<b>Heizwider- stand</b>	<b>Spannung</b>		<b>Heizleistung</b>
<b>Erregerwick- lung</b>	<b>Erreger- strom</b>	<b>magn. Fluß</b>	<b>Ankerspannung</b>
<b>Stelltrans- formator</b>	<b>Drehwinkel</b>	<b>Windungszahl</b>	<b>elektr. Spannung</b>
<b>Thyratron</b>	<b>Gitter- spannung</b>	<b>Stromfluß- dauer</b>	<b>Anodenstrom</b>
<b>Verstärker- röhre</b>	<b>Gitter- spannung</b>		<b>Anodenstrom</b>

Das Stellglied wird durch seine Kennlinien charakterisiert:

- a) statische Kennlinie
- b) dynamische Kennlinie.

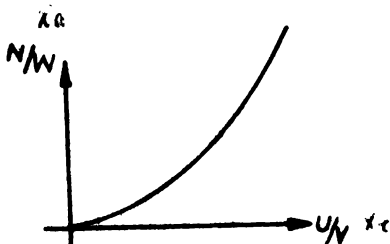


Bild 28

Die statische Kennlinie gibt die Abhängigkeit des "Ausganges" vom "Eingang" an.

Beispiel: Die Abhängigkeit der Heizleistung eines Heizwiderstandes von seiner Eingangsspannung.

$$N = U \cdot I = \frac{U^2}{R}$$

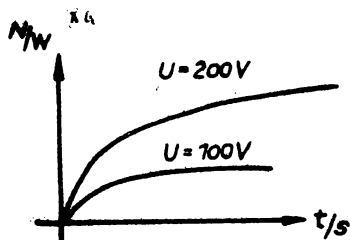


Bild 29

Die dynamische Kennlinie gibt für bestimmte "Eingänge"

(meist Sprungeingang, d.h. die Eingangsgröße wird sprunghaft verstellt) die Abhängigkeit des Ausganges von der Zeit an.

Beispiel: Der Heizwiderstand wird nach Einschalten einer bestimmten Spannung seine entsprechende Heizleistung nicht sofort abgeben, da er erst sich selbst und seine nächste Umgebung erwärmen muß (Verzögerung).

Die Angabe beschreibender Gleichungen statt Kennlinien ist meist schwieriger und dann wenig sinnvoll, wenn die Kennlinie experimentell bestimmt wurden.

Rechnet man doch, so können oft lineare Verhältnisse angenommen werden, d.h. man nimmt eine lineare Abhängigkeit zwischen Eingang und Ausgang an. Das gilt auch bei nicht-linearen Stellgliedern (und ganz allgemein Bauelementen) "im Kleinen", für kleine Änderungen. Andererseits kann man

die Linearität durch bauliche Maßnahmen (Linearisierungsge-  
triebe, Gegenkopplungen usw.) erzwingen. Die Linearität ist  
bei vielen Stellgliedern wünschenswert, man nutzt aber  
auch nichtlineares Verhalten bewußt aus.

### Beispiele statischer Kennlinien von Stellgliedern:

#### 1. Ventile mit linearer Kennlinie

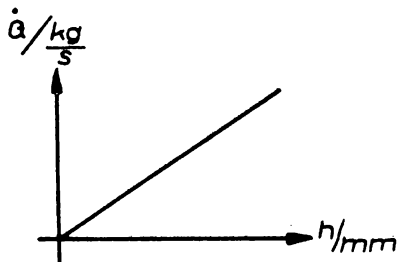


Bild 30

Bei diesen Ventilen ist die  
Durchflußänderung der Hub-  
änderung proportional.

$$d\dot{G} = k dh$$

(Der Durchfluß wurde mit  $\dot{G}$   
bezeichnet, weil er ja (siehe  
auch Dimension: Masse pro  
Zeit!) tatsächlich ein Dif-  
ferentialquotient ist. Die  
durchgeflossene Menge  $G$  er-  
hält man durch Zeitintegra-

tion des Durchflusses  $\dot{G}$ . Als Ventilkennlinie interessiert  
aber die Abhängigkeit des Durchflusses  $\dot{G}$  vom Hub  $h$ .)  
Die Integration dieser Differentialgleichung ergibt mit der  
Anfangsbedingung: Für den Hub  $h = 0$  sei der Durchfluß  
 $\dot{G} = 0$  die Ventilgleichung.  $\dot{G} = k h$

#### 2. Ventile mit gleichprozentiger Kennlinie

(auch exponentielle Kennlinie oder logarithmische Kenn-  
linie)

Bei diesen Ventilen ist die p r o z e n t u a l e Durch-  
flußänderung der Hubänderung proportional.

$$\frac{d\dot{G}}{\dot{G}} = k dh$$

Mit der Anfangsbedingung  $\dot{G}(0) = \dot{G}_0$  erhält man die Ventil-  
gleichung

$$\ln \dot{G}(h) - \ln \dot{G}_0 = k h$$

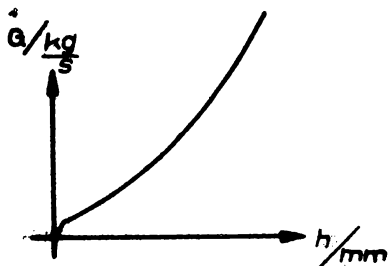


Bild 31

oder anders geschrieben

$$\dot{G} = \dot{G}_0 e^{kh}$$

Man sieht, daß  $\dot{G}$  nicht 0 sein kann, denn die e-Funktion wird nur für  $h$  gegen minus Unendlich zu 0 und das ist praktisch offensichtlich nicht möglich. Andererseits ist die Anfangsbedingung  $\dot{G}(0) = \dot{G}_0 = 0$  auch nicht möglich, da dann der

Durchfluß für jeden Hub null wäre. Bleibt also die Aussage: Streng gleichprozentige Ventile können nicht völlig schließen.

In der Praxis wird man auf einen möglichen dichten Abschluß nicht verzichten und den Durchfluß von 0 bis  $\dot{G}_0$  zunächst steil linear mit dem Hub ansteigen lassen, um von dort aus mit dem gleichprozentigen Bereich zu beginnen. Das ist durch entsprechende Ausbildung des Ventilkegels möglich. (Die verschiedenen Namen für diese Ventilsorte (gleichprozentig, exponentiell, logarithmisch) werden durch die Gleichungen verständlich).

### 3. Röhrenkennlinien

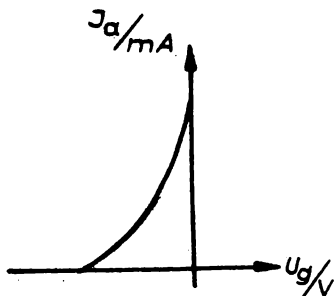


Bild 32

Von solchen Kennlinien, davon, wo Ventile mit linearer und wo solche mit gleichprozentiger Kennlinie am Platze sind usw. usw. werden Sie in den Lehrbriefen über Bauelemente der Regelungstechnik Näheres erfahren.

In der hier vorliegenden Übersicht wurde das Thema nur erwähnt.



**Wiederholungsfragen:**

1. Welche Aufgabe hat das Stellglied im Regelkreis?
2. Nennen Sie einige Stellglieder, deren Eingänge und Ausgänge.
3. Was ist eine statische Kennlinie?
4. Was ist eine dynamische Kennlinie?
5. Was ist ein Ventil mit gleichprozentiger Kennlinie?

## **10. Regelstrecken**

Die Regelstrecke (Steuerstrecke) ist der Bereich einer Anlage, in welchem eine Größe durch die Regelung (Steuerung) beeinflusst wird. Beispiele dazu fallen Ihnen in genügender Anzahl ein, wenn Sie einmal zu der Übersicht über die Meßfühler zurückblättern.

Die Regelstrecken (Steuerstrecken) müssen nun wie alle Regelkreisglieder graphisch oder rechnerisch charakterisiert werden.

Das wird Aufgabe eines der nächsten Lehrbriefe sein.

Jetzt nur so viel:

Es gibt zwei Arten von Regelstrecken:  
Strecken mit Ausgleich (P-Strecken) und  
Strecken ohne Ausgleich (I-Strecken)

Diese beiden Arten unterteilen sich weiter in Strecken mit verschiedenen Verzögerungen und Totzeit.

Mit Ausgleich heißt:

Nach sprunghafter Verstellung der Stellgröße läuft die Regelgröße in einen neuen, zugehörigen Beharrungszustand ein.

Regelgrößenänderung = Faktor mal Stellgrößenänderung

Beispiel: Temperatur-Strecke. Zu größerer Heizleistung gehört eine höhere Temperatur. Da die höhere Temperatur größere Abstrahlung zur Folge hat, stellt sich ein Ausgleich ein.

Ohne Ausgleich heißt:

Nach sprunghafter Verstellung der Stellgröße ändert sich die Regelgröße mit einer zugehörigen Geschwindigkeit dauernd. Es stellt sich kein Ausgleich ein.

Regelgrößen-Änderungsgeschwindigkeit = Faktor mal Stellgrößenänderung.

Beispiel: Motordrehweg. Zu jeder Steuerspannung als Eingang gehört eine bestimmte Drehgeschwindigkeit. Es stellt sich kein bestimmter Drehweg ein, sondern der Weg (Potentiometerabgriff etwa) wird bis gegen Anschlag gefahren.

# Übersicht über die wichtigsten Regelstrecken

Regelstrecke	Regelgröße	Stellgröße
<b>Kraftmaschinen:</b>		
Dampfmaschine	Drehzahl	Schieberstellung Ventilöffnung
	Leistung	Ventilöffnung
Dampfturbinen	Drehzahl bzw. Leistung	Drosselventilstel- lung oder Düsen- gruppenstellung
Wasserturbine	Drehzahl	Leitschaufelstel- lung
(Peltonrad)	Drehzahl	Düsennadelstellung
(Kaplan-Turbine)	Drehzahl	Leit- und Lauf- schaufelstellung
Ottomotor	Drehzahl	Drosselklappen- stellung
Dieselmotor	Drehzahl	Brennstoffmenge
Gasturbine	Drehzahl	Brennstoffmenge
<b>Elektromotore:</b>		
Gleichstrom	Drehzahl	Ankerstrom Feldstrom
Drehstrom	Drehzahl	Widerstand im Schleifringanker- kreis
Drehstrom	Drehzahl	Bürstenstellung bei Kommutatormotor
<b>Pumpen:</b>		
Kolbenpumpe	Fördermenge	Drehzahl
Kreiselpumpe	Druck	Drehzahl
Kreiselpumpe	Fördermenge	Drosselventilstel- lung
Turbo-Kompressor	Druck	Drehzahl
Turbo-Kompressor	Fördermenge	Drehzahl und Dros- selventilstellung
<b>Öfen:</b>		
gas- oder flüssigkeits- beheizt	Temperatur	Brennstoffmenge
elektrisch	Temperatur	elektr. Heizstrom

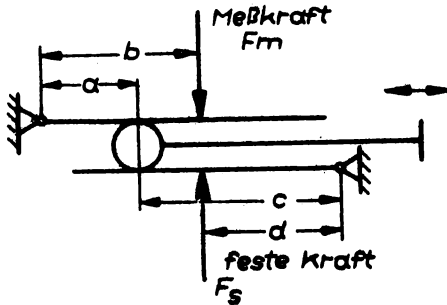
<b>Regelstrecke</b>	<b>Regelgröße</b>	<b>Stellgröße</b>
<b>mit festen Brennstoffen</b>	Temperatur	Brennstoffmenge z.B. Rostgeschwindigkeit bei Wanderrost; Luftmenge
<b>Elektrische Stromerzeuger</b>	Spannung, Strom, Leistung	Feldstromeinstellung durch einstellbare Vorwiderstände
<b>Behälter</b>	Flüssigkeitsstand	Zu- oder Abfluß, an Drosselventilen eingestellt
<b>Dampfkessel</b>	Dampfdruck Dampfmenge Wasserstand	Luft- und Brennstoffmenge Speisewasserzufluß
<b>Gas- oder Flüssigkeitsrohrnetze</b>	Druck, Menge	Stellung der Drosselventile
<b>Wasserstoffionenkonzentration</b>	$p_H$ -Wert	Zufuhr von Neutralisationslösung
<b>Raumklimatisierung</b>	Temperatur Feuchtigkeit	Heizmittelzufuhr Zufuhr von Sprühwasser

**Wiederholungsfragen:**

1. Was versteht man unter einer Regelstrecke?
2. Was ist der Unterschied zwischen einer Regelstrecke und einer Steuerstrecke?
3. Was ist eine P-Strecke, was ist eine I-Strecke?
4. Nennen Sie außer den angegebenen einige Strecken und deren Eingänge und Ausgänge.

## Lösungen zu den Aufgaben:

### Aufgabe 4/1:



$$F_m = \frac{a}{b} \cdot \frac{d}{c} \cdot F_s$$

$$a + c = b + d$$

$$b = \text{konst.}$$

$$d = \text{konst.}$$

$$b + d \geq a$$

a möge die Stellung des Stiftes angeben

$$F_m = \frac{a}{b} \cdot \frac{d}{b + d - a} \cdot F_s$$

Durch Verändern von  $a$  ( $0 \leq a \leq b + d$ ) können theoretisch Meßkräfte von

$$0 \leq F_m \leq \infty \quad \text{ausgewogen werden.}$$

### Aufgabe 4/2:

$A$  = wirksame Membranfläche

$F$  = Federkraft (einstellbar)

$p$  = Ausgangsdruck

$$p = \frac{F}{A}$$

Aufgabe 7/1:  $V = \frac{\text{Ausgangsleistung}}{\text{Eingangsleistung}} = \frac{220 \text{ V} \cdot 6 \text{ A}}{3 \text{ W}} = 440$

Aufgabe 7/2:  $\frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_3} = \frac{\Lambda_2^2}{\Lambda_1^2} = \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^4$

$$p_2 = \frac{p_1 + \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^4 \cdot p_3}{1 + \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^4}$$

$p_2 = 0,94 \text{ at}$

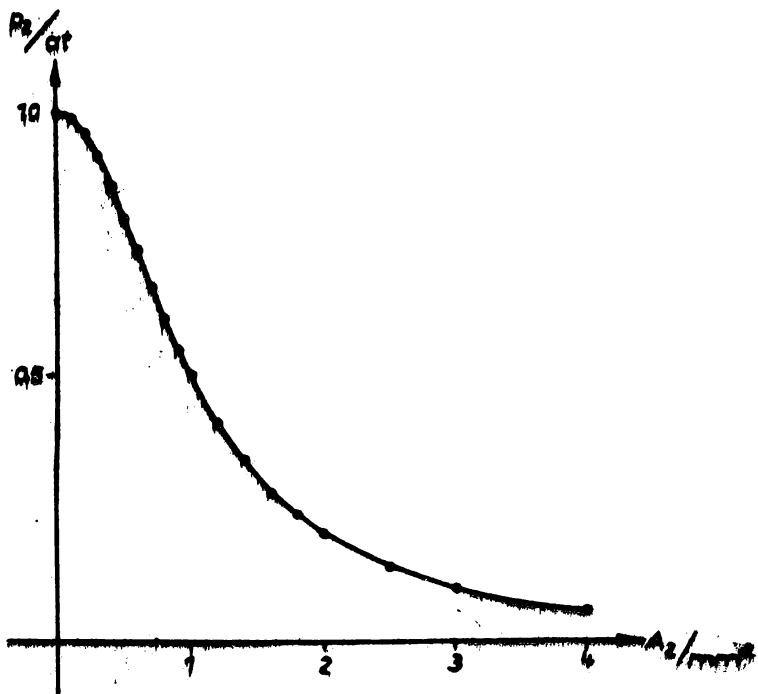
Aufgabe 7/3:

$$p_2 = \frac{1 \text{ at}}{1 + \frac{\Lambda_2^2}{1 \text{ mm}^4}}$$

$\Lambda_2/\text{mm}^2$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$p_2/\text{at}$	1	0,99	0,96	0,92	0,86	0,80	0,74	0,67	0,61

$\Lambda_2/\text{mm}^2$	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5
$p_2/\text{at}$	0,55	0,50	0,41	0,34	0,28	0,24	0,20	0,14

$\Lambda_2/\text{mm}^2$	3,0	4,0
$p_2/\text{at}$	0,10	0,06



Nach der Kennlinie hat ab  $A_1 : A_2 = 1 ; 3$  eine weitere Vergrößerung von  $A_2$  kaum noch Einfluß auf  $P_2$ .



### **Ergänzung zum Literaturverzeichnis im Lehrbrief 1:**

57. Automatik-Katalog 1960, Verlag Max Binkert GmbH, Frankfurt am Main, Laufenburg, Zürich.
58. Geisler, K.W.: Elemente der Regeltechnik, Fachverlag Schiele & Schön GmbH, Berlin 1960, 197 Seiten.
59. Hahn, R.: Digitale Steuerungstechnik, Theorie und Praxis in elementarer Darstellung, Franckh'sche Verlags-handlung Stuttgart, 1961, 150 Seiten.
60. Handbuch der Regelungstechnik, herausgegeben von G. Bleisteiner und W. v. Mangoldt, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1961 1500 Seiten.
61. Jahn, S.: Automation mit und ohne Elektronik, Albrecht Philler Verlag, Minden (Westf.), 235 Seiten.
62. König, E. und Pfenniger, W.: Automatisierung durch Pneumatik und Hydraulik, Sonderheft "Technische Rundschau", Bern/Schweiz, 1961, 70 Seiten
63. Lilley, S.: Automation und sozialer Fortschritt, Globus Verlag Wien, 1958, 220 Seiten.
64. Mikusch, E.: Berechnung und Konstruktion von Reglern, Band 1, Allgemeine Grundlagen, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1961, 160 Seiten.
65. Samal, E.: Grundriß der praktischen Regelungstechnik, Verlag R. Oldenbourg, München 1960, 330 Seiten.
66. Schaumjan, Automaten, VEB Verlag Technik Berlin 1961, 750 Seiten
67. Schwarze, G.: Grundbegriffe der Automatisierungstechnik, VEB Verlag Technik, Berlin 1961, 70 Seiten. Band 1 der Reihe Automatisierungstechnik.
68. Reihe Automatisierungstechnik, herausgegeben von B. Wagner und G. Schwarze, VEB Verlag Technik, Berlin. Es werden in einzelnen Darstellungen die vielfältigen Probleme der Automatisierungstechnik behandelt. Die einzelnen Bände erscheinen demnächst. Band 1 ist bereits erschienen.
69. Tucker/Wills, Regelkreise der verfahrenstechnischen Praxis, Verlag R. Oldenbourg, München 1960, 360 Seiten

**Quellennachweis:**

**Literaturangaben**

**21**

**32**

**34**

**Z3, 4.Jg., 1956, Heft 1, Matuschka: Gesichtspunkte zur  
Planung wärmetechnischer Regel-  
anlagen.**



# INGENIEUR- FERNSTUDIUM

BIRNSTIEL

## **EINFÜHRUNG IN DIE REGELUNGS- UND STEUERUNGS- TECHNIK**

**3.1**

HERAUSGEBER  
INGENIEURSCHULE FÜR  
FEINWERKTECHNIK JENA

1008-93,1/62

**Herausgeber:**  
**Ingenieurschule für Feinwerktechnik**  
**Jena**

**Einführung in die**  
**Regelungs- und Steuerungstechnik**

**Lehrbrief 3.1**

**von**

**Horst Birnstiel**

**1. Auflage**

**1962**

---

**Zentralstelle für Fachschulausbildung**  
**— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —**  
**Dresden**

## Inhaltsverzeichnis

=====

	<u>Seite</u>
1. Beschreibungsmethoden von Regelkreis- und Steuerkettengliedern	1
1.1 Grundsätzliche Bemerkungen	1
1.2 Statische Untersuchung; Unterscheidung: stetige lineare Glieder, stetige nicht-lineare Glieder, Impulsglieder, Schaltglieder	3
1.3 Dynamische Untersuchung	8
1.31 Die Übergangsfunktion	8
1.32 Die Differentialgleichung	10
1.33 Die Ortskurve	16
1.34 Der Frequenzgang	21
1.4 Vergleichende Bemerkungen	26
Wiederholungsfragen	29
2. Grundglieder	30
Übersicht	31
Bemerkungen	32
Wiederholungsfragen	40
Aufgaben	41
3. Verbindungsmöglichkeiten von Regelkreis- und Steuerkettengliedern	43
Einleitende Bemerkungen	
3.1 Hintereinanderschaltung	45
3.2 Parallelschaltung	46
3.3 Gegeneinanderschaltung	47
3.4 Beispiel einer zusammengesetzten Schaltung	47
Wiederholungsfragen	49

Der Lehrbrief besteht aus den Teilen 3.1 und 3.2

# 1. Beschreibungsmethoden von Regelkreis- und Steuerketten- gliedern

=====

## 1.1 Grundsätzliche Bemerkungen

Regelkreis und Steuerkette sind aus einzelnen Gliedern aufgebaut: Meßfühler, Umformer, Sollwertgeber, Differenzglied, Zeitglied, Verstärker, Stellantrieb, Stellglied, Rückführung, Regelstrecke bzw. Steuerstrecke.

Um das Zusammenwirken dieser Glieder übersehen zu können, bedarf es zunächst der Erfassung der einzelnen Glieder. Man braucht Aussagen, die ein Glied eindeutig beschreiben. Diese Aussagen können messend oder rechnend gewonnen werden.

Die Messung liefert Kennlinien und Diagramme. Die Rechnung liefert Gleichungen. Da beide Methoden für ein- und dasselbe Glied die gleiche Aussage beinhalten, muß es eine Querverbindung zwischen Meßergebnis und Rechenergebnis geben. Es ist so, daß die graphische Darstellung der Rechenergebnisse die Kennlinien und Diagramme der messenden Untersuchung liefert und daß die rechnerische Formulierung der Meßergebnisse eben die beschreibende Gleichung ergibt.

Ob nun bei der Bearbeitung einer Regelungsaufgabe gemessen oder gerechnet wird, hängt sehr von der Art der Aufgabe ab. Bei Neuentwicklungen, wo noch nichts da ist (z.B. Raketensteuerung und -regelung), also nichts gemessen werden kann, muß gerechnet oder probiert werden. Häufig kann auf ein Probieren nicht verzichtet werden, weil die Rechnung zu schwierig ist. Eine sinnvolle Verbindung zwischen Rechnen und Probieren stellt der Einsatz von Modellregelanlagen dar. Dort kann ohne besonderen Aufwand im Modell eine große Anzahl von Möglichkeiten für die Lösung einer Regelaufgabe durchprobiert und die günstigste ausgesucht werden. Offensichtlich ist das Probieren an der Anlage selbst entweder viel zu aufwendig, teuer, langwierig oder gar unmöglich. Bei Standardaufgaben

wird eine Rechnung häufig unnötig sein, weil aus den bekannten Meßergebnissen gleichartiger Aufgaben (Druck-, Temperaturregelung usw.) auf die neue Aufgabe geschlossen werden kann.

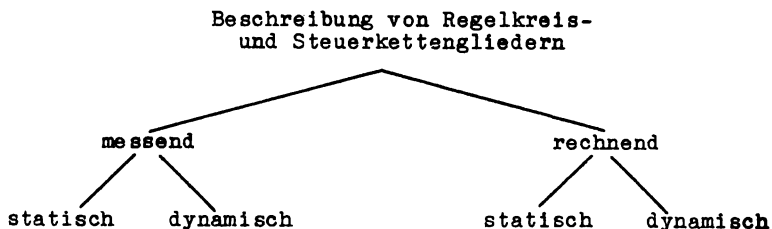
Die messende Beschreibung gibt graphisch an, welcher Ausgang im stationären Zustand zu welchem Eingang gehört und wie sich der Ausgang dynamisch ändert, wenn sich der Eingang in bestimmter, bekannter Weise ändert.

Die rechnerische Beschreibung liefert auf Grund von entsprechenden Gleichungsansätzen (z.B. Maschensatz der Elektrotechnik, Kräftegleichgewicht der Mechanik) eine Beziehung zwischen Eingangsgröße, Ausgangsgröße und der Zeit.

Messende wie rechnerische Beschreibung können entweder nur den stationären Zustand berücksichtigen oder auch die Dynamik einschließen.

Bei der dynamischen Beschreibung sind in der Gleichung die Änderungen der Größen (mathematisch durch Differentiale dargestellt) enthalten, die Gleichungen sind also Differentialgleichungen. Überall, wo Änderungen, wo dynamische Zustände rechnerisch beschrieben werden, treten Differentialgleichungen auf. Einschwingvorgänge der Regelgröße auf den Sollwert, Änderungen der Störgrößen usw. spielen aber in der Regelungstechnik eine große Rolle. So erklärt sich die Bedeutung der Differentialgleichungen für die Regelungstechnik.

Zusammenfassend:





## 1.2 Statische Untersuchung; Unterscheidung: stetige lineare Glieder, stetige nichtlineare Glieder, Impulsglieder, Schaltglieder

Bei der statischen experimentellen Untersuchung eines Gliedes wird der Eingang kontinuierlich von Wert zu Wert fest eingestellt und gemessen, welche dazugehörigen Ausgangswerte sich nach Ablauf des Einschwingvorganges ergeben.

Bei der statischen rechnerischen Untersuchung eines Gliedes wird unter Vernachlässigung des Zeitverhaltens eine Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße aufgestellt.

Es ergeben sich folgende Möglichkeiten:

1. Wird der Eingang stetig geändert, ändert sich der Ausgang auch stetig (stetige Glieder). Dabei kann die Abhängigkeit Eingangs- Ausgangsgröße linear oder nichtlinear sein (lineare stetige Glieder und nichtlineare stetige Glieder).

### Beispiele:

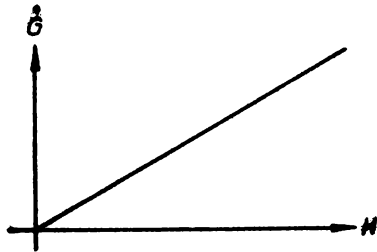


Bild 1

#### 1.1 Ventil: (Bild 1)

Eingang = Hub =  $H$

Ausgang = Durchfluß  
=  $\dot{G}$

Es handelt sich um ein lineares stetiges Glied.

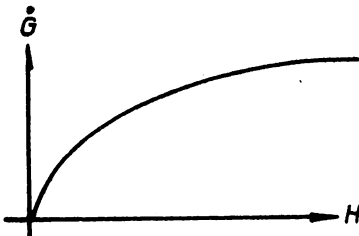


Bild 2

#### 1.2 Anderes Ventil, anderer Ventilkegel (Bild 2)

Es handelt sich um ein nichtlineares stetiges Glied.

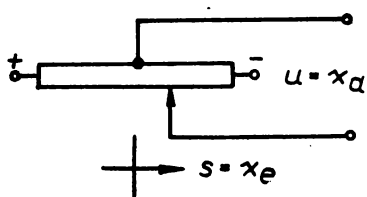


Bild 3

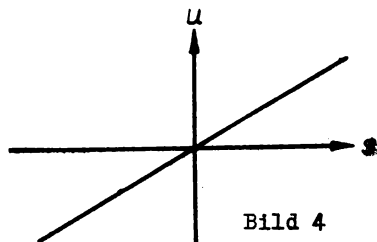


Bild 4

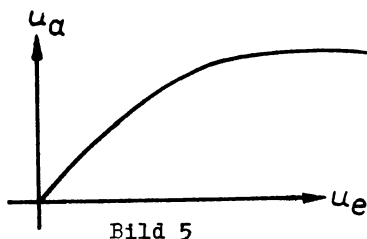


Bild 5

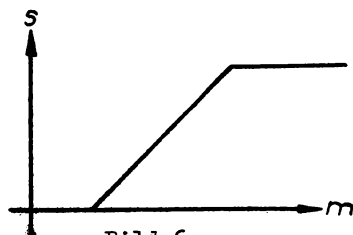


Bild 6

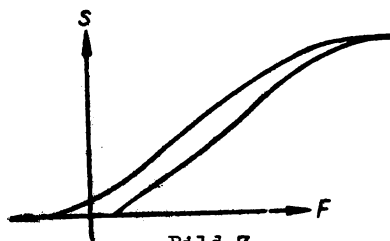


Bild 7

### 1.3. Widerstandsabgriff (Bild 3)

Eingang = Weg =  $s$ , von der Mitte aus gerechnet.

Ausgang = Spannung =  $u$ , von Mittelabgriff aus gerechnet. Es handelt sich um ein lineares stetiges Glied. (Bild 4)

### 1.4 Verstärker (Bild 5)

Eingang = Spannung =  $u_e$

Ausgang = Spannung =  $u_a$

Es handelt sich um ein nichtlineares stetiges Glied (Sättigung als Nichtlinearität).

### 1.5 Unempfindliches Meßinstrument (Bild 6)

Eingang = Meßgröße =  $m$

Ausgang = Zeigerausschlag =  $s$

Es handelt sich um ein nichtlineares stetiges Glied (Ansprechempfindlichkeit und Anschlag als Nichtlinearitäten).

### 1.6 Feder mit Reibung und Endlage (Membranventil)

Eingang = Kraft =  $F$

Ausgang = Stellweg =  $s$

Es handelt sich um ein nichtlineares stetiges Glied (Hysterese und Reibung als Nichtlinearitäten). (Bild 7)

2. Wird der Eingang stetig geändert, ändert sich der Ausgang sprungförmig, also unstetig (unstetige Glieder).

Beispiele:

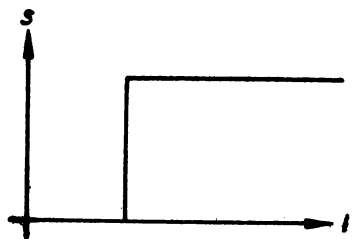


Bild 8

2.1 Relais (Bild 8)

Eingang = Erregerstrom  
=  $I$

Ausgang = Schaltstellung  
=  $s$

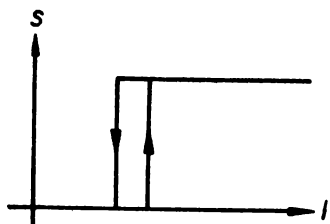


Bild 9

2.2 Relais mit Hysterese  
(Bild 9)

$x_a$  = Impulsdauer

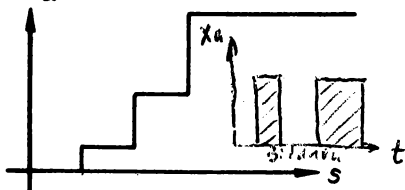


Bild 10

2.3 Fallbügelregler mit

Stufenblechabtastung

Eingang = Zeigerstellung  
=  $s$

Ausgang = Zeitdauer  $t$ ,  
während der Kontakt ge-  
schlossen wird (Impuls-  
breitenmodulation)

$x_a$  = Impulshöhe

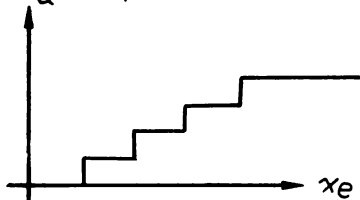
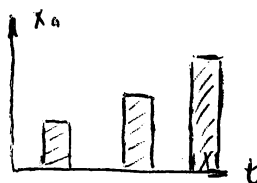


Bild 11

2.4 Impulshöhenmodulation



Zusammenfassung:

G l i e d e r

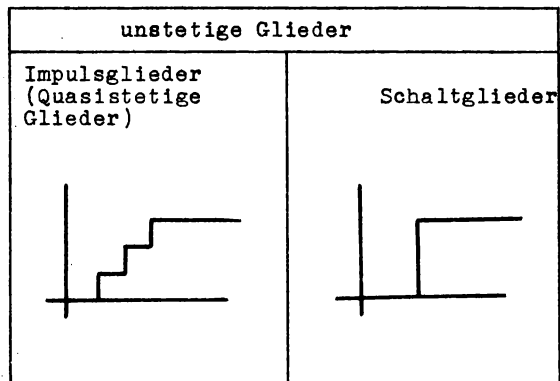
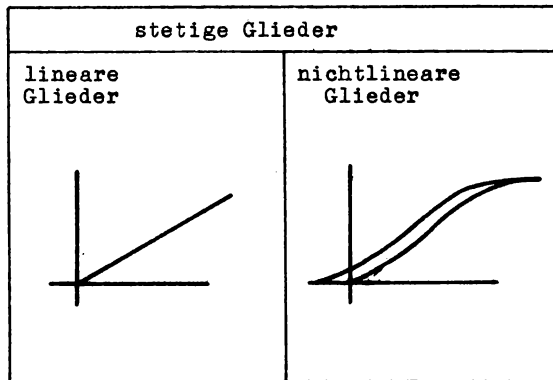


Bild 12

Wenn nichtlineare Glieder nur für kleine Änderungen des Einganges betrachtet werden, so kann man sie mit oft genügender Näherung als lineare Glieder behandeln.

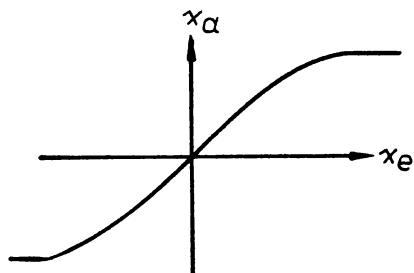


Bild 13

Bild 13 zeigt eine typische "im großen" nichtlineare, dagegen "im kleinen" lineare Kennlinie. Offensichtlich gibt es überhaupt keine streng linearen Glieder, denn auch die angegebenen (Ventil, Widerstandsabgriff) haben ja einen Anschlag, also eine typische Nicht-linearität.

Nun ist ja ein Grundsatz jeder technischen Betrachtung: Alles was gerechnet wird, ist falsch; es fragt sich nur, wie sehr. Alle Betrachtungen sind Näherungen der wirklichen Verhältnisse, der Techniker muß sich nur im klaren sein, daß die benutzte Näherung der Aufgabenstellung nach zulässig ist. Kein Vermessungsingenieur wird mit  $\mu\text{m}$  arbeiten, wohl aber ein Optikingenieur.

Die Problematik, mit Näherungen zu arbeiten, ist also nichts Neues. Sie trifft auch für die Regelungstechnik zu.

Neben den nichtlinearen Gliedern kann man auch die Impulsglieder, wenn die Impulsbreite nur fein genug gestuft ist, linear annähern. Lediglich die reinen Schaltglieder bedürfen einer grundsätzlich anderen Beschreibung (Schaltalgebra).

### Achtung!

Alle folgenden Betrachtungen gelten, wenn nichts anderes vermerkt ist, für lineare stetige Glieder.

Die exakte Behandlung nichtlinearer Probleme ist weitaus schwieriger als die linearer Probleme. Sie geht über eine Einführung in die Regelungs- und Steuerungstechnik hinaus.

### 1.3 Dynamische Untersuchung

#### 1.31 Die Übergangsfunktion

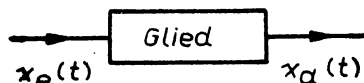


Bild 14

Die Übergangsfunktion ist eine graphische, sehr anschauliche, aus Messungen zu gewinnende Charakterisierung von Gliedern.

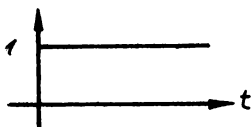


Bild 15

Bei der Aufnahme der Übergangsfunktion wird die Eingangsgröße  $x_e$  des zu untersuchenden Gliedes sprungförmig gestellt.

Die Art und Weise, wie sich dann der Ausgang zeitlich ändert, nennt man Übergangsfunktion des betreffenden Gliedes. Genauer müßte man sagen:

Sprungübergangsfunktion, da auch Anstiegsübergangsfunktionen (Anstiegseingang), Impulsübergangsfunktionen (Eingang wird impulsförmig gestellt) denkbar sind. Man versteht aber unter dem Begriff "Übergangsfunktion", wenn nichts dazu gesagt wird, stets die Sprungübergangsfunktion.

#### Beispiele:

1. Beispiel: Übergangsfunktion einer Temperaturregelstrecke (z.B. eines Zimmers)

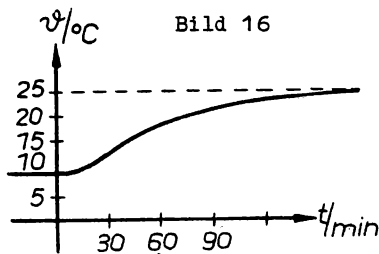
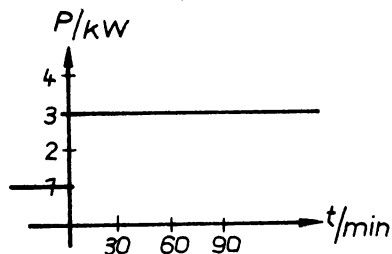
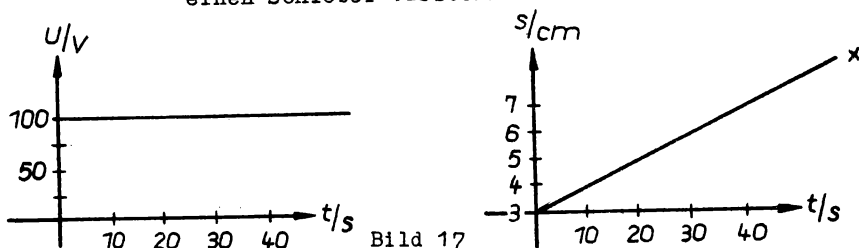


Bild 16

Nach sprungförmiger Verstellung der Heizleistung  $P$  von 1 kW auf 3 kW ändert sich die Temperatur, die bisher  $10^{\circ}C$  betrug, zunächst gar nicht (Totzeit), um dann langsam bis auf  $25^{\circ}C$  zu steigen. Die Übergangsfunktion kann entweder mit Stoppuhr, Millimeterpapier und Temperaturmeßwerk aufgenommen oder von einem Temperaturschreiber geschrieben werden.

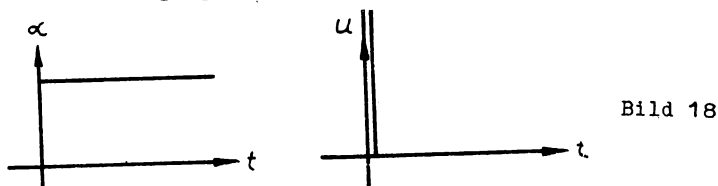
Die Art und Weise des Temperaturüberganges ist für die untersuchte Strecke charakteristisch, und man kann durch Auswertung der Übergangsfunktion Kenndaten erhalten.

2. Beispiel: Übergangsfunktion eines Gleichstrommotors, der einen Schieber verstellt



Wird die Speisespannung von 0 auf 100 V geschaltet (der Schieber möge bis dahin an der Stelle  $s = 3$  cm gestanden haben), so bewegt sich der Schieber mit einer konstanten Geschwindigkeit. Sein Weg ändert sich, wie in der Übergangsfunktion angegeben.

3. Beispiel: Übergangsfunktion eines Tachodynamos  
Eingang = Winkel. Ausgang = Spannung

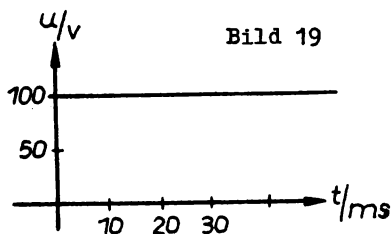
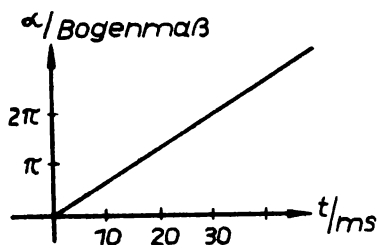


Wird der Winkel sprunghaft verstellt, so wird im Moment des Verstellens eine große Spannung abgegeben, nach stattgefundenem Sprung aber keine Spannung mehr. Übergangsfunktion ist die skizzierte Nadelfunktion.

Sicher leuchtet Ihnen ein, daß für den Tachodynamo diese messende Untersuchungsmethode nicht geeignet ist. Man wird hier einen anderen Eingang benutzen, nämlich den Anstiegseingang.

Ändert sich der Eingangswinkel mit konstanter Geschwindigkeit (konstanter Winkelgeschwindigkeit entspricht konstante Drehzahl), so gibt der Tacho eine konstante Spannung ab.

Dieses Übergangsverhalten charakterisiert den Tachodynamo.



### 1.32 Die Differentialgleichung

Die Differentialgleichung ist die rechnerische Erfassung des Verhaltens eines Gliedes.

Sie stellt das Ergebnis eines entsprechenden Ansatzes dar.

Glieder	Gleichungsansatz
elektrisch, elektronisch	Maschensatz, Knotenpunktsatz
mechanisch Translation	Kräftegleichgewicht
mechanisch Rotation	Momentengleichgewicht
thermisch	Zugeführte Wärmemenge = abgeführte + gespeicherte Wärmemenge
hydraulisch	Zufluß = Abfluß + Speicherung
usw.	usw.

In der Gleichung werden ganz allgemein die Ausgangsgröße und deren Ableitungen sowie die Eingangsgröße und deren Ableitungen, alle mit Koeffizienten behaftet, enthalten sein.

Da wir uns auf lineare Verhältnisse beschränken, treten alle Größen im allgemeinen nur in der ersten Potenz und mit konstanten Koeffizienten auf.

$$\dots + a_2 \ddot{x}_a + a_1 \dot{x}_a + a_0 x_a = e_0 x_e + e_1 \dot{x}_e + \dots$$



des beschriebenen Gliedes.

Die graphische Darstellung der Lösung der Differentialgleichung für  $x_e = \text{konstant} = \sqrt{c}$  (Sprungeingang) ergibt die Übergangsfunktion.

### Beispiele:

#### 1. Beispiel:

Der in Bild 20 skizzierte passive Vierpol wird in elektronischen Zeitgliedern (in Reglern, in Modellregelkreisen, in Analogrechnern) vielfach verwendet.

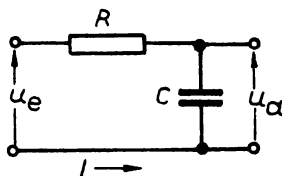


Bild 20

Wie hängt die Ausgangsspannung von der Eingangsspannung ab? Bei der Aufnahme der Übergangsfunktion würde man die Eingangsspannung einschalten und die Änderung von  $u_a$  aufnehmen.  $u_a$  wird verzögert so groß wie  $u_e$  werden. Das hat man schon im Gefühl. Hier kann man aber auch leicht die beschreibende Gleichung finden.

Die Anwendung des Maschensatzes ergibt  $u_e = I \cdot R + u_a$ , die Strom-Spannungs-Beziehung am Kondensator ergibt

$$I = C \frac{du_a}{dt} = C \cdot \dot{u}_a$$

Also:  $RC \cdot \dot{u}_a + u_a = u_e$  ist die den Vierpol beschreibende Differentialgleichung.

Sie hat die Form  $T_s \cdot \dot{u}_a + u_a = u_e$ .

$T_s = RC$  ist die Zeitkonstante des Verzögerungsvierpoles ( $s = \Omega \cdot F$ ).

#### 2. Beispiel: Gleichstrommotor, Eingang = Ankerspannung,

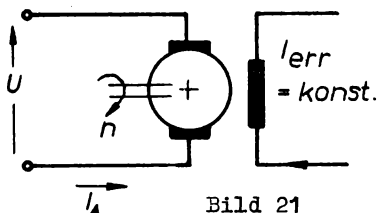


Bild 21

(Erregung = konstant),  
Ausgang = Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 2\pi n$

Hier dreht sich etwas, also wird der Ansatz-antreibendes Moment ist gleich der Summe aller hemmenden Momente - zur Gleichung

führen. Das antreibende Moment ist dem Ankerstrom

$I_A$  und dieser der Differenz aus Eingangsspannung  $U_e$  = Ankerspannung  $U$  und Gegenurspannung  $U_g$  proportional, wobei die Gegenurspannung wiederum der Winkelgeschwindigkeit proportional ist.

Als hemmende Momente seien ein konstantes Lastmoment  $M_L$  und das Beschleunigungsmoment  $\Theta \cdot \dot{\omega}$  angenommen. (Die Induktivität des Ankers und die Reibung mögen für die erste Näherung einer beschreibenden Gleichung vernachlässigt werden.)

Man erhält also:  $c (U - U_g) = M_L + \Theta \dot{\omega}$

$$U_g = k \cdot \omega$$

Also:  $c \cdot U - c \cdot k \cdot \omega = M_L + \Theta \dot{\omega}$

Geordnet ergibt das die Gleichung:  $\Theta \dot{\omega} + c \cdot k \cdot \omega = c \cdot U - M_L$

Man schreibt solche Gleichungen gern so um, daß die Ausgangsgröße (hier  $\omega$ ) mit dem Koeffizienten 1 steht.

$$\frac{\Theta}{c \cdot k} \dot{\omega} + \omega = \frac{1}{k} U - \frac{1}{k \cdot c} M_L$$

In dieser Form kann man nämlich sofort für den eingefahrenen Zustand (keine Änderung von  $\omega$  mehr, also  $\dot{\omega} = 0$ ) ablesen:

$$\omega_{\text{eingefahren}} = \frac{1}{k} U - \frac{1}{k \cdot c} M_L$$

Man erkennt so schon, ohne die Differentialgleichung zu lösen, die sich einstellende Drehzahl, bzw. Winkelgeschwindigkeit. Sie ist um so größer, je größer die Eingangsspannung ist, und um so kleiner, je größer das Lastmoment ist. Der Koeffizient bei  $\dot{\omega}$  hat die Bedeutung einer Zeitkonstanten. Denn: Auf der linken Seite der Gleichung steht eine Summe.

Addieren lassen sich nur Größen gleicher Dimension.

$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$  hat die Dimension  $\frac{\text{Dimension von } \omega}{\text{Zeit}}$ . Damit der ganze erste Summand die Dimension von  $\omega$ , also die Dimension des zweiten Summanden, hat, muß der Faktor  $\frac{\Theta}{k \cdot c}$  die Dimension einer Zeit haben (s, min, h, ...)

$\frac{\Theta}{k \cdot c}$  ist die Zeitkonstante des Motors.

Nun soll hier gleich eine Betrachtungsweise angeführt werden, die für die gesamte Regelungstechnik wichtig ist.

$U$  ist im Beispiel die von 0 an gemessene Ankerspannung,  $\omega$  ist die von 0 an gemessene Winkelgeschwindigkeit. Denkt man sich den Motor als Drehzahlregelstrecke, so gehört zur Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_s$  im Normalbetriebsfalle eine Spannung  $U_0$ .

$U_0$  sorgt im Normalbetriebsfalle für die Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_s$ . Will sich von diesem Grundzustand = Ausgangszustand aus die Winkelgeschwindigkeit (etwa durch veränderte Belastung) ändern, so muß die Regeleinrichtung für ein verändertes  $U$  sorgen und damit die Sollwinkelgeschwindigkeit aufrecht erhalten.

$$U = U_0 \pm \Delta u$$

$$\omega = \omega_s \mp \Delta \omega$$

(Abweichungen der Größen von Bezugswerten werden mit kleinen lateinischen Buchstaben bezeichnet. Um den Abweichungscharakter zu betonen und um den griechischen Buchstaben als Abweichungsbezeichnung kenntlich zu machen, ist  $\Delta u$  und  $\Delta \omega$  geschrieben worden).

Ein positives  $\Delta \omega$  (Winkelgeschwindigkeit höher als Sollwinkelgeschwindigkeit) muß ein negatives  $\Delta u$  (Ankerspannung niedriger als  $U_0$ ) auslösen.

Es leuchtet ein, daß es sinnvoller sein wird, statt der Bezugsgrößen 0 [V] und 0 [ $\frac{1}{s}$ ] die Bezugsgrößen  $U_0$  und  $\omega_s$  zu nehmen. Von diesen Bezugswerten aus arbeitet ja eine Regelung. Spätere Beschreibungen von Regelvorgängen werden sich einfacher gestalten, wenn diese geschickte Bezugslage gewählt wird. Die mathematische Formulierung des Satzes: "Zur Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_s$  gehört im Normalbetriebsfalle die Spannung  $U_0$ " lautet:

$$\omega_s = \frac{1}{k} U_0 - \frac{1}{k \cdot c} M_L$$

Wird nun  $U = U_0 + \Delta u$  und  $\omega = \omega_s + \Delta \omega$  in die Diffe-

rentialgleichung des Motors eingesetzt, so erhält man wegen  $\dot{\omega}_s = 0$ :

$$\frac{\theta}{k \cdot c} \Delta \dot{\omega} + \omega_s + \Delta \omega = \frac{1}{k} U_0 + \frac{1}{k} \Delta u - \frac{1}{k \cdot c} M_L$$

Also:

$$\frac{\theta}{k \cdot c} \Delta \dot{\omega} + \Delta \omega = \frac{1}{k} \Delta u$$

$\Delta u$  ist die Abweichung der Eingangsspannung  $U$  von der Bezugsspannung  $U_0$ .

$\Delta \omega$  ist die Abweichung der Ausgangswinkelgeschwindigkeit  $\omega$  von der Sollwinkelgeschwindigkeit  $\omega_s$ .

Hier ist als Eingang des Motors die Spannung angenommen worden und als Ausgang die Winkelgeschwindigkeit.

Die Abweichung der Winkelgeschwindigkeit ist der Abweichung der Spannung proportional.

Der "Ausgang" ist dem "Eingang" proportional.

So betrachtet ist der Motor ein P-Glied, und zwar ein solches mit Verzögerung 1. Ordnung (PT<sub>1</sub>-Glieder).

### 3. Beispiel:

Wird der Motor so eingesetzt, daß nicht seine Drehzahl und damit seine Winkelgeschwindigkeit, sondern ein von ihm verstellter Weg interessieren, so ist die Ausgangsgröße der Drehwinkel  $\alpha$ , von dem ja leicht auf den verstellten Weg umgerechnet werden kann. Es gilt  $\omega = \dot{\alpha}$ , also  $\Delta \omega = \Delta \dot{\alpha}$ . Mit dieser Beziehung erscheint die Motorgleichung in der Form

$$\frac{\theta(\alpha)}{k \cdot c} \Delta \ddot{\alpha} + \Delta \dot{\alpha} \frac{(\alpha)}{k} = \frac{1}{k} \Delta u$$

Man schreibt in der Regelungstechnik Gleichungen sinnvollerweise immer so um, daß die Ausgangsgröße selbst mit dem Koeffizienten 1 erscheint. Das ist hier durch Integration zu erreichen.

$$\frac{\theta}{k \cdot c} \Delta \ddot{\alpha} + \Delta \alpha = \frac{1}{k} \int \Delta u \, dt$$

Als Anfangsbedingung der Integration wurde durch das geschickt gewählte Bezugssystem  $\Delta\alpha(0) = 0$  eingesetzt. Es ist die Ausgangsgrößenabweichung dem Integral der Eingangsgrößenabweichung proportional. So betrachtet ist der Motor ein I-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung (IT<sub>1</sub>-Glied).

#### 4. Beispiel: Tachodynamo

Es ist die abgegebene Spannung  $u_a$  der Drehzahl  $n$  proportional  
 $u_a = k n$

So betrachtet ist der Tachodynamo ein P-Glied. Wird als Eingang dagegen der Winkel  $\alpha$  angesehen, so wird wegen

$$\omega = 2\pi \cdot n = \dot{\alpha} :$$

$$u_a = \frac{k}{2\pi} \dot{\alpha} = \frac{k}{2\pi} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

Die Ausgangsspannung ist dem Differentialquotienten des Eingangswinkels proportional. So betrachtet ist der Tachodynamo ein D-Glied. Der Tachodynamo wird in der Technik sowohl als P-Glied (z.B. Drehzahlmessung) wie auch als D-Glied (Aufschaltung der Änderungsgeschwindigkeit von Winkeln, z.B. Kursregelung von Flugzeugen, geschwindigkeitsproportionale Dämpfung in selbstabgleichenden Meßgeräten) verwendet.

#### 5. Beispiel: Spannungsteiler

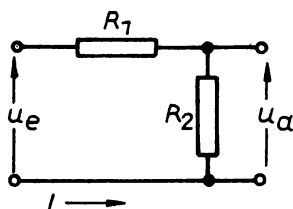


Bild 22

Wie hängt  $u_a$  von  $u_e$  ab?

Nach der Spannungsteilerregel ist

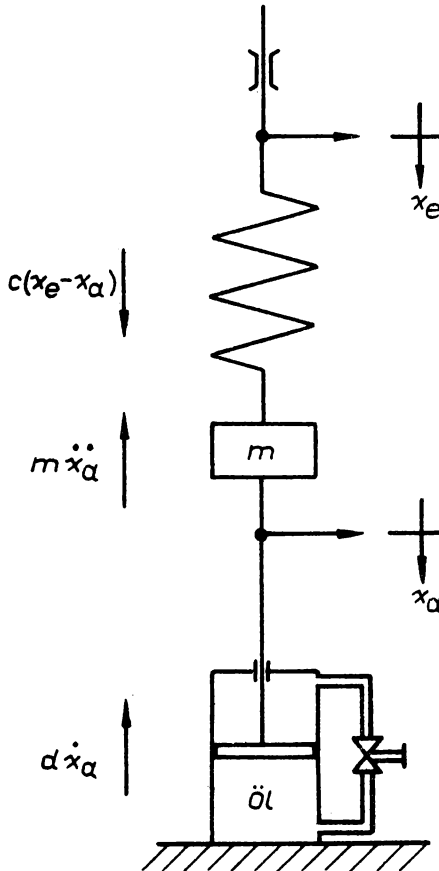
$$u_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_e$$

Die Ausgangsspannung ist der Eingangsspannung proportional.

$u_a$  folgt  $u_e$  unverzögert.

Es handelt sich um ein P-Glied ohne Verzögerung. Die Differentialgleichung ist von 0-ter Ordnung.

## 6. Beispiel: Masse-Feder-System mit Dämpfung



Es liegt eine translatorische Bewegung vor. Also wird der Kräfteansatz zum Ziel führen.

Es wirken

$$\text{Federkraft} = c (x_e - x_a)$$

$$\text{Trägheitskraft} = m \ddot{x}_a$$

$$\text{Dämpfungskraft} = d \dot{x}_a$$

$$m \ddot{x}_a + d \dot{x}_a = c (x_e - x_a)$$

Umgeschrieben:

$$\frac{m}{c} \ddot{x}_a + \frac{d}{c} \dot{x}_a + x_a = x_e$$

$\frac{d}{c}$  hat die Dimension Zeit,

$\frac{m}{c}$  hat die Dimension (Zeit)<sup>2</sup>.

Allgemein hat die obige Gleichung also die Gestalt

$$T_2^2 \ddot{x}_a + T_1 \dot{x}_a + x_a = x_e$$

Ist der Einschwingvorgang abgeschlossen ( $\ddot{x}_a = \dot{x}_a = 0$ ) so ist  $x_a = x_e$ .

Das ist P-Verhalten. Die beiden Ableitungen der Ausgangsgröße charakterisieren eine

Bild 23

Verzögerung 2.Ordnung (PT<sub>2</sub>-Glieder). Das System ist schwingungsfähig.

### 1.33 Die Ortskurve

Bei der Aufnahme der Übergangsfunktion eines Gliedes wird die Eingangsgröße  $x_e$  sprunghaft verstellt. Das Verhalten des Ausgangs ist dann charakteristisch für das betreffende Glied (kleine Verzögerung, große Verzögerung, Totzeit, keine Totzeit, P-Verhalten, I-Verhalten, D-Verhalten, usw.).

Eine besonders umfassende Charakterisierung des zu untersuchenden und zu beschreibenden Gliedes erhält man, wenn die Eingangsgröße eine harmonische Schwingung ist und die Untersuchung nacheinander mit verschiedenen Frequenzen durchgeführt wird. Jedes Glied gibt dann einen anders gearteten Ausgang. Daraus lassen sich Schlüsse über das Verhalten des betreffenden Gliedes ziehen.

Wartet man den eingeschwungenen Zustand ab, dann führt bei linearen Gliedern (und darauf beschränken wir uns) der Ausgang auch Schwingungen der gleichen Frequenz aus, die im allgemeinen phasenverschoben sind und andere Amplitude haben. Dem Ausgang werden die Eingangsschwingungen aufge-

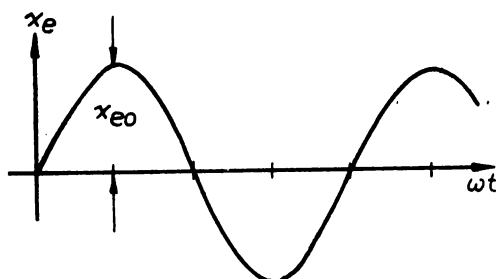


Bild 24

$$x_e = x_{eo} \cdot \sin \omega t$$

zwungen. Denken Sie als Beispiel an eine Schwingungsuntersuchung des schon bekannten Vierpols. (Bild 25). Bei "langsamen" Eingangsschwingungen wird die Ausgangsspannung in bestimmtem Maße phasenverschoben mit geringerer Amplitude mitschwingen, bei sehr "schnellen" Eingangsschwingungen wird die Ausgangsspannung - der Speicherwirkung des Kondensators wegen - kaum noch "mitkommen", die Amplitude der Ausgangsschwingung wird sehr gering sein.

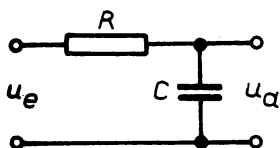


Bild 25

Zu einer solchen Untersuchung mit Schwingungen gehört ein Schwingungsgeber (z.B. Frequenzgenerator) und ein Aufschreibegerät für Eingangs- und Ausgangsschwingung (Doppelschreiber, Zweistrahloszillograph). Dann kann man  $x_{eo}$ ,  $x_{ao}$ ,  $\omega$  und  $\varphi$  bestimmen.

Es gibt auch moderne Geräte, die die interessierenden Werte direkt anzeigen. Bei der Untersuchung von elektrischen Gliedern denke man bei den verwendeten Frequenzen an Hz und kHz,

bei der Untersuchung von verfahrenstechnischen Anlagen (Öfen, Druckkessel u.ä.) denke man an  $10^{-3}$  Hz und weniger.

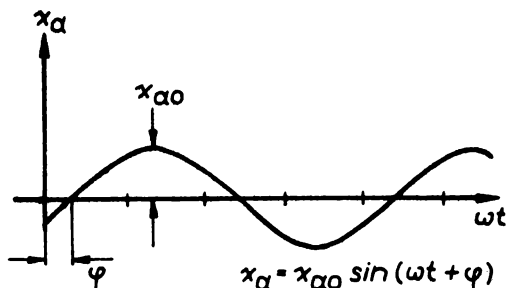


Bild 26

Es ist wohl jedem deutlich, daß z.B. die Verstellung eines Kaminchiebers mit etwa 2 Hz unsinnig ist.

Die Schwingungsuntersuchung wird nun so durchgeführt, daß verschiedene auf das zu untersuchende Glied zugeschnittene

Frequenzen der Eingangsschwingung eingestellt werden. Die Amplitude der Eingangsschwingung wird "günstig" gewählt. Sie darf beispielsweise nicht so groß genommen werden, daß der Ausgang an die "Anschläge" kommt (Sättigung bei Verstärkern, Anschläge von Ventilen, usw.).

Bei der Auswertung der Schwingungsuntersuchung wird man natürlich die gemessene Ausgangsamplitude auf die Eingangsamplitude beziehen, damit das Ergebnis von der gewählten Eingangsamplitude unabhängig wird. Man bezieht auf den "Einheitseingang".

Das Ergebnis der Schwingungsuntersuchung wird eine übersichtliche Zusammenstellung der eingestellten, gemessenen und errechneten Werte sein.

Eingestellt		Gemessen		Errechnet
$\omega$	$x_{e0}$	$x_{a0}$	$\varphi$	$ F  = \frac{x_{a0}}{x_{e0}}$
$\omega_1$	$x_{e01}$	$x_{a01}$	$\varphi_1$	$ F_1 $
$\omega_2$	$x_{e02}$	$x_{a02}$	$\varphi_2$	$ F_2 $
$\omega_3$	$x_{e03}$	$x_{a03}$	$\varphi_3$	$ F_3 $
:	:			
:	:	usw.		

Bild 27



Eingestellt		Gemessen		Errechnet
$\omega / \frac{1}{s}$	$x_{eo}/v$	$x_{ao}/v$	$\varphi / ^\circ$	$ F  = \frac{x_{ao}}{x_{eo}}$
0	10	10	0	1
0,5	5	4,45	-26,6	0,89
1	5	3,5	-45,0	0,70
1,5	5	2,8	-56,3	0,56
2	5	2,25	-63,4	0,45
2,5	2	0,74	-68,2	0,37
3	2	0,64	-71,6	0,32
⋮				
50	2	0,04	-89	0,02

Bild 28

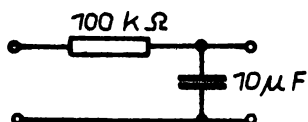


Bild 29

Diese Tabelle charakterisiert das untersuchte Glied. Sieht die Tabelle z.B. so aus (Bild 28) - dabei ist an die Untersuchung des Vierpols von Bild 29 gedacht -, läßt sich folgendes ablesen:

Bei  $\omega = 0$  (keine Schwingung, Eingangsspannung wird einfach konstant eingestellt) überträgt das Glied 1 : 1. Die Phasenverschiebung ist natürlich im eingeschwungenen Zustand

(es sind ja ( $\omega = 0$ ) gar keine Schwingungen da) null.

Für wachsende Frequenzen ergeben sich wachsende Phasennachteilungen, die für sehr große Frequenzen gegen  $90^\circ$  gehen. Das Amplitudenverhältnis

nimmt für wachsende Frequenzen ab und geht gegen null, da der Ausgang bei sehr großen Frequenzen "nicht mehr mitkommt".

Nun drängt es den Techniker natürlich, den Tabelleninhalt graphisch anschaulich darzustellen. Es muß dargestellt werden:

1. Das Amplitudenverhältnis  $\frac{x_{ao}}{x_{eo}}$  in Abhängigkeit von  $\omega$
2. Die Phasenverschiebung  $\varphi$  in Abhängigkeit von  $\omega$

Das geht verschieden zu machen.

Es gibt folgende Möglichkeiten:

Das Amplitudenverhältnis wird als Länge unter dem durch die Phasenverschiebung angegebenen Winkel gezeichnet und  $\omega$  als Parameter an den entstehenden Zeiger geschrieben.

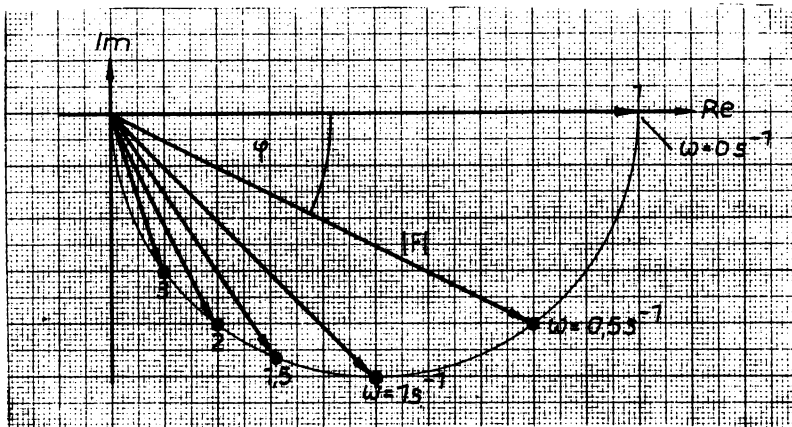


Bild 30

Die Verbindungslinie der Zeigerspitzen ist die Ortskurve des betreffenden Gliedes.

Die Ortskurve ist eine graphische Darstellung der Untersuchungsergebnisse mittels Schwingungen.

Man kann die graphische Darstellung der Tabelle auch so vornehmen:

1. Das Amplitudenverhältnis wird in Abhängigkeit von  $\omega$  dargestellt.
2. In einem anderen Diagramm wird die Phasenverschiebung in Abhängigkeit von  $\omega$  dargestellt.

Diese Darstellungsart wird Amplituden- Phasen - Diagramm (Bode - Diagramm) genannt.

Werden auf den Achsen nicht  $\omega$ ,  $\frac{x_{ao}}{x_{eo}}$ ,  $\varphi$ , sondern  $\ln \omega$ ,  $\ln \frac{x_{ao}}{x_{eo}}$ ,  $\ln \varphi$  aufgetragen, so ergeben sich besonders übersichtliche Kurvenzüge.

Der versierte Regelungstechniker wird - zumindest auf elektrischem Gebiet - diese Darstellungsart bevorzugen.

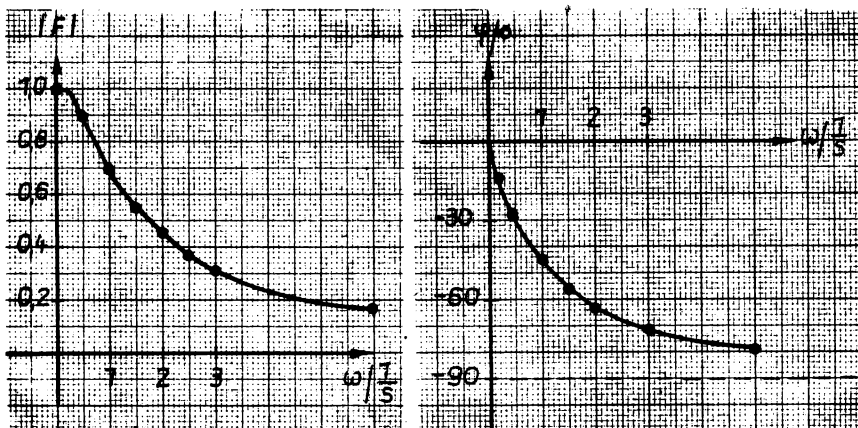


Bild 31

Stabilitätsuntersuchungen, vor allem wenn sie schwierige Aufgaben betreffen, sind im Bode-Diagramm übersichtlicher durchzuführen als mit der Ortskurvendarstellung.

Wir wollen hier nur die Ortskurvendarstellung weiter benutzen.

### 1.34 Der Frequenzgang

Die beschreibende Differentialgleichung eines Gliedes

$$\dots + a_2 \ddot{x}_a + a_1 \dot{x}_a + a_0 x_a = e_0 x_e + e_1 \dot{x}_e + \dots$$

ergibt für  $x_e = \text{konstant} = \sqrt{c}$  (Eingang = Sprungeingang) die arithmetische Formulierung der Übergangsfunktion

$$\dots + a_2 \ddot{x}_a + a_1 \dot{x}_a + a_0 x_a = e_0 c$$

Ebenso ergibt die allgemeine Differentialgleichung für  $x_e = x_{e0} \sin \omega t$  (Schwingung) die arithmetische Formulierung der Ortskurve. Dabei ergeben sich einfache Beziehungen, wenn die Schwingungen komplex dargestellt werden. Von den dadurch möglichen Vereinfachungen macht ja insbesondere die Elektrotechnik Gebrauch (komplexe Rechnung der Wechselstromtechnik). Die Möglichkeit der komplexen Darstellung von Schwingungen muß Ihnen von der Mathematik her bekannt sein.

$$\text{Eingang} = x_e = x_{e0} e^{j\omega t}$$

$$\text{Phasenverschobener Ausgang} = x_a = x_{a0} e^{j(\omega t + \varphi)}$$

Die Ableitungen dieser Größen werden besonders einfach.

Dabei sei noch abgekürzt  $\omega j = p$  geschrieben.

$$x_e = x_{e0} e^{pt} = x_e(p)$$

$$\dot{x}_e = x_{e0} e^{pt} \cdot p = p \cdot x_e(p)$$

$$\ddot{x}_e = x_{e0} e^{pt} \cdot p^2 = p^2 \cdot x_e(p)$$

$\vdots$

$$x_a = x_{a0} e^{pt + j\varphi} = x_a(p)$$

$$\dot{x}_a = x_{a0} e^{pt + j\varphi} \cdot p = p \cdot x_a(p)$$

$$\ddot{x}_a = x_{a0} e^{pt + j\varphi} \cdot p^2 = p^2 \cdot x_a(p)$$

Eine komplex dargestellte Schwingungsgröße wird also abgeleitet, indem man sie mit  $p$  multipliziert. Aus der Rechenoperation Differenzieren ist die weit einfachere Rechenoperation Multiplizieren geworden.

Werden die Ausdrücke für  $x_e$ ,  $\dot{x}_e$ , ...,  $x_a$ ,  $\dot{x}_a$ , ... in die Differentialgleichung eingesetzt, so erhält man

$$(\dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) x_a(p) = (e_0 + e_1 p + \dots) x_e(p)$$

$$x_a(p) = \frac{e_0 + e_1 p + \dots}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots} \cdot x_e(p)$$

$$x_a(p) = F(p) \cdot x_e(p)$$

$$\text{Man nennt } F(p) = \frac{x_a(p)}{x_e(p)} = \frac{e_0 + e_1 p + \dots}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots}$$

den Frequenzgang des betreffenden Gliedes.

Wie man den Frequenzgang formal aus der Differentialgleichung erhält, ist leicht ersichtlich:

Ableitung durch Multiplikation mit  $p$  ersetzen;  $\frac{x_a}{x_e}$  bilden.

Der Frequenzgang ist das Verhältnis des als Schwingung komplex dargestellten Ausgangs zu dem als Schwingung komplex dargestellten Eingang.

Der Frequenzgang ist eine von  $\omega$  abhängige komplexe Zahl, deren Darstellung in der komplexen Ebene mit  $\omega$  als Parameter die Ortskurve ergibt.

### Beispiele von Frequenzgängen:

#### 1. Beispiel: RC - Glied

Aus  $R C \dot{u}_a + u_a = u_e$  folgt der Frequenzgang

$$F(p) = \frac{u_a(p)}{u_e(p)} = \frac{1}{1 + R C p}$$

#### 2. Beispiel: Motor als P-Glied

Aus  $\frac{\theta}{k c} \Delta \dot{\omega} + \Delta \omega = \frac{1}{k} \cdot \Delta u$  folgt

$$F(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta u(p)} = \frac{\frac{1}{k}}{1 + \frac{\theta}{k c} p}$$

#### 3. Beispiel: Motor als I-Glied

Aus  $\frac{\theta}{k c} \Delta \dot{\alpha} + \Delta \alpha = \frac{1}{k} \int \Delta u dt$  folgt

$$F(p) = \frac{\Delta \alpha(p)}{\Delta u(p)} = \frac{\frac{1}{k} \cdot \frac{1}{p}}{1 + \frac{\theta}{k c} p}$$

#### 4. Beispiel: Tachodynamo

Aus  $u_a = \frac{k}{2\pi} \dot{\alpha}$  folgt  $\frac{u_a(p)}{\alpha(p)} = \frac{k}{2\pi} \cdot p$

#### 5. Beispiel: Spannungsteiler

Aus  $x_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} x_e$  folgt  $F(p) = \frac{x_a(p)}{x_e(p)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

## 6. Beispiel: Masse - Feder - System mit Dämpfung

Aus  $\frac{m}{c} \ddot{x}_a + \frac{d}{c} \dot{x}_a + x_a = x_e$  folgt  $F(p) = \frac{1}{1 + \frac{d}{c} p + \frac{m}{c} p^2}$

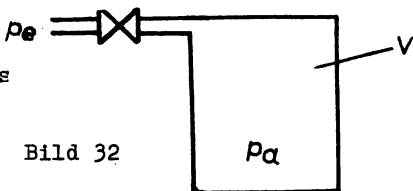
## 7. Beispiel: Pneumatisches Drossel - Speicher - System

In der Kammer (Volumen  $V$ , Druck  $p_a$ ) wird sich bei Anlegen eines konstanten Eingangsdruckes

$p_e$  über die Drossel (Öffnungsfläche  $A$ ) der Druck  $p_a$  verzögert aufbauen. Näherungsweise

gilt für die eingebrachte Luftmenge pro Zeiteinheit bei angenommener laminarer Strömung  $\frac{dM}{dt} = k_1 A (p_e - p_a)$ . Da das Volumen der Kammer konstant bleibt, muß der Druck steigen. Der Druckanstieg ist dem Mengenzuwachs  $dM$  und dem reziproken Volumen  $\frac{1}{V}$  proportional:

Bild 32



$$dp_a = k_2 \frac{dM}{V} \quad \text{und} \quad \frac{dM}{dt} = \frac{V}{k_2} \frac{dp_a}{dt}$$

Oben eingesetzt erhält man:

$$\frac{V}{k_1 k_2 A} \dot{p}_a + p_a = p_e$$

Diese Gleichung hat wie schon die Gleichung des RC-Gliedes die Form  $T_s \dot{x}_a + x_a = x_e$

Es ist  $T_s$  die "Zeitkonstante" des "Einspeichersystems".

$T_s$  muß die Dimension einer Zeit haben, weil der erste Summand der linken Seite dieselbe Dimension wie der zweite Summand haben muß.

Als Frequenzgang erhält man  $F(p) = \frac{1}{1 + T_s p}$

Um rechnerisch auf den Frequenzgang zu kommen, muß also die Differentialgleichung aufgestellt und komplex umgeschrieben werden.

Der Begriff des Frequenzganges ist an den Schwingungseingang gebunden. Die Vereinfachungen beim Differenzieren, die das Differenzieren als eine Multiplikation mit dem imaginären Operator  $p = j\omega$  erscheinen lassen, ergeben sich wegen  $x_e = x_{e0} e^{j\omega t}$ . Diese Dinge ordnen sich in einen allgemeinen, nicht an den Schwingungseingang gebundenen Rahmen ein.

Wenn man eine Differentialgleichung der sogenannten Laplace-Transformation unterwirft, so wird aus der Differentialgleichung, in der die Zeit als unabhängige Variable vorkommt (Gleichung im Zeitbereich, im Originalbereich), eine algebraische Gleichung, in der ein komplexer Parameter als unabhängige Variable vorkommt (Gleichung im Bildbereich). Werden der komplexe Parameter mit  $p$  und die transformierten Eingangs- und Ausgangsgrößen  $x_e$  und  $x_a$  mit  $\bar{x}_e$  und  $\bar{x}_a$  bezeichnet, so ergibt sich im Bildbereich der Laplace-Transformation ein Zusammenhang, der formal mit der Frequenzgangbeziehung gleichwertig ist:  $\bar{x}_a = F(p) \bar{x}_e$ .

Inhaltlich kann hier aber  $x_e$  wie  $x_a$  irgendeine Funktion sein (an die allerdings noch gewisse mathematische Forderungen gestellt werden müssen).

Die Ausgangsbildfunktion  $\bar{x}_a$  ergibt sich durch Multiplikation der Eingangsbildfunktion  $\bar{x}_e$  mit  $F(p)$ . Man nennt  $F(p)$  die Übertragungsfunktion. Der Frequenzgang ist ein Sonderfall der Übertragungsfunktion und zwar für den Fall, daß der komplexe Parameter  $p$  rein imaginär ist.

#### 1.4 Vergleichende Bemerkungen

Die genannten Beschreibungsmethoden (Übergangsfunktion, Differentialgleichung, Ortskurve, Frequenzgang) sind - wenigstens theoretisch - gleichwertig.

Aus der einen Beschreibungsart kann man die andere finden. Man wird jeweils die der betreffenden Aufgabe angepaßte, günstige Beschreibungsart wählen.

Die Beschreibung durch Aufnahme der Übergangsfunktion ist sehr anschaulich. Es wird eine Messung des Ausganges für den Sprung-eingang gemacht, also der Einschaltvorgang aufgenommen. Das Verhalten bei dauernd wiederholten Änderungen des Einganges (Eingangsschwingungen) erscheint nicht als aufgenommene Kurve. Die Übergangsfunktion wird meist bei allen "langsamen" Vorgängen, deren praktisch vorkommenden Änderungen langsamer als etwa 1 Hz sind, zur Beschreibung herangezogen. Dazu gehören Temperaturübergänge, Druckübergänge, Flüssigkeitsstandübergänge, Mischungsvorgänge von Flüssigkeiten und Gasen, usw.

Den Elektrotechniker interessieren dagegen häufig nicht nur die Einschaltvorgänge (und damit - näherungsweise berücksichtigt - wenig oft erfolgende Änderungen), sondern auch das Verhalten der zu untersuchenden Glieder innerhalb ganzer Frequenzbereiche. Hier ist die Ortskurvenaufnahme als Untersuchungsmethode am Platze (Untersuchung von elektronischen Verstärkern als Beispiel). Ortskurvenbetrachtungen sind in der Elektrotechnik üblich.

Differentialgleichung und Frequenzgang als rechnerische Beschreibung können einerseits aus der aufgenommenen Ortskurve und in beschränktem Maße auch aus der aufgenommenen Übergangsfunktion entwickelt werden. Man wird aber meist - wenn schon eine graphische Beschreibung vorliegt - auch die weitere Auswertung (etwa Stabilitätsuntersuchungen) mit graphischen Verfahren durchführen.


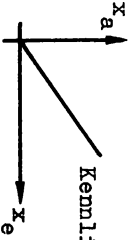
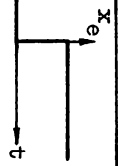
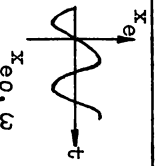
Andererseits ergeben sich die Differentialgleichung und der Frequenzgang aus Gleichungsansätzen. Das ist bei praktischen Beispielen oft nur mit Vereinfachungen und auch dann nur



teils sehr schwierig möglich. Die Auswertung der Rechnung wird meist auf Rechenautomaten (vor allem Analogrechnern) durchgeführt.

Insgesamt ist die gründliche rechnerische Durchdringung von Regelungsvorgängen der Forschung und Entwicklung vorbehalten. Beim routinemäßigen Einsatz von Regelungen, von denen viele ähnliche Beispiele schon bekannt sind, wird man kaum rechnen, sondern etwa aus Übergangsfunktionen die nötigen Hinweise für die Regelung entnehmen oder aber durch sinnvolles Probieren die Regelung optimal gestalten. Sinnvolles Probieren ist eine wissenschaftliche Arbeitsmethode! Es wird in vielen Fällen anderen Methoden ökonomisch überlegen und in den Ergebnissen gleichwertig sein. Das sinnvolle Probieren kann aber nur jemand ausführen, dessen Sinn voll ist von regelungstechnischem Grundwissen. Dieses Grundwissen kann man erwerben mit sehr viel Worten unserer Sprache oder aber mit weniger Worten einer komprimierten technischen Sprache. Komprimierungsmittel ist die Mathematik. In diesem Sinne verstehen Sie bitte die in den vorliegenden Lehrbriefen enthaltenen mathematischen Dinge, Gleichungen, Ableitungen, usw. Wir rechnen, um uns damit schneller als sonst möglich, regelungstechnisches Grundwissen anzueignen. Wir sind uns dabei bewußt, daß unsere Rechnungen häufig nicht der vollen, komplizierten Praxis gerecht werden.

# Übersicht über die Beschreibungsmethoden von linearen Regelkreis- und Steuerkettengliedern

$x_e(t)$  $x_a(t)$			
m e s s e n d			ü b e r g a n g
statisch $x_a = f(x_e)$			A u f s t e l l u n g der statisch beschreibenden Gleichung (falls möglich)
dynamisch $x_a = f(t)$ für be- stimmtes $x_e(t)$	Eingang 	Ausgang Übergangsfunktion = Sprungantwort	grafische Darstel- lung der Lösung der Dgl. für $x_e = \text{konstant}$ → Sprungeingang
		phasenverschobene Schwingung anderer Amplitude gleicher Frequenz $x_{a0}, \omega, \varphi$ grafische Darstel- lung von $\frac{x_{a0}}{x_{e0}}$ und $\varphi$	grafische Darstellung des Frequenzganges in der komplexen Ebene →
			A u f s t e l l u n g der be- schreibenden Differen- tialgleichung mittels entsprechenden Ansatzes (Massensatz, Kräfte- Gleichgewicht, Momenten- Gleichheit, usw.) U m f o r m u n g f ü r E i n - g a n g = S c h w i n g u n g i n k o m p l e x e r D a r s t e l - l u n g F r e q u e n z g a n g = $F = \frac{x_a(j\omega)}{x_e(j\omega)}$

## Wiederholungsfragen:

1. Was heißt statische, was heißt dynamische Beschreibung von Regelkreis- und Steuerkettengliedern?
2. Was sind stetige, was sind unstetige Glieder? Beispiele?
3. Was sind lineare, was sind nichtlineare Glieder? Beispiele?
4. Was sind Impulsglieder, was sind Schaltglieder? Beispiele?
5. Wann ist die messende Untersuchung der rechnenden vorzuziehen?
6. Was ist die Übergangsfunktion eines Gliedes? Geben Sie Beispiele an!
7. Wie kommt man zur Differentialgleichung eines Gliedes? Geben Sie Beispiele an!
8. Warum operiert man in der Regelungstechnik durchweg mit kleinen Buchstaben, die für die Bezeichnung von Differenzen vorgesehen sind, und nicht mit großen Buchstaben, welche die eigentlichen Größen bezeichnen?
9. Was ist die Ortskurve eines Gliedes?
10. Beschreiben Sie, wie die Aufnahme der Ortskurve eines Gliedes vor sich geht!
11. Was ist der Frequenzgang eines Gliedes? Geben Sie Beispiele an!
12. Beschreiben Sie die Aufnahme der Übergangsfunktion an einem selbstgewählten Beispiel!

## 2. Grundglieder

\*\*\*\*\*

In den Beispielen des Abschnittes "Beschreibungsmethoden" fielen bereits die Bezeichnungen

P - Glied,

I - Glied,

D - Glied,

Verzögerungsglied 1. Ordnung,

Verzögerungsglied 2. Ordnung.

Die Grundglieder, aus denen man sich alle anderen Glieder aufgebaut denken kann, seien hier übersichtsmäßig angeführt. Gehen Sie die Tabelle durch, und studieren Sie die dazu gemachten Bemerkungen.

### Bemerkungen zum P-Glied:

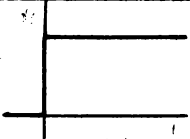

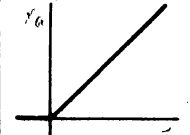
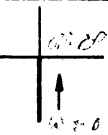
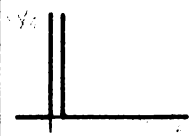
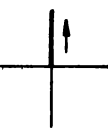
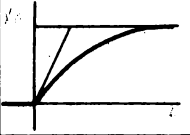
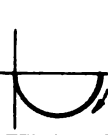
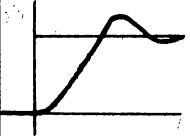

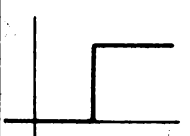

Als P-Glied (auch  $PT_0$ -Glied genannt) sei ein solches mit vernachlässigbaren Verzögerungen bezeichnet (Spannungsteiler, Hebel, elektronische Verstärker, P-Strecken ohne Verzögerung, P-Regler ohne Verzögerung, usw.).

$K$  ist der dimensionsbehaftete Übertragungsfaktor oder die Verstärkung. Die Übergangsfunktion ist die graphische Darstellung von  $x_a = K x_e$  für  $x_e = \text{konstant} = c$ , also von  $x_a = K c$ . Die Ortskurve ist ein Punkt auf der reellen Achse im Abstand  $K$  vom Nullpunkte.

### Bemerkungen zum I-Glied:

Als I-Glied (auch  $IT_0$ -Glied) sei ein solches mit vernachlässigbaren Verzögerungen bezeichnet (Motor mit vernachlässigbarer Verzögerung, hydraulischer Stellantrieb, Integratoren von Analogrechnern, I-Strecken ohne Verzögerung, I-Regler ohne Verzögerung, usw.).

$K_I = \frac{x_a}{x_e}$  ist die bezogene (auf den Einheitseingang bezogene)

Stetige lineare Grundglieder				
Bezeichnung	Übergangsfunktion	Differentialgleichung	Frequenzganggleichung	Ortskurve
P		$\dot{x}_a = K x_e$	$F = K$	
I		$\dot{x}_a = K_I \int x_e dt$	$F = \frac{K_I}{p}$	
D		$\dot{x}_a = K_D \dot{x}_e$	$F = K_D p$	
$T_1$		$T_s \dot{x}_a + x_a = x_e$	$F = \frac{1}{1 + T_s p}$	
$T_2$		$T_2^2 \ddot{x}_a + T_1 \dot{x}_a + x_a = x_e$	$F = \frac{1}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2}$	
$T_t$		$x_a = x_e(t - T_t)$	$F = e^{-T_t p}$	

### Ausgangsgeschwindigkeit.

Die Übergangsfunktion ist die graphische Darstellung von  $x_a = K_I \int x_e dt$  für  $x_e = \text{konstant} = c$ , also von  $x_a = K_I c t$ , wenn als Anfangsbedingung  $x_a(0) = 0$  genommen wurde. Diese Anfangsbedingung ist ja aber immer möglich. Sie läuft auf die Wahl eines geschickten Bezugssystems hinaus.

Die Ortskurve ist wegen  $F(p) = \frac{K_I}{\omega j} = -\frac{K_I}{\omega} \cdot j$  die angegebene Gerade. Der Pfeil gibt an, in welcher Richtung die Ortskurve mit wachsendem  $\omega$  durchlaufen wird.

### Bemerkungen zum D-Glied:

Als D-Glied (auch  $DT_0$ -Glied) sei ein solches mit vernachlässigbaren Verzögerungen bezeichnet. (Tachodynamo, D-Glieder von Analogrechnern, D-Anteile von Reglern, usw.) Ideale D-Glieder gibt es nicht. Stets machen sich Verzögerungen bemerkbar, vor allem bei hohen Frequenzen.

$K_D$  ist die Konstante des D-Gliedes.

Die Übergangsfunktion ist die graphische Darstellung von  $x_a = K_D \dot{x}_e$  für  $x_e = \text{Sprungeingang}$ , also  $\dot{x}_e = 0$  für  $t \neq 0$  und  $x_e = \infty$  für  $t = 0$ .

Die Ortskurve ist wegen  $F(p) = K_D \cdot \omega j$  die angegebene Gerade.

### Bemerkungen zum $PT_1$ -Glied:

Als  $T_1$ -Glied sei ein P-Glied mit dem Übertragungsfaktor 1 und mit Verzögerung erster Ordnung bezeichnet. Die Bemerkungen sollen sich gleich auf ein  $PT_1$ -Glied beziehen, also auf ein P-Glied mit dem allgemeinen Übertragungsfaktor  $K$  und mit Verzögerung 1. Ordnung. Die beschreibende Gleichung eines  $PT_1$ -Gliedes lautet:

$$T_s \dot{x}_a + x_a = K x_e.$$

$T_s$  heißt Zeitkonstante,  $K$  heißt Übertragungsfaktor oder Verstärkung des  $PT_1$ -Gliedes.

Die Übergangsfunktion ist die graphische Darstellung der Lösung der Differentialgleichung für  $x_e = c$ , also die Lösung von  $T_s \dot{x}_a + x_a = K c$  (Anfangsbedingung  $x_a(0) = 0$ ). Man er-

hält nach bekannten Verfahren:

$$x_a(t) = K c \left( 1 - e^{-\frac{1}{T_s} t} \right)$$

Auch ohne Lösung der Differentialgleichung läßt sich schon folgendes aussagen:

$x_a(\infty) = K c$ , denn nach "langer Zeit", d.h. im eingefahrenen Zustand, sind die Änderungen, also  $\dot{x}_a$ , zu null geworden.

$\dot{x}_a(0) = \frac{K c}{T_s}$ , denn zur Zeit  $t = 0$  ist  $x_a = 0$  (Anfangsbedingung).

Die Summe aus Größe ( $x_a$ ) und deren mit  $T_s$  multiplizierten Geschwindigkeit ( $T_s \dot{x}_a$ ) muß konstant sein. Durch die Geschwindigkeit wächst die Größe, damit wird aber die Geschwindigkeit (Steigung) geringer usw. So kommt man "gefühlsmäßig" zum Verlauf der Funktion

$$x_a(t) = K c \left( 1 - e^{-\frac{1}{T_s} t} \right)$$

Zeichnet man in einem beliebigen Punkte der Kurve die Tangente (Bild 33), so ist die Zeitentfernung zwischen diesem Punkte und dem Schnittpunkt der Tangente mit der Geraden

$x_a = K c =$  Endwert immer gleich der Zeitkonstanten. Das folgt aus

$$\dot{x}_a = \frac{K c - x_a}{T_s}$$

Die Zeitkonstante ist also die Zeit, die von einer beliebigen Stelle des Überganges an noch gebraucht würde, um den Endwert zu erreichen, wenn die gerade herrschende Geschwindigkeit bestehen bliebe.

Daraus kann man leicht eine graphische Konstruktion des  $T_1$ -Überganges ableiten. Aus Bild 34 ist diese Konstruktion zu erkennen. Die Funktion ist aus Tangentenstücken zusammengesetzt.

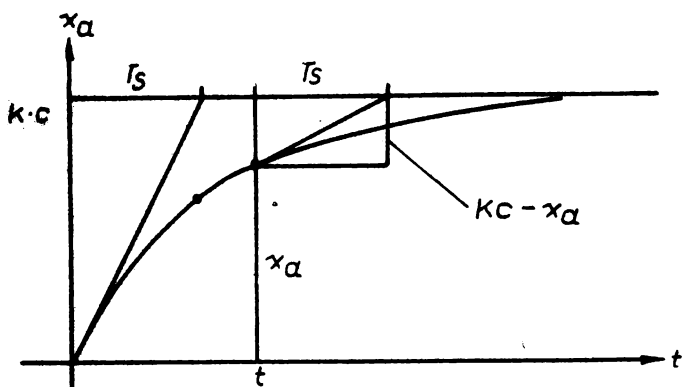


Bild 33

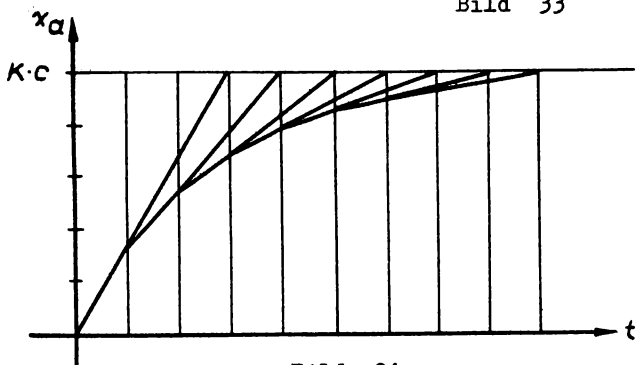


Bild 34

Aus der Lösung der Differentialgleichung kann man noch folgendes entnehmen:

Nach  $t = T_s$  hat  $x_a$  den Wert  $x_a = K c (1 - e^{-1}) = 0,63 K c$   
 $= 63 \% \text{ des Endwertes erreicht.}$

Nach  $t = T_s$  :  $x_a = 63 \% \text{ des Endwertes}$

Nach  $t = 2T_s$  :  $x_a = 86 \% \text{ des Endwertes}$

Nach  $t = 3T_s$  :  $x_a = 95 \% \text{ des Endwertes}$

Nach  $t = 4T_s$  :  $x_a = 98 \% \text{ des Endwertes}$

Nach Ablauf der 3-fachen Zeitkonstante ist also der Übergang praktisch so gut wie abgeschlossen.

Die Ortskurve des  $PT_1$ -Gliedes ergibt sich als graphische Darstellung des Frequenzganges in der komplexen Ebene.



$$F(p) = \frac{K}{1 + T_s \omega j} = \frac{K}{1 + T_s \omega j} \cdot \frac{1 - T_s \omega j}{1 - T_s \omega j}$$

$$F(p) = \frac{K}{1 + (T_s \omega)^2} - \frac{K T_s \omega}{1 + (T_s \omega)^2} j \quad j = \operatorname{Re}(\omega) + \operatorname{Im}(\omega) \cdot j$$

Man sieht schon: Für  $\omega = 0$  ist:  $\operatorname{Re} = K$ ,  $\operatorname{Im} = 0$

Für  $\omega \rightarrow \infty$  ist:  $\operatorname{Re} = 0$ ,  $\operatorname{Im} = 0$

Realteil immer positiv für alle  $\omega$

Imaginärteil immer negativ für alle  $\omega$

Weitere eingesetzte  $\omega$ -Werte ergeben den genauen Verlauf der Ortskurve. Man kann mit Mitteln der analytischen Geometrie (Parameterdarstellung von Kurven) leicht zeigen, daß die Form der  $PT_1$ -Ortskurve ein Halbkreis ist.

Aus  $\tan \varphi = \frac{\text{Imaginärteil}}{\text{Realteil}} = -T_s \cdot \omega$  folgt für  $\varphi = -45^\circ$

$T_s = \frac{1}{\omega_{45^\circ}}$  Die Zeitkonstante ist also gleich der reziproken Frequenz, die einen Phasenwinkel von  $-45^\circ$  zur Folge hat.

#### Bemerkungen zum $T_2$ -Glied:

Als  $T_2$ -Glied sei ein P-Glied mit dem Übertragungsfaktor 1 und mit Verzögerung 2. Ordnung bezeichnet. (Masse-Feder-System mit Dämpfung, RLC-Schwingkreise, usw.)

Um anzudeuten, daß der Koeffizient der zweiten Ableitung die Dimension (Zeit)<sup>2</sup> haben muß, ist er als  $T_2^2$  geschrieben.

Die Übergangsfunktion erhält man experimentell oder als graphische Darstellung der Lösung der Differentialgleichung für  $x_e = c$ .

$T_2^2 \ddot{x}_a + T_1 \dot{x}_a + x_a = c$  Zur Lösung macht man die Substitution  $x_a - c = z$  und erhält die homogene Differentialgleichung

$T_2^2 \ddot{z} + T_1 \dot{z} + z = 0$ , deren charakteristische Gleichung

$T_2^2 \lambda^2 + T_1 \lambda + 1 = 0$  folgende Wurzeln hat:

$$\lambda^2 + \frac{T_1}{T_2^2} \lambda + \frac{1}{T_2^2} = 0$$

$$\lambda_{1/2} = -\frac{T_1}{2T_2^2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4T_2^4} - \frac{1}{T_2^2}}$$

$$\lambda_{1/2} = -\frac{T_1}{2T_2^2} \pm \frac{1}{2T_2^2} \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}$$

Es sind nun die Lösungsfälle

$T_1^2 - 4T_2^2 > 0$ , d.h.  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ , beide reell

$T_1^2 - 4T_2^2 = 0$ , d.h.  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , reell

$T_1^2 - 4T_2^2 < 0$ , d.h.  $\lambda_1 = -\sigma + \omega \cdot j$   
 $\lambda_2 = -\sigma - \omega \cdot j$ , Wurzeln einander  
 konjugiert komplex

zu unterscheiden.

Im Falle  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ , beide Wurzeln reell, ist die allgemeine Lösung:

$$z = C_1 e^{\lambda_1 \cdot t} + C_2 e^{\lambda_2 \cdot t}$$

Im Falle  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , Doppelwurzel reell, ist die allgemeine Lösung:

$$z = (C_1 t + C_2) e^{\lambda t}$$

Im Falle  $\lambda_1 = -\delta + \omega j$

$\lambda_2 = -\delta - \omega j$  ist die allgemeine Lösung:

$$z = C_1 e^{-\delta t} \sin(\omega t + C_2).$$

Es können also als Übergangsfunktionen des  $PT_2$ -Gliedes neben den aperiodischen Übergängen gedämpfte Schwingungen oder Dauerschwingungen konstanter Amplitude ( $\delta = 0$ ) auftreten.

( $\delta = -\frac{T_1}{2 T_2^2}$  ist nie positiv, also kann es entdämpfte aufklingende Schwingungen nicht geben.)

Von  $z$  läßt sich leicht auf  $x_a$  schließen:

$$x_a = z + c$$

Die Integrationskonstanten  $C_1$  und  $C_2$  müssen dann noch aus den Anfangsbedingungen bestimmt werden. Eine technisch sehr häufig vorkommende Anfangsbedingung ist die Bedingung: Das System sei zur Zeit 0 energielos, d.h. es enthalte keine potentielle Energie  $x_a(0) = 0$  und auch keine kinetische Energie  $\dot{x}_a(0) = 0$ .

$\delta$  ist die Abklingkonstante,  $\omega$  die Eigenfrequenz des  $PT_2$ -Gliedes. Die erste Überschwingweite findet man als

$$x_1 = c e^{-\frac{\pi \delta}{\omega}},$$

wenn  $c$  der sich einstellende Endwert ist.

Weiter ist das Amplitudenverhältnis  $\frac{x_2}{x_1}$ , allgemein  $\frac{x_n + 1}{x_n}$  (alle diese Verhältnisse sind einander gleich) für die Beurteilung des Einschwingverhaltens wesentlich.

Es ist

$$\frac{x_n + 1}{x_n} = e^{-\frac{\pi \delta}{\omega}}$$

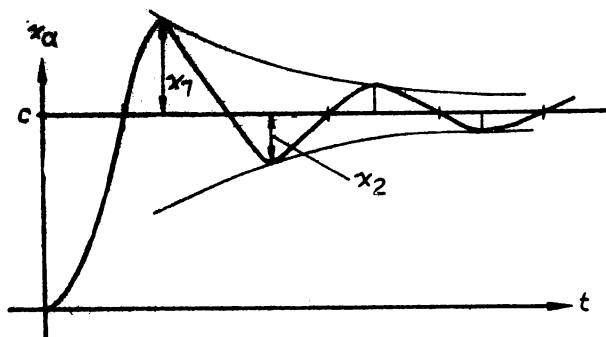


Bild 35

Als Dämpfungszahl  $D$  bezeichnet man das Verhältnis  $D = \frac{\delta}{\omega_0}$ ,  
wobei  $\omega_0$  die Kreisfrequenz jener harmonischen Schwingung  
ist, die sich ohne Dämpfung einstellen würde (bei  $T_1 = 0$ ),  
also  $\omega_0 = \frac{1}{T_2}$

$$D = \frac{T_1}{2 T_2}$$

Diese dimensionslose Dämpfungszahl  $D$  (auch Dämpfungsgrad  
genannt) gilt für alle Lösungen der Differentialgleichung  
 $T_2 \ddot{z} + T_1 \dot{z} + z = 0$

$D = 0$  : Dauerschwingungen konstanter Amplitude

$D < 1$  : Gedämpfte Schwingungen

$D \geq 1$  : Aperiodisches Einschwingen

Es besteht noch die Beziehung

$$D = \frac{\ln \frac{x_n}{x_{n+1}}}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{x_n}{x_{n+1}}\right)^2}},$$

die man leicht aus dem Vorhergehenden ableiten kann.

Die Ortskurve zieht sich mit negativen Phasenwinkeln durch  
zwei Quadranten. Die Phasenverschiebung geht für  $\omega \rightarrow \infty$   
gegen  $-180^\circ$ . Das ergibt sich durch Diskussion und Darstel-

lung des Frequenzganges.

$$F(p) = \frac{1}{1 + T_1 \omega j - T_2^2 \omega^2} \cdot \frac{1 - T_2^2 \omega^2 - T_1 \omega j}{1 - T_2^2 \omega^2 - T_1 \omega j}$$

$$= \frac{1 - T_2^2 \omega^2}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega)^2} - \frac{T_1 \omega}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega)^2} j$$

$$\tan \varphi = - \frac{T_1 \omega}{1 - T_2^2 \omega^2}$$

Der Imaginärteil ist negativ für alle  $\omega$ . Der Realteil ist positiv für  $\omega < \frac{1}{T_2}$ , negativ für  $\omega > \frac{1}{T_2}$  und null für  $\omega = \frac{1}{T_2}$ .

Zu  $\varphi = 0$  gehört wegen  $\tan 0 = 0$  die Frequenz  $\omega = 0$ .

Zu  $\varphi = -90^\circ$  gehört wegen  $\tan(-90^\circ) = -\infty$  die Frequenz

$$\omega = \frac{1}{T_2}$$

Zu  $\varphi = -180^\circ$  gehört wegen  $\tan(-180^\circ) = 0$  die Frequenz

$$\omega = \infty$$

So ergibt sich der in der Übersicht angegebene prinzipielle Verlauf der Ortskurve.

#### Bemerkungen zum $T_t$ -Glied:

Zu den Grundgliedern gehört noch das Totzeitglied. Das ist ein Glied, welches eine Eingangsgröße erst nach Ablauf der Totzeit weitergibt (Transportbänder, Mischungsvorgänge, Laufzeit durch Rohrleitungen, usw.).

Die formelmäßige Beschreibung der Übergangsfunktion wird möglich mit folgender Vereinbarung:

Alle Funktionen negativer Argumente seien identisch null.

Dann bedeutet  $x_a = x_e(t - T_t)$   $x_a = 0$  für  $t < T_t$

$x_a = x_e$  für  $t \geq T_t$ .

Der Verschiebungssatz der Laplace - Transformation führt zu dem Frequenzgang

$$F(p) = e^{-T_t \omega j},$$

den man sich auch anschaulich deutlich machen kann:

$|F| = 1$ , d.h.  $|x_a| = |x_e|$  für alle Frequenzen.

$\varphi = -T_t \cdot \omega$ , d.h. die Phasenverschiebung (Phasennachstellung) wird mit höheren Frequenzen immer größer.

Die Ortskurve ist ein Kreis, der mit wachsenden Frequenzen immer wieder im negativen Drehsinn durchlaufen wird.

Die Ableitung des Totzeit-Frequenzganges über die Laplace-Transformation muß Ihnen nicht unbedingt bekannt sein. Sie können auch einfach zur Kenntnis nehmen:

$$e^{-T_t \cdot p}$$

ist die Darstellung von Totzeit in der Frequenzgangsprache.

### Wiederholungsfragen:

1. Was sind P-, I-, D-,  $T_1$ -,  $T_2$ -,  $T_t$ -Glieder?  
Nennen Sie Beispiele!
2. Skizzieren Sie die Übergangsfunktionen und die Ortskurven von P-, I-, D-,  $T_1$ -,  $T_2$ -,  $T_t$ -Gliedern!
3. Nennen Sie die Differentialgleichungen und die Frequenzgänge von P-, I-, D-,  $T_1$ -,  $T_2$ -,  $T_t$ -Gliedern!
4. Erläutern Sie die Begriffe: Übertragungsfaktor des P-Gliedes, bezogene Ausgangsgeschwindigkeit des I-Gliedes, Zeitkonstante des  $T_1$ -Gliedes, Eigenfrequenz des  $T_2$ -Gliedes, Dämpfung des  $T_2$ -Gliedes!

## Aufgaben:

1. Entwickeln Sie Differentialgleichung, Übergangsfunktion (für  $\Delta \vartheta = \sqrt{C} = 20 \text{ grd}$ ), Frequenzgang und Ortskurve eines mit vernachlässigbarer Verzögerung arbeitenden Temperatursenders, von dem bekannt sei, daß er bei  $10 \text{ grd}$  Temperaturänderung  $0,2 \text{ at}$  Druckänderung abgibt (Lineare Verhältnisse seien vorausgesetzt)!
2. Entwickeln Sie Differentialgleichung, Übergangsfunktion (für  $\Delta p = \sqrt{C} = 0,1 \text{ at}$ ), Frequenzgang und Ortskurve eines I-Reglers für Druck, der so eingestellt ist, daß er bei einer Druckänderung von  $0,05 \text{ at}$  mit einer Stellgeschwindigkeit von  $2 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  ein Ventil verstellt (Lineare Verhältnisse seien vorausgesetzt)!
3. Entwickeln Sie Differentialgleichung, Übergangsfunktion (für  $I_e = \sqrt{C} = 10 \text{ mA}$ ), Frequenzgang und Ortskurve eines D-Gliedes mit Eingang = Strom =  $I_e$ , Ausgang = Druck =  $p_a$ ,  $K_D = 0,1 \frac{\text{mm WS}}{\text{A/s}}$ !
4. Entwickeln Sie Differentialgleichung, Übergangsfunktion (für  $p_e = \sqrt{C} = 100 \text{ mmWS}$ ), Frequenzgang und Ortskurve eines pneumatischen Einspeichersystems mit  $T_s = 30 \text{ s}$ ! (Konstruieren Sie die Übergangsfunktion näherungsweise!)
5. Wie groß muß die Induktivität der angegebenen Schaltung

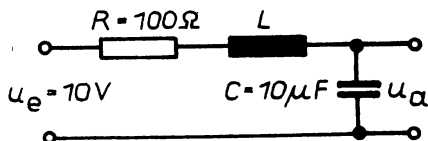


Bild 36

mindestens sein, damit nach dem Einschalten der Eingangsspannung von  $10 \text{ V}$  Gleichspannung der Ausgang gedämpfte Schwingungen ausführt?

Geben Sie für  $L = 50 \text{ mH}$  Differentialgleichung, Übergangsfunktion (für  $u_e = \sqrt{C} = 10 \text{ V}$ , Anfangsbedingungen  $u_a(0) = u_a(0) = 0$ ), Frequenzgang und Ortskurve an!

6. Aus der experimentell aufgenommenen Einschwingkurve eines Masse-Feder-Systems wurde eine Eigenfrequenz von  $2 \frac{1}{s}$  und ein Amplitudenverhältnis  $x_1/x_2 = 4/1$  bei einer Einschwingung des Ausganges von 0 auf 10 cm gemessen. Der elektrische Eingang des Masse-Feder-Systems betrug dabei 5 V. Wie lautet unter Annahme linearer Verhältnisse die Differentialgleichung des Systems ( $x = \text{Weg} = \text{Ausgang}$ ,  $u = \text{Spannung} = \text{Eingang}$ )?
7. Entwickeln Sie Differentialgleichung, Übergangsfunktion, Frequenzgang und Ortskurve für ein Transportband von 10 m Länge, welches mit der Geschwindigkeit  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  läuft ( $x_e = \text{Aufgabe in } \frac{\text{kg}}{\text{min}}$ ,  $x_a = \text{Abgabe in } \frac{\text{kg}}{\text{min}}$ )!
- 8.

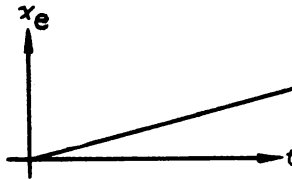


Bild 37

Skizzieren Sie die Ausgänge von P-, I-, D-,  $T_1$ -,  $T_2$ -,  $T_t$ -Gliedern für den im Bild 37 skizzierten Eingang.

9. Skizzieren Sie die Ausgänge der Grundglieder, wenn der Eingang den Verlauf von Bild 38 hat!

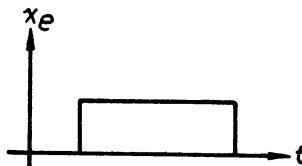


Bild 38



### 3. Verbindungsmöglichkeiten von Regelkreis- und Steuerkettengliedern

=====

In der Steuerkette bzw. in Teilen des Regelkreises liegen Glieder hintereinander oder parallel, der gesamte Regelkreis ist eine Gegeneinanderschaltung (Kreisschaltung) von Strecke und Regler. Diese 3 Schaltungsarten lassen sich durch die Differentialgleichungen oder die Frequenzgänge der Einzelglieder beschreiben. Die Beschreibung mit Differentialgleichungen läuft auf Systeme von gekoppelten Differentialgleichungen, die sich zu einer Differentialgleichung vereinigen lassen, hinaus. Das ist sehr umständlich. Weitaus eleganter ist die Verwendung der Frequenzgänge. Das soll geschehen. Dabei wird Rückwirkungsfreiheit der einzelnen Glieder vorausgesetzt.

Rückwirkungsfreie Zusammenschaltung von Gliedern bedeutet, daß der Signalfluß durch die Glieder nur in einer Richtung erfolgt.

Beispiele für rückwirkungsfreie Schaltung:

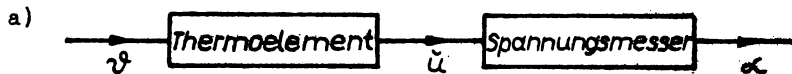


Bild 39

Die Temperatur  $\vartheta$  beeinflusst die Spannung  $\ddot{u}$  des Thermoelementes und diese Spannung  $\ddot{u}$  den Ausschlag  $\alpha$  eines Spannungsmessers. Die Spannung  $\ddot{u}$  hat natürlich keinen Einfluß auf die Temperatur  $\vartheta$ , wie auch der Ausschlag  $\alpha$  rückwirkend keinen Einfluß auf die Spannung  $\ddot{u}$  hat.

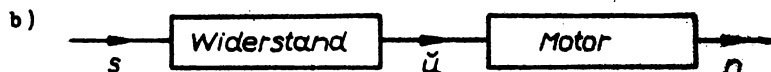


Bild 40

Der Einstellweg  $s$  eines Widerstandes beeinflusst eine Spannung  $\ddot{u}$  und diese die Drehzahl  $n$  eines Motors. Umgekehrt liegt keine

a)

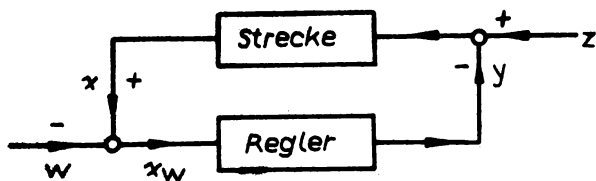


Bild 41

Die Führungsgröße  $w$  beeinflusst die Regelabweichung  $x_w$ , die Regelabweichung  $x_w$  beeinflusst die Stellgrößenabweichung  $y$ , die Stellgrößenabweichung  $y$  beeinflusst die Regelgrößenabweichung  $x$  und die Regelgrößenabweichung  $x$  beeinflusst nun ihrerseits die Regelabweichung  $x_w$ . Hier wird zwar rückwärts gekoppelt beeinflusst, aber alle Glieder werden von den Signalen nur in einer Richtung durchlaufen. Die Zusammenschaltung der Glieder ist rückwirkungsfrei.

Beispiele für rückwirkende Schaltung:

a)

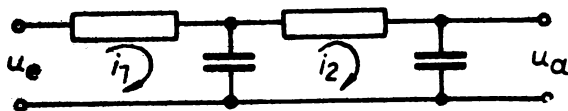


Bild 42

Die beiden RC-Vierpole (Bild 43 und Bild 44) sind hier rückwirkend zusammengeschaltet, denn selbstverständlich beeinflusst der Maschenstrom  $i_2$ , der das  $u_{a2} = u_a$  bestimmt, auch die Spannung  $u_{a1}$ . Der Ausgang des 2. Gliedes beeinflusst also rückwirkend den Ausgang des 1. Gliedes

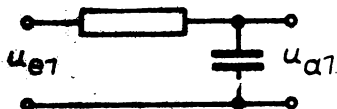


Bild 43

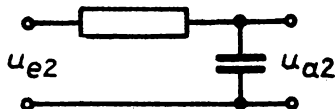
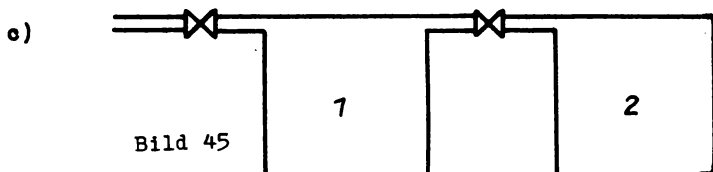


Bild 44

Rückwirkungsfrei können die beiden Verzögerungsvierpole durch Zwischenschaltung eines 1 : 1 übertragenden Verstärkers geschaltet werden. In Modellregelkreisen und Analogrechnern macht man davon Gebrauch.

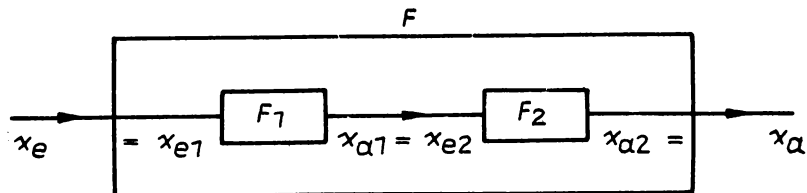
- b) Eine Temperaturregelstrecke, bestehend aus elektrischem Heizkörper, Wandung, Luft, zu erwärmendem Gut und Temperaturfühler stellt eine rückwirkende "Zusammenschaltung" der einzelnen Teile dar, denn alles beeinflusst sich gegenseitig. Insgesamt gesehen wirkt aber die Heizleistung auf den Temperaturfühler und der Temperaturfühler nicht auf die Heizung. Die gesamte Strecke (und nur die interessiert ja) ist ein rückwirkungsfreies Glied, das man sich aber aus einer komplizierten rückwirkenden Zusammenschaltung einzelner Teile aufgebaut denken kann.



Die beiden pneumatischen Speichersysteme in Bild 45 sind rückwirkend zusammengesaltet, denn das Geschehen im Speicher 2 (man denke ihn zertrümmert!) beeinflusst natürlich rückwärts das Geschehen im Behälter 1.

Die folgenden Beziehungen gelten für die Verbindung von rückwirkungsfreien Gliedern. Das wird durch die in einer Richtung laufenden Signalflußpfeile dargestellt.

### 3.1 Hintereinanderschaltung



**Aufgabenstellung:** Wie wird bei der Hintereinanderschaltung zweier Glieder mit den Frequenzgängen  $F_1$  und  $F_2$  der Gesamtfrequenzgang  $F$  aus den Einzelfrequenzgängen bestimmt?

**Lösung:** Wiederholte Anwendung von: Ausgang = Frequenzgang mal Eingang führt auf  $x_a = F_2 F_1 x_e$

$$F = \frac{x_a}{x_e} = F_1 F_2$$

Der Gesamtfrequenzgang der Hintereinanderschaltung von Gliedern ist gleich dem Produkt der Einzelfrequenzgänge.

### 3.2 Parallelschaltung

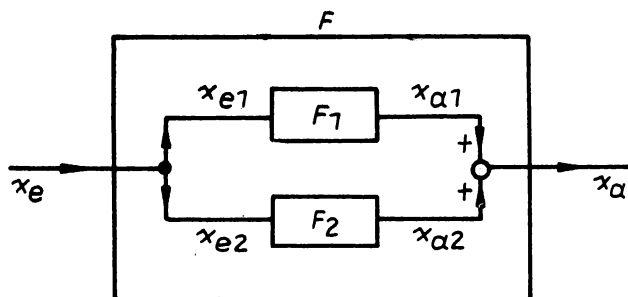


Bild 47

**Aufgabenstellung:** Wie wird bei der Parallelschaltung zweier Glieder mit den Frequenzgängen  $F_1$  und  $F_2$  der Gesamtfrequenzgang  $F$  aus den Einzelfrequenzgängen bestimmt?

**Lösung:**  $x_a = x_{a1} + x_{a2} = F_1 x_{e1} + F_2 x_{e2} = (F_1 + F_2) x_e$

$$F = \frac{x_a}{x_e} = F_1 + F_2$$

Der Gesamtfrequenzgang der Parallelschaltung von Gliedern ist gleich der Summe der Einzelfrequenzgänge.

### 3.3 Gegeneinanderschaltung

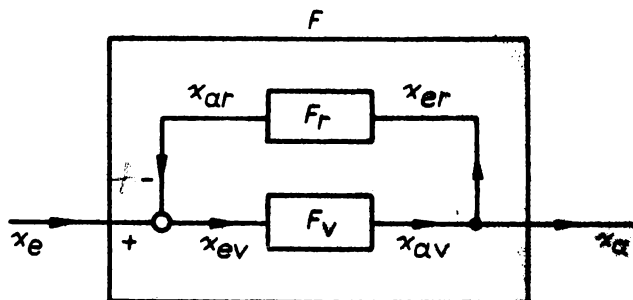


Bild 48

**Aufgabenstellung:** Wie wird bei der Gegeneinanderschaltung zweier Glieder der Gesamtfrequenzgang  $F$  aus dem Frequenzgang  $F_v$  des Vorwärtsgliedes und dem Frequenzgang  $F_r$  des Rückführgliedes bestimmt?

**Lösung:**  $x_a = F_v (x_e - x_{ar}) = F_v (x_e - F_r x_a)$

$$x_a (1 + F_v F_r) = F_v x_e$$

$$F = \frac{x_a}{x_e} = \frac{1}{\frac{1}{F_v} + F_r}$$

Der Frequenzgang wurde auf diese Form gebracht, weil so folgendes ersichtlich ist: Ist das Vorwärtsglied ein P-Verstärker mit sehr großer Verstärkung ( $F_v \rightarrow \infty$ ), so ist der Gesamtfrequenzgang gleich dem reziproken Rückführfrequenzgang. Das ist für die spätere Behandlung von stetigen Reglern, die mit Rückführungen ausgerüstet sind, wichtig. Durch verschiedene Rückführungen an Verstärkern erhält man die verschiedenen Reglertypen.

### 3.4 Beispiel einer zusammengesetzten Schaltung

Bei komplizierten Schaltungen (komplizierter als die einfache Hintereinander-, Parallel- und Gegeneinanderschaltung) kann entweder auf die Grundsaltungen zurückgegriffen werden oder aber immer wieder die Beziehung: "Ausgang ist gleich

"Frequenzgang mal Eingang" benutzt werden. Letzteres ist häufig günstiger, u.a. bei der folgenden Schaltung.

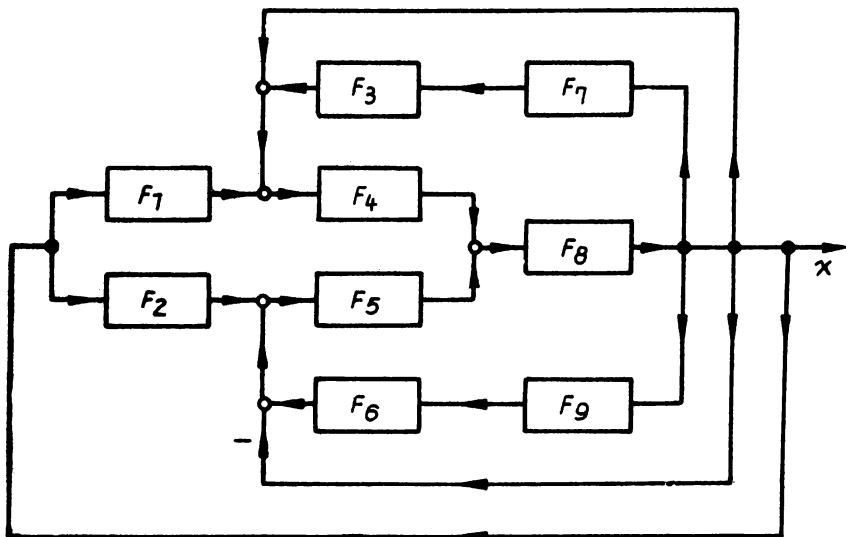


Bild 49

Die Abbildung zeigt das Blockschaltbild der Druckregelung in der Verbrennungskammer eines Raketenmotors. (Ein Signalpfeil ohne Vorzeichen ist positiv aufgeschaltet zu denken.)

Sie sehen hier Hintereinander-, Parallel- und Gegeneinanderschaltungen, die alle ineinander geschachtelt vorkommen. Relativ leicht läßt sich aufschreiben, indem man die Schaltung von  $x$  her über  $F_8$  auffädelt:

$$x = F_8 \left\{ F_4 \left[ F_1 x + F_3 F_7 x - x \right] + F_5 \left[ F_2 x + F_6 F_9 x - x \right] \right\}$$

Hier können die Frequenzgänge der einzelnen Glieder eingesetzt werden, und man hat die den Regelungsvorgang beschreibende Gleichung. Mit dem Hilfsmittel "Differentialgleichung" wäre das Finden der beschreibenden Gleichung in dieser Allgemeinheit gar nicht möglich gewesen. Für spezielle Differentialgleichungen erhält man ein System von 9 Differentialgleichungen.

Das ist wesentlich schwieriger zu handhaben als die eleganten Gleichungen mit Frequenzgängen, die ja nur einfache algebraische Gleichungen darstellen.

Wiederholungsfragen:

1. Wie findet man die Differentialgleichung der Hintereinanderschaltung zweier Glieder bei gegebenen Differentialgleichungen der Einzelglieder?
2. Wie findet man den Frequenzgang der Hintereinanderschaltung zweier Glieder bei gegebenen Frequenzgängen der Einzelglieder?
3. Wie 1. für Parallelschaltung
4. Wie 2. für Parallelschaltung
5. Wie 1. für Gegeneinanderschaltung
6. Wie 2. für Gegeneinanderschaltung
7. Warum ist die Beschreibung mit Frequenzgängen weit eleganter als die Beschreibung mit Differentialgleichungen?

**Alle Rechte vorbehalten**

**Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium**

---

**Gebühr DM 2,—**

**Ag 616/306/62    Best.-Nr. 1008-03.1/62**

**III, 9/278**





# INGENIEUR- FERNSTUDIUM

BIRNSTIEL

## EINFÜHRUNG IN DIE REGELUNGS- UND STEUERUNGS- TECHNIK

**3.2**

HERAUSGEBER  
INGENIEURSCHULE FÜR  
FEINWERKTECHNIK JENA

1008-03.2/62

**Herausgeber:**  
**Ingenieurschule für Feinwerktechnik**  
**Jena**

**Einführung in die**  
**Regelungs- und Steuerungstechnik**

**Lehrbrief 3.2**

**von**

**Horst Birnstiel**

**1. Auflage**

**1962**

---

**Zentralstelle für Fachschulausbildung**  
**— Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie —**  
**Dresden**

**Alle Rechte vorbehalten**

**Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium**

---

**Gebühr DM 2,—**

**Ag 616/ 307 /62    Best.-Nr. 1008-03.2 /62**

**III/9/278**

# Inhaltsverzeichnis =====

	<u>Seite</u>
4. Zusammengesetzte Glieder	3
Übersicht	3/4
Neue Begriffe: Vorhaltzeit, Nachstellzeit	6
Ausführliche Darstellung einiger noch besonders wichtiger Glieder	
Das $IT_1$ -Glieder	9
Das $DT_1$ -Glieder	12
Das $DT_2$ -Glieder	14
Wiederholungsfragen	14
Aufgaben	15
5. Regel- und Steuerstrecken	19
Statische und dynamische Bemerkungen	19
Einteilung der Strecken	24
Kennwerte von Strecken	25
Vereinfachte Einteilung der Strecken	28
Kennwerte üblicher Strecken	29
Wiederholungsfragen	31
Aufgaben	32
Lösungen zu den Aufgaben	36

Der Lehrbrief besteht aus den Teilen 3.1 und 3.2

#### 4. Zusammengesetzte Glieder

=====

Die zusammengesetzten Glieder können als Zusammenschaltung der Grundglieder aufgefaßt werden.

Aus der folgenden Übersicht ersehen Sie, was als Hintereinander-, was als Parallel-Schaltung aufzufassen ist. Diese Auffassung ist eine Gedankenhilfe zum Merken der Frequenzgänge und zum Erkennen des Zeitverhaltens aus den Frequenzgängen.

Zum Beispiel deutet bei  $F = \frac{K + \frac{K_I}{p}}{1 + T_1 p} \cdot e^{-T_t p}$

Der Ausdruck  $K + \frac{K_I}{p}$  auf PI-Verhalten, der Ausdruck  $1 + T_1 p$  im Nenner auf  $T_1$ -Verhalten und der Ausdruck  $e^{-T_t p}$  auf Totzeit. Es handelt sich also um ein PI-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung und Totzeit.

Diese Dinge werden in den späteren Lehrbriefen gebraucht. Dabei wird noch deutlich werden, wie das verschiedene Zeitverhalten pneumatisch, hydraulisch, elektrisch, elektronisch verwirklicht wird.

Systematik linearer Regelkreis- und Steuerkettenglieder			
P	K	DT <sub>2</sub>	$\frac{K_D \cdot p}{1+T_1 p+T_2^2 p^2}$
PT <sub>1</sub>	$\frac{K}{1+T_1 p}$	DT <sub>t</sub>	$K_D \cdot p \cdot e^{-T_t \cdot p}$
PT <sub>2</sub>	$\frac{K}{1+T_1 p+T_2^2 p^2}$	DT <sub>1</sub> T <sub>t</sub>	$\frac{K_D \cdot p}{1+T_1 p} e^{-T_t \cdot p}$
PT <sub>t</sub>	$K \cdot e^{-T_t \cdot p}$	PJ	$K + \frac{K_J}{p}$

$PT_1T_t$	$\frac{K}{1+T_1p} e^{-T_t \cdot p}$
$J$	$\frac{K_J}{p}$
$JT_1$	$\frac{\frac{K_J}{p}}{1+T_1p}$
$JT_2$	$\frac{\frac{K_J}{p}}{1+T_1p+T_2^2p^2}$
$JT_t$	$\frac{K_J}{p} e^{-T_t \cdot p}$
$JT_1T_t$	$\frac{\frac{K_J}{p}}{1+T_1p} e^{-T_t \cdot p}$
$D$	$K_D \cdot p$
$DT_1$	$\frac{K_D \cdot p}{1+T_1p}$

$PJT_1$	$\frac{K + \frac{K_J}{p}}{1+T_1p}$
$PJT_t$	$(K + \frac{K_J}{p}) e^{-T_t \cdot p}$
$PJT_1T_t$	$\frac{K + \frac{K_J}{p}}{1+T_1p} e^{-T_t \cdot p}$
$PD$	$K + K_D \cdot p$
$PDT_1$	$\frac{K + K_D \cdot p}{1+T_1p}$
$PDT_t$	$(K + K_D \cdot p) e^{-T_t \cdot p}$
$PDT_1T_t$	$\frac{K + K_D \cdot p}{1+T_1p} e^{-T_t \cdot p}$
$PJD$	$K + \frac{K_J}{p} + K_D \cdot p$
$PJDT_1$	$\frac{K + \frac{K_J}{p} + K_D \cdot p}{1+T_1p}$

$PJDT_t$	$(K + \frac{K_J}{p} + K_D \cdot p) e^{-T_t \cdot p}$
$PJDT_1T_t$	$\frac{K + \frac{K_J}{p} + K_D \cdot p}{1+T_1p} e^{-T_t \cdot p}$
usw.	usw.

Die Differentialgleichungen ergeben sich leicht aus den Frequenzgängen. Der Frequenzgang der "echten" Totzeit müßte dabei in eine Reihe entwickelt werden. Man sieht, daß eine Differentialgleichung "unendlich" großer Ordnung entstehen würde.

Die Ortskurven ergeben sich experimentell oder durch graphische Darstellung des Frequenzganges.

Die Übergangsfunktionen der zusammengesetzten Glieder ergeben sich durch Zusammensetzung der Grundübergangsfunktionen, z.B.

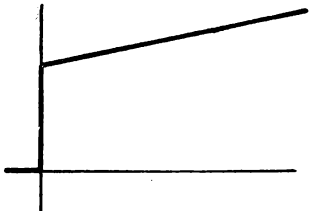
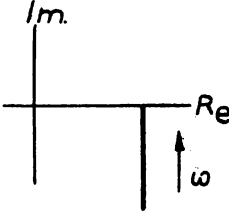
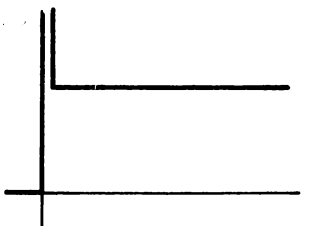
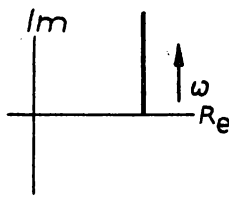
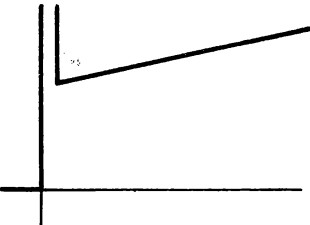
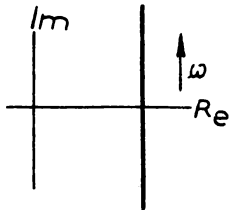
Glied	Übergangsfunktion	Ortskurve
$PI$		
$PD$		
$PID$		

Bild 50



### Neue Begriffe:

#### Zu den Begriffen

Übertragungsfaktor oder Verstärkung  $K$  des P-Gliedes,

bezogene Ausgangsgeschwindigkeit  $K_I$  des I-Gliedes,

Konstante  $K_D$  des D-Gliedes und

Zeitkonstante  $T_n$  des  $T_1$ -Gliedes

treten bei den zusammengesetzten Gliedern einige neue Begriffe hinzu.

#### Die Nachstellzeit des PI-Gliedes

Die Übergangsfunktion des PI-Gliedes ist eine Überlagerung der P- und der I-Übergangsfunktion (P-Sprung + I-Anstieg).

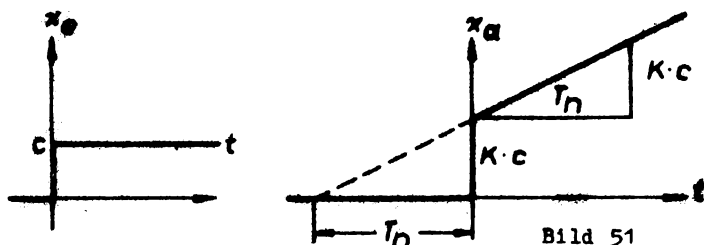


Bild 51

Die Verlängerung des I-Anstieges schneidet auf der Zeitachse einen Abschnitt  $T_n$  ab. Man nennt  $T_n$  die Nachstellzeit des PI-Gliedes. Es ist die Zeit, die der I-Anteil bei Sprungeingang braucht, um soviel zu verstellen, wie der P-Anteil sofort verstellt.

Aus der Gleichung des PI-Gliedes  $x_a = K x_e + K_I \int x_e dt$

folgt für  $x_e = c$   $x_a = K c + K_I c t$

Das ist die Gleichung der Übergangsfunktion.  $K c$  ist der P-Sprung.  $K_I c t$  ist der I-Anstieg.  $K_I c$  ist die Steigung des

I-Anstieges.  $\dot{x}_a = K_I c$  für  $t > 0$ . Andererseits ist aber aus Bild 51  $\dot{x}_a = \frac{K c}{T_n}$  ersichtlich. Es ist also

$$T_n = \frac{K}{K_I}$$

Damit läßt sich die Gleichung des PI-Gliedes anders schreiben:

$$x_a = K x_e + K_I \int x_e dt = K x_e + \frac{K}{T_n} \int x_e dt$$

$$x_a = K \left( x_e + \frac{1}{T_n} \int x_e dt \right)$$

$K$  = Verstärkung

$T_n$  = Nachstellzeit

In dieser Form wird die Gleichung von PI-Gliedern meist angegeben. Wir werden bei der Beantwortung der Frage: "Wie erzeugt man gerätemäßig PI-Verhalten?" darauf zurückkommen.

### Die Vorhaltzeit des PD-Gliedes

Die Übergangsfunktion des PD-Gliedes ist eine Überlagerung der P- und der D-Übergangsfunktion (D-Impuls und P-Sprung).

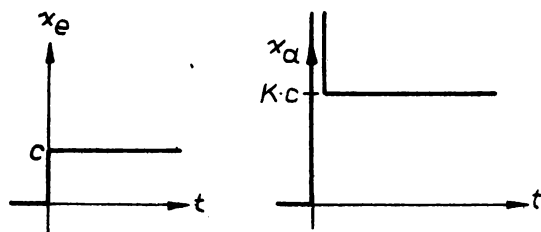


Bild 52

Für eine messende Untersuchung ist diese Untersuchung von PD-Gliedern mit Sprung-eingang nicht geeignet. Besser ist die Untersuchung mit Anstiegseingang (Bild 53).

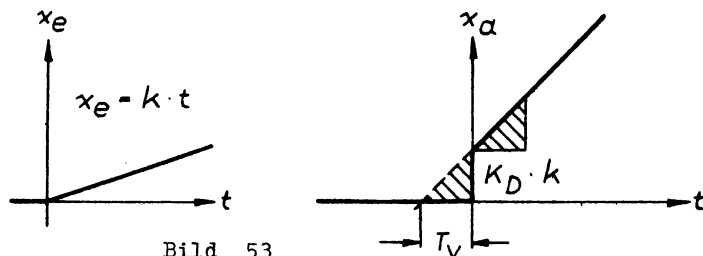


Bild 53

Da allgemein das PD-Glied durch  $x_a = K x_e + K_D \dot{x}_e$  beschrieben wird, ist speziell für  $x_e = k t$

$$x_a = K k t + K_D k$$

Den Abschnitt  $T_v$  auf der Zeitachse nennt man **Vorhaltzeit**. Es ist die Zeit, die der P-Anteil des PD-Gliedes bei **Anstiegseingang** braucht, um soviel zu verstellen, wie der D-Anteil sofort verstellt.

(Achtung! Die Bilder 51b und 53b sind äußerlich einander gleich. Sie sind aber die Darstellung der Ausgänge von **verschiedenen** Gliedern bei verschiedenen Eingängen.)

Nach der Gleichung  $x_a = K k t + K_D k$  ist die Steigung des P-Anstieges  $\dot{x}_a = K \cdot k$  für  $t > 0$ . Aus dem schraffierten Dreieck der Anstiegsübergangsfunktion läßt sich andererseits ablesen

$$\dot{x}_a = \frac{K_D k}{T_v}$$

Also ist  $T_v = \frac{K_D}{K}$ . Damit läßt sich die Gleichung des PD-Gliedes anders schreiben:

$$\dot{x}_a = K \dot{x}_e + K_D \dot{x}_e = K \dot{x}_e + K T_v \dot{x}_e$$

$$x_a = K (x_e + T_v \dot{x}_e)$$

$K$  = Verstärkung,  $T_v$  = Vorhaltzeit

In dieser Form wird die Gleichung von PD-Gliedern meist angegeben. Entsprechend lautet die Gleichung des PID-Gliedes in der meist benutzten Form

$$x_a = K \left( x_e + \frac{1}{T_n} \int x_e dt + T_v \dot{x}_e \right)$$

In dieser Form haben die Konstanten  $K$ ,  $T_n$  und  $T_v$  eine sehr anschauliche Bedeutung. Man bringt deshalb sinnvollerweise jede Gleichung in diese Form. Dieser Form der Gleichung entspricht als Form des Frequenzganges eines allgemeinen linearen Gliedes:

$$F(p) = \frac{K \left( 1 + \frac{1}{T_n p} + T_v p \right)}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2 + \dots} \cdot e^{-T_t \cdot p}$$

$K$ = Verstärkung	$T_1$	} Zeitkonstanten
$T_n$ = Nachstellzeit	$T_2$	
$T_v$ = Vorhaltzeit	$T_t$ = Totzeit	

**Ausführliche Darstellung einiger noch besonders wichtiger  
Glieder IT<sub>1</sub>, DT<sub>1</sub>, DT<sub>2</sub>**

=====

**Das I-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung (IT<sub>1</sub>-Glied)**

Die beschreibende Differentialgleichung lautet

$$T_s \dot{x}_a + x_a = K_I \int x_e dt$$

Für  $x_e = \begin{cases} c \\ 0 \end{cases}$  = Sprungeingang wird die Gleichung zu  $T_s \dot{x}_a + x_a = K_I c t$ , wenn bei der Integration als Anfangsbedingung  $x_a(0) = 0$  angenommen wurde. Die Lösung dieser Differentialgleichung ergibt die rechnerische Formulierung der Übergangsfunktion.

Lösung in Schritten:

1. Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung

$$T_s \dot{x}_a + x_a = 0 \quad x_a = C_1 e^{-\frac{1}{T_s} t}$$

2. Einsetzen in die Ausgangsgleichung und Variation der Konstanten (Dabei wird ja bekanntlich das  $C_1$  als Funktion der Zeit angenommen.)

$$T_s \dot{C}_1 e^{-\frac{1}{T_s} t} - C_1 e^{-\frac{1}{T_s} t} + C_1 e^{-\frac{1}{T_s} t} = K_I c t$$

$$\dot{C}_1 = \frac{K_I c}{T_s} t e^{\frac{1}{T_s} t}$$

Durch partielle Integration  $\int u \dot{v} dt = u v - \int \dot{u} v dt$  erhält man

$$C_1 = \frac{K_I c}{T_s} t T_s e^{\frac{t}{T_s}} - \frac{K_I c}{T_s} T_s \int e^{\frac{t}{T_s}} dt$$

$$C_1 = K_I c t e^{\frac{t}{T_s}} - K_I c T_s e^{\frac{t}{T_s}} + C_2$$

3. Einsetzen der so bestimmten Konstanten  $C_1$  in die Lösung der homogenen Differentialgleichung

$$x_a = K_I c t - K_I c T_s + C_2 e^{-\frac{1}{T_s} t}$$

4. Bestimmung der Integrationskonstanten  $C_2$  mittels der Anfangsbedingung  $x_a(0) = 0$

$$0 = -K_I c T_s + C_2 \quad C_2 = K_I c T_s$$

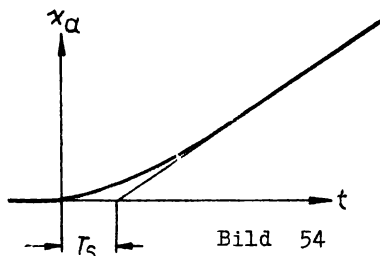
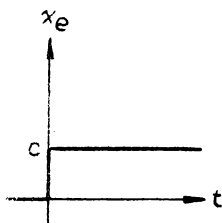
5. Endgültige Lösung der Differentialgleichung

$$x_a = K_I c \left[ t - T_s \left( 1 - e^{-\frac{1}{T_s} t} \right) \right]$$

Diskussion dieser Gleichung, um das Bild der Übergangsfunktion zu erhalten:

Für große  $t$  ( $e^{-\frac{t}{T_s}}$  wird vernachlässigbar klein) verläuft die Übergangsfunktion wie die Gerade  $x_a = K_I c (t - T_s)$ .

Diese Gerade, der sich die Übergangsfunktion asymptotisch nähert, schneidet die Zeitachse bei  $t = T_s$ . Mit diesem Wissen läßt sich die Übergangsfunktion näherungsweise skizzieren.



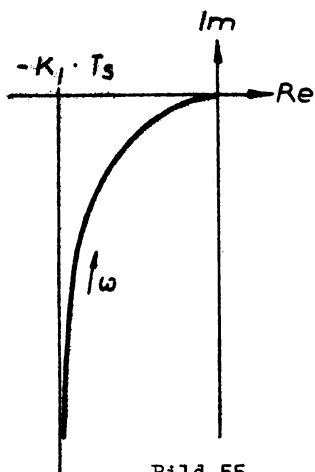


Bild 55

Aus dem Frequenzgang

$$F(p) = \frac{\frac{K_I}{p}}{1 + T_s p}$$

kann man schließlich noch die Ortskurve des  $IT_1$ -Gliedes finden, die ja die graphische Darstellung des komplexen Frequenzganges mit  $\omega$  als Parameter ist.

$$\begin{aligned} F &= \frac{\frac{K_I}{\omega j}}{1 + T_s \omega j} \cdot \frac{1 - T_s \omega j}{1 - T_s \omega j} \\ &= \frac{-K_I T_s}{1 + T_s^2 \omega^2} - \frac{\frac{K_I}{\omega}}{1 + T_s^2 \omega^2} \cdot j \end{aligned}$$

Für den Phasenwinkel  $\varphi$  gilt damit

$$\tan \varphi = \frac{\frac{\text{Im}}{\text{Re}}}{\frac{1}{\omega T_s}} = \frac{1}{\omega T_s}$$

Folgende Grenzwerte wird man sich noch überlegen, um die Ortskurve näherungsweise skizzieren zu können:

$\omega$	Realteil	Imaginärteil	$\varphi$
0	$-K_I T_s$	$-\infty$	$-90^\circ$
$\infty$	0	0	$-180^\circ$
	negativ für alle $\omega$	negativ für alle $\omega$	

## Das D-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung (DT<sub>1</sub>-Glied)

Die beschreibende Differentialgleichung lautet:

$$T_s \dot{x}_a + x_a = K_D \dot{x}_e$$

Für  $x_e = \sqrt{c} = \text{Sprungeingang}$  wird die Gleichung zu

$T_s \dot{x}_a + x_a = 0$ , deren Lösung

$$x_a = C_1 e^{-\frac{t}{T_s}} \quad \text{ist.}$$

Zur Bestimmung der Integrationskonstanten gilt folgende Überlegung: Bei Sprungeingang ist  $\dot{x}_e(0) = \infty$ . Also müssen wegen  $T_s \dot{x}_a + x_a = K_D \dot{x}_e$  das  $x_a(0)$  oder das  $\dot{x}_a(0)$  oder auch beide an der Stelle  $t = 0$  unendlich groß sein.  $x_a(0) = \infty$  würde aber auf  $C_1 = \infty$  und damit auf  $x_a(t) = \infty$ , also auf offensichtlichen Unsinn führen. Also muß  $\dot{x}_a(0) = \infty$  sein, d.h. der Ausgang springt bei Sprungeingang mit hoch. Frage: Wie hoch? Antwort: Durch Integration von  $T_s \dot{x}_a + x_a = K_D \dot{x}_e$  erhält man  $T_s x_a + \int x_a dt = K_D x_e$ . Das Integral stellt die Fläche unter der Ausgangskurve dar. Diese Fläche ist nach einer sehr kleinen Zeit ( $\rightarrow 0$  schreibt man) noch sehr klein (noch null). Also wird

$$x_a(+0) = \frac{K_D x_e(+0)}{T_s} = \frac{K_D c}{T_s}$$

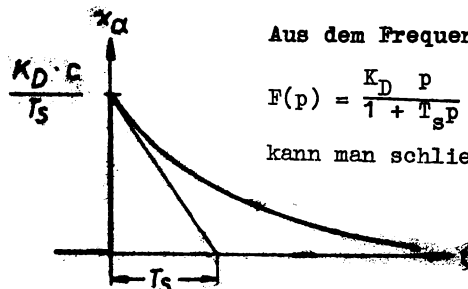
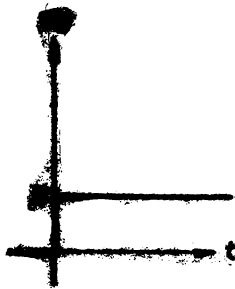
Als Anfangsbedingung ergibt das  $C_1 = \frac{K_D c}{T_s}$ , also ist

$$x_a(t) = \frac{K_D c}{T_s} \cdot e^{-\frac{t}{T_s}}$$

Die Steigung an der Stelle  $+0$  erhält man aus dieser Gleichung als

$$\dot{x}_a(+0) = -\frac{K_D c}{T_s^2}$$

Mittels der gewonnenen Ergebnisse läßt sich die Übergangsfunktion skizzieren:



Aus dem Frequenzgang

$$F(p) = \frac{K_D \cdot p}{1 + T_S p}$$

kann man schließlich noch die Ortskurve des  $DT_1$ -Gliedes finden.

Bild 56

$$F = \frac{K_D \omega j}{1 + T_S \omega j} \cdot \frac{1 - T_S \omega j}{1 - T_S \omega j} = \frac{K_D T_S \omega^2}{1 + T_S^2 \omega^2} + \frac{K_D \omega}{1 + T_S^2 \omega^2} j$$

Für den Phasenwinkel  $\varphi$  gilt damit  $\tan \varphi = \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = \frac{1}{T_S \omega}$

Folgende Grenzwerte wird man sich noch überlegen, um die Ortskurve näherungsweise skizzieren zu können:

$\omega$	Realteil	Imaginärteil	Phasenwinkel
	positiv für alle	positiv für alle	
0	0	0	$+ 90^\circ$
$\infty$	$\frac{K_D}{T_S}$	0	$0^\circ$

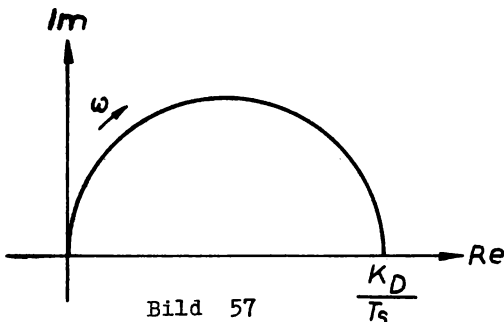


Bild 57

Eine weitere einfache, hier nicht angegebene Überlegung mit Hilfsmitteln der analytischen Geometrie läßt die Ortskurve als Halbkreis erkennen.



## Das D-Glied mit Verzögerung 2. Ordnung (DT<sub>2</sub>-Glied)

Dieses Zeitverhalten wird als sogenannte verzögerte und nachgebende Rückführung gebraucht.

Es entsteht als Hintereinanderschaltung eines PT<sub>1</sub>-Gliedes mit einem DT<sub>1</sub>-Glied:

$$F(p) = \frac{K_1}{1 + T_{s1}p} \cdot \frac{K_2p}{1 + T_{s2}p}$$

$$= \frac{K_1 K_2 p}{1 + (T_{s1} + T_{s2})p + T_{s1}T_{s2}p^2}$$

Die Differentialgleichung lautet damit:

$$T_{s1}T_{s2} \ddot{x}_a + (T_{s1} + T_{s2}) \dot{x}_a + x_a = K_1K_2 \dot{x}_e$$

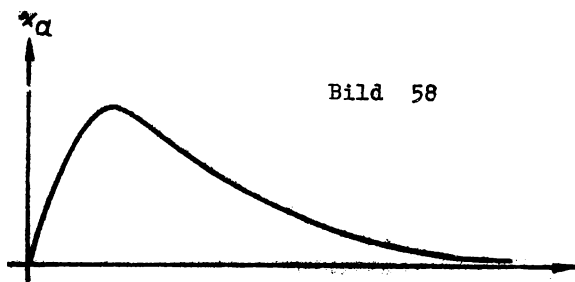


Bild 58

Ohne Ableitung sei hier noch angegeben, daß die Übergangsfunktion das Aussehen von Bild 58 hat.

Nach verzögertem Anstieg von  $x_a$  klingt  $x_a$  noch mehr ver-

zögert wieder ab ("gibt wieder nach"). Es ist  $T_{s2} > T_{s1}$ .

### Wiederholungsfragen:

1. Was sind zusammengesetzte Glieder?
2. Wie kann man aus der Differentialgleichung das Zeitverhalten erkennen?
3. Wie kann man aus dem Frequenzgang das Zeitverhalten erkennen?
4. Wie kann man aus der Übergangsfunktion das Zeitverhalten erkennen?

5. Wie kann man aus der Ortskurve das Zeitverhalten erkennen?
6. Was ist die Nachstellzeit des PI-Gliedes?
7. Was ist die Vorhaltzeit des PD-Gliedes?
8. Wie lautet die meist gebrauchte Form des Frequenzganges eines allgemeinen linearen Gliedes?
9. Wie kann man aus der Differentialgleichung bzw. aus dem Frequenzgang die Kennwerte der Glieder erkennen?

#### Aufgaben:

=====

1. Entwickeln Sie, wie sich die angegebenen Übergangsfunktionen und Ortskurven von PI-, PD-, PID-Gliedern aus den Differentialgleichungen bzw. Frequenzgängen ergeben!
2. Welches Zeitverhalten hat ein mit folgenden Gegenkopplungen ausgerüsteter P-Verstärker sehr großer Verstärkung ( $F_v = K = \infty$ )?  
Welche Kennwerte haben die so gebauten Regler?  
(Regler werden gerätemäßig fast durchweg durch Rückführungen der angegebenen Art verwirklicht.)

Rückführung Name	Rückführung Frequenzgang	Frequenzgang des Reglers	Kennwerte des Reglers		
			$K_R$	$T_{R1}$	$T_v$
starr	$K_r$				
nachgebend	$\frac{K_{rp}}{1 + T_{rp}}$				
nachgebend und verzögert	$\frac{K_{rp}}{1 + T_{1p} + T_{2p}^2}$				
differenzierend	$K_{rp}$				

- Wie lautet die Differentialgleichung der Gegeneinanderschaltung zweier P-Glieder?
- Wie lautet die Differentialgleichung der Gegeneinanderschaltung zweier I-Glieder?
- Wie lautet die Störfrequenzganggleichung  $F_Z = \frac{x}{z}$  des folgenden Regelkreises?

P-Strecke mit Verzögerung 1. Ordnung

$$F_S = \frac{K_S}{1 + T_S p}$$

gegengekoppelt mit einem PI-Regler

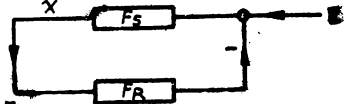


Bild 59

- Am elektronischen Modellregelkreis werden rückwirkungs-frei zwei Verzögerungsglieder 1. Ordnung mit  $T_{s1} = 100 \text{ s}$ ,  $K_1 = 1$  und  $T_{s2} = 60 \text{ s}$ ,  $K_2 = 1$  hintereinandergeschaltet. Wie lautet der Frequenzgang der Anordnung?
- Beweisen Sie, daß ein I-Glied, mit einer starren Rückführung ( $F_R = K_R$ ) ausgerüstet, ein P-Glied ergibt! (Hintergrund: Strahlrohrregler mit starrer Rückführung als P-Regler.)

- Wie hängt die Ausgangsgröße  $x_a$  der in Bild 60 angegebenen Schaltung von der Zeit ab, wenn  $x_e = 3 \text{ V} \sin \frac{5}{s} t$  ist und  $x_a$  zur Zeit 0 null ist?

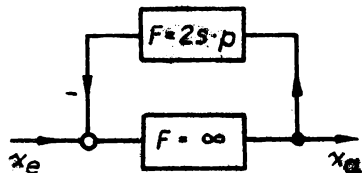


Bild 60

- Ein Ferrarismotor mit Getriebe habe als Verzögerungsglied 1. Ordnung eine Zeitkonstante von 0,5 s, und es gehöre zu einer Steuerspannung von  $u = 20 \text{ V}$  eine Drehzahl  $n = 10 \frac{1}{\text{min}}$ . Der Motor verstelle über eine Spindel mit der Steigung 4 mm ein Ventil, welches bei 5 mm Hubänderung eine Durchflußänderung von  $3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  gibt.

Gesucht unter Annahme linearer Verhältnisse:

- a) Blockschaltbild der Anordnung,
- b) Abhängigkeit des Durchflusses  $\dot{G}$  von der Steuerspannung  $u$  (Differentialgleichung),
- c) Frequenzgang  $F = \frac{\text{Durchfluß}}{\text{Steuerspannung}},$
- d) Zeitverhalten der gesamten Anordnung.

10. Einem elektronischen PD-Glied wurde eine linear ansteigende Eingangsspannung gegeben, die sich in 10 s um 5 V änderte. Der Ausgang sprang daraufhin von 0 V auf 10 V und stieg dann pro s um 2 V linear an.

Wie groß waren Verstärkung und Vorhaltzeit des PD-Gliedes eingestellt?

11. Bei einem pneumatischen PI-Regler ergab sich nach einer sprungförmigen Änderung des Einganges von 0,4 at auf 0,5 at eine schnelle Änderung des Ausgangs von 0,9 at auf 0,7 at und eine anschließende weitere langsame Absenkung des Druckes, die nach 5 min auf einen Druck von 0,6 at führte.

Wie groß waren Verstärkung und Nachstellzeit des Reglers eingestellt?

12. Zeichnen Sie maßstabsgerecht die Ausgänge von P-, I-, D-, PI-, PD-, PID-Gliedern, wenn der Eingang folgenden Verlauf hat:

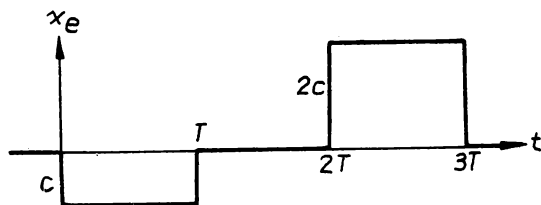


Bild 61

13. Leiten Sie unter Benutzung der komplexen Rechnung der Elektrotechnik die Frequenzgänge der folgenden passiven Vierpole ab! Welches Zeitverhalten haben die Vierpole?

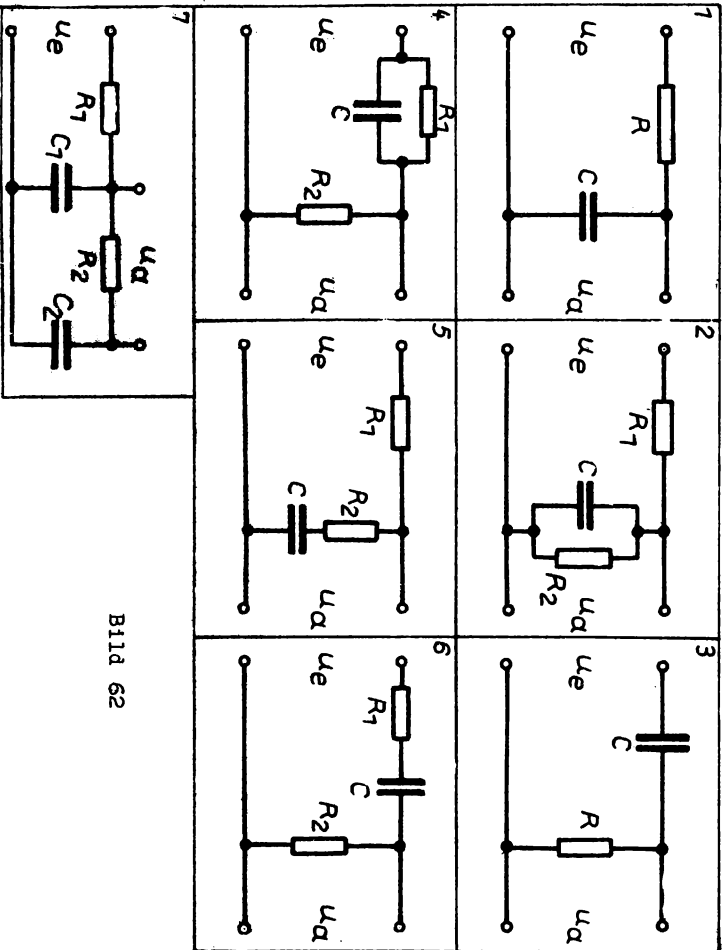





Bild 62

**Anleitung:** Sie rechnen mit den komplexen Widerständen (Impedanzen) von Bild 63, 4. Spalte und schreiben auf, daß sich im unverzweigten elektrischen Stromkreis die Ausgangsspannung zur Eingangsspannung wie die Impedanzen verhalten, über denen die Spannungen abfallen.

B i l d 63

Schalt- element	U-I-Be- ziehung reell	U-I-Be- ziehung komplex	Impedanz Z	Schein- wider- stand	Phasen- winkel $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$
	$U = R \cdot I$	$U = R \cdot I$	$R = R = R e^{0j}$	R	0
	$U = \frac{1}{C} \int I dt$	$U = \frac{1}{C p} I$	$\frac{1}{C p} = \frac{1}{C \omega j} = \frac{1}{C \omega} e^{-\frac{\pi}{2}j}$	$\frac{1}{C \omega}$	$-\frac{\pi}{2}$
	$U = L \cdot \dot{I}$	$U = L \cdot p \cdot I$	$L p = L \omega j = L \omega e^{+\frac{\pi}{2}j}$	$L \omega$	$+\frac{\pi}{2}$

## 5. Regel- und Steuerstrecken

=====

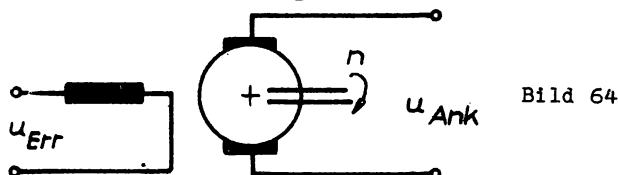
"Die Regelstrecke ist der Bereich einer Anlage, in welchem eine Größe durch die Regelung beeinflusst wird und dessen Zustandsänderungen für den Ablauf der Regelung maßgebend sind." (DIN 19226)

Als regelungstechnisches Glied hat die Strecke Eingangssignale (Stellgrößen, Störgrößen) und ein Ausgangssignal, die Regelgröße. Beispiele dafür sind im 2. Lehrbrief bereits angegeben worden. Dort ist auch grundsätzlich zwischen Strecken mit Ausgleich und Strecken ohne Ausgleich unterschieden worden. Jetzt muß die Abhängigkeit des Ausgangssignales von den Eingangssignalen und von der Zeit genau beschrieben werden. Selbstverständlich gelten die Beschreibungsmethoden:

statische Kennlinie, Übergangsfunktion, Differentialgleichung, Ortskurve, Frequenzgang auch für Regelstrecken. Sie werden jetzt angewandt. Dabei soll von einem Beispiel ausgegangen werden.

Beispiel: Gleichstrom-Nebenschlußmotor als

Drehzahlregelstrecke



Regelgröße	$x$	=	Drehzahl $n$
Stellgröße	$y_1$	=	Ankerspannung $u_{\text{Ank}}$
	$y_2$	=	Erregerspannung $u_{\text{Err}}$
Störgrößen	$z_1$	=	Laständerung $\Delta M$
	$z_2$	=	Netzspannungsschwankung $\Delta u$ usw.

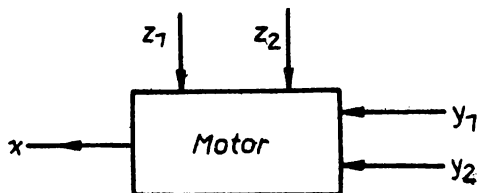


Bild 65

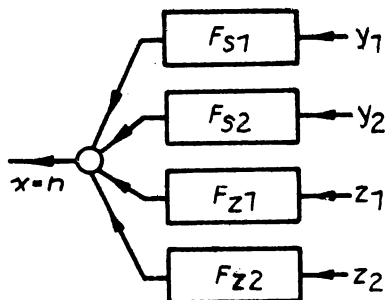


Bild 66

Bild 65 zeigt das zugehörige Blockschaltbild.

Zur regelungstechnischen Beschreibung müssen die Einflüsse aller einzelnen Eingangsgrößen auf die

Ausgangsgröße bekannt sein. Die Einzeleinflüsse überlagern sich additiv. Bild 66 bringt das zum Ausdruck.

Der Stellfrequenzgang  $F_{s1}$  gibt an, wie  $x$  von  $y_1$  bei konstant gehaltenen anderen Einflüssen ( $y_2, z_1, z_2$  usw.) abhängt. Der Störfrequenzgang  $F_{z1}$  gibt an, wie  $x$  von  $z_1$  bei konstant gehaltenen anderen Einflüssen ( $y_1, y_2, z_2$  usw.) abhängt.

Dabei nehmen wir im stationären Zustand lineare Abhängigkeit an, wir nehmen also an, daß eine Verdoppelung von  $y_1$  eine Verdoppelung von  $x$  bringt usw. Reicht diese "im kleinen" meist gültige lineare Näherung zur Beschreibung nicht aus, so müssen die statischen Kennlinien noch zur Beschreibung herangezogen werden.

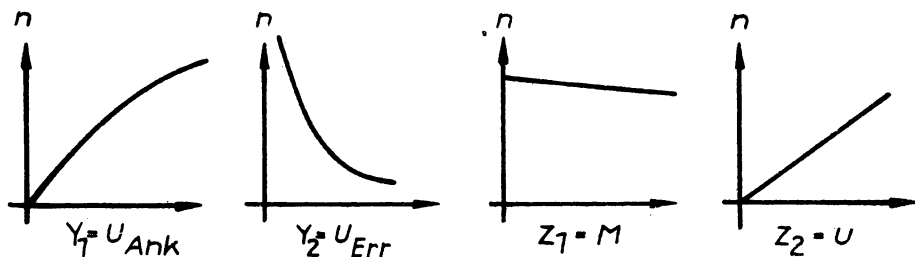


Bild 67

Man sieht, daß hier die Abhängigkeit der Drehzahl von der Erregerspannung ganz typisch nichtlinear ist.

Wir beschränken uns auf die lineare Beschreibung und damit bei Nichtlinearitäten auf die Betrachtung von "kleinen" Arbeitsbereichen um Arbeitspunkte, wo näherungsweise lineare Verhältnisse angenommen werden können.

Wir beschränken uns noch weiter:

Im allgemeinen wird man nur eine Stellgröße benutzen. (Im Beispiel etwa die Ankerspannung bei Erregerspannung = konstant).

Das wollen wir annehmen.

Weiter ist es wenig aussichtsreich, an Strecken die Einflüsse aller Störgrößen für sich genau erfassen zu wollen. Häufig genügt eine Pauschalerfassung, im Beispiel etwa so: Alle Störgrößen sind summiert so groß, daß ihnen mit einer Ankerspannungsänderung von  $\pm 20$  V begegnet werden kann. Mit dieser Aussage sind die Störgrößen in Einheiten der Stellgröße angegeben worden. Im Blockschaltbild finden diese Vereinfachungen folgendermaßen ihren Ausdruck:

$$y_s = z - y_R$$



Auf die Strecke wirkt  $y_s$ , das ist die Störgröße  $z$  abzüglich der Gegenwirkung  $y_R$  durch den Regler.

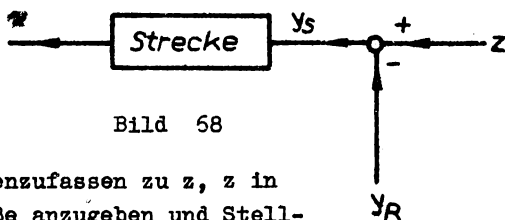


Bild 68

Alle Störgrößen zusammenzufassen zu  $z$ ,  $z$  in Einheiten der Stellgröße anzugeben und Stellgröße wie Störgröße über den gleichen Streckenfrequenzgang  $F_s$  auf die Regelgröße  $x$  wirken zu lassen, ist eine sehr große Vereinfachung.

Wir treffen sie aber, sind uns allerdings der Vereinfachung bewußt. Wie andererseits genau (Bild 66) zu verfahren wäre, ist deutlich. Wir erlauben uns die Vereinfachung, die nun wiederum praktischen Belangen entgegenkommt.

Das möge durch noch ein Beispiel belegt werden.

Beispiel: Glühofen als Temperaturregelstrecke

Regelgröße = Temperatur

Stellgröße = Heizleistung in kW

Störgrößen = sehr vielfältig (Spannungsschwankungen, Außentemperaturänderungen, Durchsatzänderungen, offene Klappe am Ofen, usw.)

Der Einzeleinfluß der Störgrößen läßt sich so gut wie nicht angeben. Pauschal läßt sich aber meist leicht bestimmen, daß allen Störgrößen mit einer Heizungsverstellung von z.B.  $\pm 2$  kW begegnet werden kann. Das ist die Angabe der Störgröße in Einheiten der Stellgröße.

Unsere Vereinfachung gibt also schließlich dar,

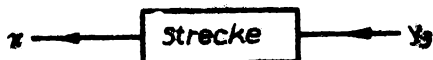


Bild 69

daß die Regelstrecke als regelungstechnisches Glied ein Eingangssignal  $y_s$  und ein Ausgangssignal  $x$  hat. Dabei sind "klein  $x$ " und "klein  $y_s$ " wieder wie immer Abweichungen von Bezugswerten  $X_0$  und  $Y_0$ .

In den vorangegangenen Abschnitten ist schon alles gesagt worden, was über die Abhängigkeit des Ausgangssignals eines Gliedes vom Eingangssignal gesagt werden muß. Das braucht

jetzt einfach auf Strecken angewandt zu werden. Man kommt so zur folgenden Übersicht. Sie wird Ihnen ohne Kommentar verständlich sein. Gehen Sie sie aufmerksam durch.

Die Übersicht unterscheidet Strecken mit und ohne Ausgleich o., 1., 2., usw. Ordnung. Die Ordnungszahl wird von der Differentialgleichung angegeben. Außerdem entspricht der Ordnungszahl die Anzahl der von der Ortskurve durchlaufenen Quadranten. Bei echter Totzeit sind es (Spirale der Ortskurve!) unendlich viele. Jede Angabe ist wieder als Näherung anzusehen. So wird die Drehzahlabhängigkeit kleiner Maschinen mit für viele Zwecke genügender Näherung durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung beschrieben. In den meisten Fällen ist die Regelstrecke dem Regelungstechniker vorgegeben. (Ofen, Druckkessel, Rohrleitung, usw.). Es muß dann die geeignete Regelungseinrichtung gefunden werden. Da an dem Zusammenspiel der Regelung aber Strecke wie Regler gleichermaßen Anteil haben, ist es wünschenswert, daß die Strecke schon gute regelungstechnische Eigenschaften besitzt. Deshalb sollte schon der Anlagenbauer dem Regelungstechniker in die Hände arbeiten. Das muß bei manchen Aufgaben unbedingt so sein. So können bei der Raketenentwicklung unmöglich Rakete und Kursregel- und -steuereinrichtung nebeneinander oder gar unabhängig nacheinander entwickelt werden. Hier geht nur das Miteinander.

Trotzdem ist es heute meistens so, daß die Strecken dem Regelungstechniker vorgegeben sind, daß die Anlagen nur nach technologischen, nicht auch nach regelungstechnischen Gesichtspunkten gebaut sind. Dann gilt es Kennwerte zu finden, die die Strecke regelungstechnisch charakterisieren. Man stelle sich nun mit der Aufgabe, die beschreibende Differentialgleichung zu finden, z.B. von einem Kessel im Kraftwerk. Mit Wahrscheinlichkeit wird man die höhere Mathematik beiseite legen, nicht weil sie etwa unbrauchbar ist, sondern weil gar zu viele Einflußfaktoren die exakte Erfassung zu schwer machen. Die experimentelle Untersuchung wird weiterhelfen. Aber auch sie liefert streuende Meßergebnisse, so daß es oft wenig



sinnvoll ist, an der aufgenommenen Übergangsfunktion oder an der aufgenommenen Ortskurve nach 1., 2., 3. usw. Ordnung unterscheiden zu wollen. In solchen Fällen genügen dem Ingenieur meist wenige "handreife" Kennwerte. Diese Kennwerte sollen gefunden werden.

### Kennwerte von Regelstrecken

#### 1. Strecken mit Ausgleich

Genaue Beschreibung durch ihren Frequenzgang

$$F(p) = \frac{K_s}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2 + \dots} e^{-T_t p}$$

oder durch ihre Ortskurve, ihre Differentialgleichung oder Übergangsfunktion.

Aus der Übergangsfunktion lassen sich durch Anlegen der Wendetangente die Abschnitte  $T_t$ ,  $T_u$ ,  $T_t^*$ ,  $T_s^*$  festlegen.

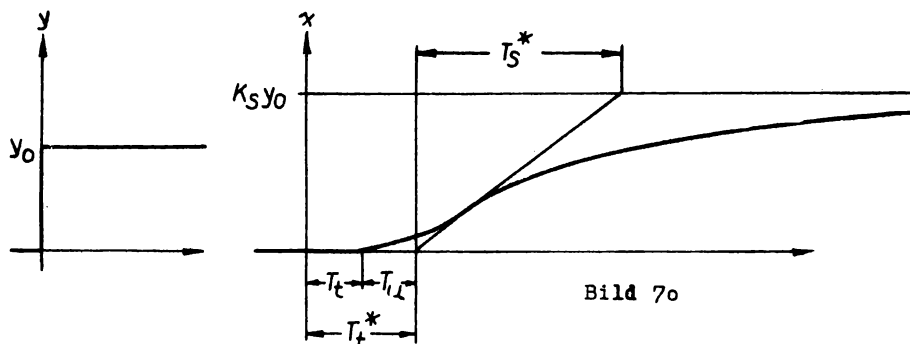


Bild 70

$K_s = \frac{x_0}{y_0}$  = Übertragungsfaktor der Strecke,  $q = \frac{1}{K_s}$  = Ausgleichswert

$T_t$  = Totzeit (auch echte Totzeit genannt)

$T_u$  = Verzugszeit (auch unechte Totzeit genannt)

$T_t^*$  = Ersatztotzeit

$T_s^*$  = Übergangszeit (auch Ersatz-Zeitkonstante genannt)

Angenäherte Beschreibung einer Strecke mit Ausgleich durch die Kennwerte:

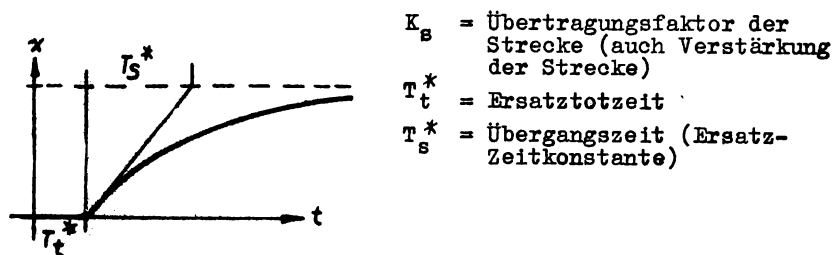


Bild 71

Das läuft auf einen Ersatz der Übergangsfunktion durch Totzeit mit Übergang erster Ordnung hinaus. Die Übergangsfunktion jeder Strecke mit Ausgleich lässt sich so ersetzen (Bild 71). Dabei werden die Begriffe Ersatztotzeit  $T_t^*$  und Ersatzzeitkonstante  $T_s^*$  häufig (man denkt dann schon an das Ersatzbild) einfach als Totzeit  $T_t$  und Übergangszeit  $T_s$  bezeichnet. Die Übergangszeit ist dabei die Zeit, die für den Übergang gebraucht würde, wenn er nur mit der maximalen Änderungsgeschwindigkeit (der Steigung der Wendetangente) erfolgen würde.

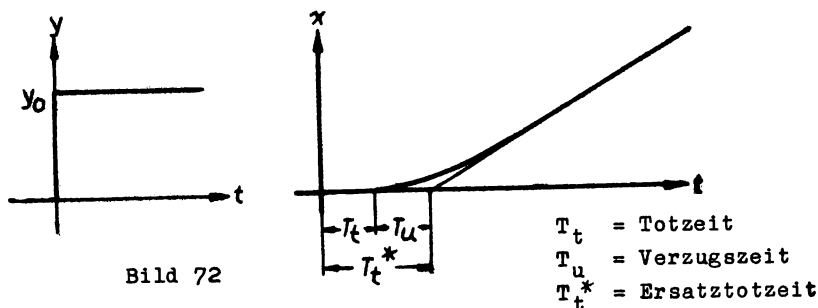
## 2. Strecken ohne Ausgleich

Genaue Beschreibung durch ihren Frequenzgang

$$F(p) = \frac{\frac{K_I}{p}}{1 + T_1 p + \dots} e^{-T_t p}$$

oder durch ihre Ortskurve, ihre Differentialgleichung oder Übergangsfunktion.

Aus der Übergangsfunktion lassen sich durch Anlegen der Asymptote die Abschnitte  $T_t$ ,  $T_u$ ,  $T_t^*$  festlegen.



Als Anlaufwert  $A$  bezeichnet man den Kehrwert der maximalen Änderungsgeschwindigkeit, die sich bei einer Verstellung von  $y$  um den gesamten Stellbereich  $Y_h$  ergibt.

$$A = \frac{1}{\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max}}$$

Von der Stellgliedverstellung  $y_0$  läßt sich linear auf die Verstellung  $Y_h$  umrechnen:

$$A = \frac{1}{\frac{dx}{dt}} \cdot \frac{y_0}{Y_h}$$

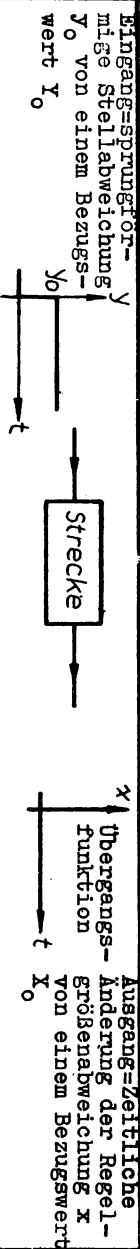
Angenäherte Beschreibung einer Strecke ohne Ausgleich durch die Kennwerte

$$\begin{aligned} A &= \text{Anlaufwert} \\ T_t^* &= \text{Ersatztotzeit (häufig auch einfach Totzeit genannt)} \end{aligned}$$

Teilt man Regelstrecken nur nach den gefundenen Kennwerten und nicht nach ihren Differentialgleichungen ein, so ergibt sich die folgende Übersicht, die nach dem bisher Gesagten wieder ohne Kommentar verständlich ist, ebenso wie die sich anschließenden Kennwerte üblicher Regelstrecken.

Prägen Sie sich einige dieser Zahlen ein, um eine ungefähre Vorstellung von den in der Praxis vorkommenden Streckenkennwerten zu haben.

# Regel- und Steuerstrecken



	mit Ausgleich				ohne Ausgleich	
Verein-fachte Übergangs-funktion						
Bezeich-nung	ohne Totzeit ohne Über-gangszeit	ohne Totzeit mit Über-gangszeit	mit Totzeit mit Über-gangszeit	mit Totzeit ohne Über-gangszeit	ohne Totzeit	mit Totzeit
Kenn-werte	Verstärkung (Übertragungs-faktor) $K_s = \frac{x_0}{y_0}$	$K, T_s, T_t$	$K_s, T_s, T_t$	$K_s, T_t$	Anlaufwert $A$ $A = \frac{1}{\frac{dx}{dt}} \cdot \frac{y_0}{T_t}$	$T_t, A$
Bei-spiele	ohne Verzö-gerung	mit Verzö-gerung 1. Ordnung	mit Verzö-gerung höherer Ordn.	selten	ohne Verzö-gerung	mit Verzö-gerung

**Kennwerte üblicher Regelstrecken (nach W.Oppelt)**

Regelstrecke	$T_t$	$T_s$	A
<u>Temperatur</u>			
Kleiner Labor- ofen	0,5...1 min	5...15 min	... 1 s/grd
Großer Glühofen	1...3 min	10...20 min	... 3 s/grd
Destillations- kolonne	1...7 min	40...60 min	20...40 s/grd
Ammoniak-Absorber	...8 min	-	5 s/grd
Überhitzer	...2 min	-	0,5 s/grd
Milcherhitzer	...1 min	-	0,5 s/grd
Raumheizung	1...5 min	10...60 min	1 min/grd
<u>Elektrische Spannung</u>			
Große Generatoren	0	5...10 s	
Kleinere Generat.	0	1... 5 s	
<u>Druck</u>			
Gasrohrleitung	0	0,1 s	
Großraumwasser- kessel	-	<1000 s	
<u>Drehzahl</u>			
Turbinen	-	-	20 s/1000 $\frac{U}{\text{min}}$
Elektromotor klein		0,2...10 s	
groß		5...40 s	
<u>Wasserstand</u>			
in Dampfkesseln	0,5...1 min	-	3...10 s/cm
<u>Durchfluß</u>			
Rohrleitung	0...5 s	0,2...10 s	



In der Praxis hat sich herausgestellt, daß Regelungen an manchen Strecken sehr gute Ergebnisse haben, an anderen Strecken wieder eine gute Regelung schwierig ist. Das liegt an der Art der Strecke. So lassen sich z.B. Regelungen an Strecken mit großen Totzeiten (relativ zu den Übergangszeiten) schwierig ausführen.

Das kann man sich anschaulich deutlich machen:

Tritt am Eingang der Strecke (das ist der dynamisch ungünstigste Fall) eine Störung auf, so merkt der Regler die Totzeit lang zunächst noch gar nichts. Dann "bekommt er mit", daß eine Regelabweichung eintritt und stellt entsprechend das Stellglied. Sein Eingriff wird aber erst nach nochmaligem Ablauf der Totzeit wirksam, so daß - grob gesagt - während der Zeit  $2T_t$  der Störvorgang so verläuft, als wäre keine Regelung vorhanden.

Ist nun die Übergangszeit bei vorhandener Totzeit klein, so wird sich bis zum Wirksamwerden des kompensierenden Reglereingriffes schon eine große Änderung der Regelgröße ergeben haben.

So wird deutlich, daß die Regelung um so schwieriger sein wird, je größer die Totzeit im Verhältnis zur Übergangszeit ist.

Mit dem Gütefaktor  $G = \frac{T_s}{T_t}$  kann das Streckenverhalten von

Strecken mit Ausgleich charakterisiert werden.

$\frac{T_s}{T_t}$	> 10	: gut regelbar	} mit einem einschleifigen Regelkreis
$\frac{T_s}{T_t}$	um 6	: noch einigermaßen regelbar	
$\frac{T_s}{T_t}$	< 3	: schwer regelbar	

## Wiederholungsfragen:

=====

1. Was bezeichnet man als Regelstrecke?
2. Nennen Sie etwa 10 Regelstrecken und die dazugehörigen Regelgrößen, Stellgrößen und Störgrößen!
3. Wodurch ist eine Regelstrecke mit Ausgleich, wodurch eine Regelstrecke ohne Ausgleich gekennzeichnet?
4. Geben Sie eine Einteilung der Regelstrecken an!
5. Durch welche Angaben ist eine Regelstrecke  
a) genau,  
b) vereinfacht  
charakterisiert?
6. Skizzieren Sie die Übergangsfunktionen von Strecken mit Ausgleich  
a) ohne Übergangszeit ohne Totzeit  
b) ohne Übergangszeit mit Totzeit  
c) mit Übergangszeit ohne Totzeit  
d) mit Übergangszeit mit Totzeit!  
Nennen Sie Beispiele zu jeder Art von Regelstrecke!
7. Skizzieren Sie die Übergangsfunktionen von Strecken ohne Ausgleich  
a) ohne Totzeit  
b) mit Totzeit!  
Nennen Sie Beispiele zu jeder Art von Regelstrecke!
8. Was versteht man unter den Begriffen echte Totzeit, unechte Totzeit, Ersatztotzeit, Totzeit, Verzugszeit, Übergangszeit, Ersatzzeitkonstante, Zeitkonstante?
9. Nennen Sie in systematischer Reihenfolge die Differentialgleichungen aller Arten von (linearen) Regelstrecken!
10. Beschreiben Sie, wie die Aufnahme der Übergangsfunktion einer Strecke vor sich geht!
11. Beschreiben Sie, wie die Aufnahme der Ortskurve einer Strecke vor sich geht!
12. Welche Strecken sind gut, welche schlecht regelbar?
13. Warum bezeichnet man den Quotienten  $T_g : T_t$  als Gütefaktor?
14. Warum ist Totzeit regelungstechnisch etwas Schlechtes? Machen Sie sich das anschaulich klar!
15. Daß für den Regelungsvorgang nicht nur das Verhalten des Reglers, sondern auch das Verhalten der Regelstrecke von Bedeutung ist, war nicht immer bekannt. Wieso hat auch die Regelstrecke Einfluß auf den Ablauf eines Regelungsvorganges?

16. Was sind "schnelle", was "langsame" Strecken?
17. In welcher Größenordnung liegen Totzeit und Übergangszeit bzw. Anlaufwert einiger bekannter Regelstrecken?

### A u f g a b e n :

=====

1. Einem kleinen Laborofen wurde eine elektrische Heizleistung von 80 W zugeführt. Es ergab sich daraufhin im Innern folgender Temperaturverlauf:

0 min - 20 °C	10 min - 30 °C	70 min - 150 °C
1 " - 20 "	20 " - 54 "	80 " - 162 "
2 " - 20 "	30 " - 75 "	90 " - 170 "
3 " - 21 "	40 " - 97 "	100 " - 182 "
4 " - 22 "	50 " - 116 "	110 " - 190 "
5 " - 23 "	60 " - 135 "	120 " - 195 "

Schließlich stellte sich eine Temperatur von 210 °C ein.

- a) Wie groß sind  $K_s$ ,  $T_t$ ,  $T_s$ ,  $q$  dieser Temperaturregelstrecke?
  - b) Wird die Temperaturregelung an dieser Strecke Schwierigkeiten bereiten oder nicht?
2. Bei einem Gebläse bringt eine Drehzahlsteigerung um  $50 \frac{1}{\text{min}}$  eine Steigerung des Ausgangsdruckes um 120 mm WS. Wie groß ist der Übertragungsfaktor (die Verstärkung) der Regelstrecke?
  3. Ein Glühofen habe bei einer Gaszufuhr von  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  eine Temperatur von 850 °C. Eine Erhöhung des Gasstromes um  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  führe auf eine Temperatur von 925 °C. Wie groß ist die Verstärkung der Regelstrecke um den betrachteten Arbeitspunkt?  
Wie groß ist der Ausgleichswert der Regelstrecke um den betrachteten Arbeitspunkt?

4. Bei der Aufnahme der Übergangsfunktion einer Temperaturregelstrecke wurde das Gasventil von der Stellung 8 mm in die Stellung 12 mm gebracht. Nach 10 min begann ein Temperaturanstieg, der von 50 °C bis 90 °C führte. Die Endtemperatur war nach ungefähr 2 Stunden erreicht.
- Wie lautet der Frequenzgang der Strecke, wenn man die 10 min als echte Totzeit und einen anschließenden Übergang 1. Ordnung annimmt?
  - Wie lautet der Frequenzgang, wenn man die e-Funktion der Totzeitbeschreibung in eine Reihe entwickelt und nur die ersten beiden Glieder als Näherung berücksichtigt?
  - Skizzieren Sie die Übergangsfunktion!
5. Eine Modellregelstrecke am pneumatischen Modellregelkreis werde durch die folgende Gleichung beschrieben:
- $$60 s \dot{p}_a + p_a = p_e,$$
- $p_e$  = Eingangsdruck  
 $p_a$  = Ausgangsdruck
- Lösen Sie die Differentialgleichung für  $p_e = 100$  mm WS.
  - Zeichnen Sie für  $p_e = 100$  mm WS die Übergangsfunktion.
  - Wie lautet der Frequenzgang?
  - Zeichnen Sie die Ortskurve und schreiben Sie die  $\omega$ -Werte als Parameter an die Kurve.
6. Eine Druckregelstrecke werde durch die Gleichung
- $$2s \dot{x}(t) + x(t) = 1,5 \frac{\text{at}}{\text{cm}} \cdot y$$
- mit  $x$  = Druck  
 $y$  = Ventilstellung
- beschrieben. Zeichnen Sie den Verlauf des zugehörigen Ausgangs, wenn der Eingang von 0,5 cm auf 1,0 cm verstellt wird.
7. Bei einem Gleichstromgenerator bewirke eine Steigerung der Erregerspannung um 10 V eine Erhöhung der Klemmenspannung des Generators um 75 V.
- Wie groß ist der Übertragungsfaktor der Regelstrecke?
- Wie groß ist der Ausgleichswert der Regelstrecke?
8. Zum Konstanthalten der Dampftemperatur am Austritt eines Dampfkessels wird vielfach zwischen Vor- und Nachüberhitzer in einem dazwischenliegenden Einspritzkühler Wasser einge-

spritzt. Regelstrecke ist hier der Einspritzkühler mit dem Nachüberhitzer bis zum Temperaturfühler. Die Totzeiten liegen bei den heutigen Überhitzern zwischen 0,5 und 2,5 min, die Übergangszeiten zwischen 1 und 4 min.

Wird die Temperaturregelung mit einem einschleifigen Regelkreis schwer oder leicht zu bewältigen sein?

9. An einer Wasserstandsregelstrecke wurde durch Versuch bestimmt, daß bei einer Erhöhung des Wasserzuflusses um  $y = 5 \text{ m}^3/\text{h}$  der Wasserstand in  $t = 20 \text{ s}$  um  $h = 40 \text{ cm}$  ansteigt. Der maximale Zufluß bei voller Öffnung des Einlaßventils ist  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ .

- Wie groß ist der Anlaufwert der Regelstrecke?
- Wie groß ist die bezogene Änderungsgeschwindigkeit der Strecke?

10. Ein Behälter habe einen Querschnitt von  $6 \text{ m}^2$  und bei 100 % Öffnung des linearen Zulaufventils laufen  $2 \text{ m}^3/\text{min}$  zu. Die Normalentnahme betrage  $1 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Wie groß ist der Anlaufwert dieser Flüssigkeitsstandregelstrecke?

11. In einem Durchlauferhitzer mit  $0,2 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$  Durchlauf und stets guter Durchmischung befinde sich  $1 \text{ kg}$  Wasser von  $20^\circ\text{C}$ . Es laufe dauernd Wasser von  $20^\circ\text{C}$  zu (Bild 73). Zur Zeit  $t = 0$  werde eine Heizung von  $1000 \text{ W}$  eingeschaltet. Wie nimmt das Wasser welche Temperatur an? (Differentialgleichung der Erwärmung und deren Lösung) Skizzieren Sie die Übergangsfunktion.

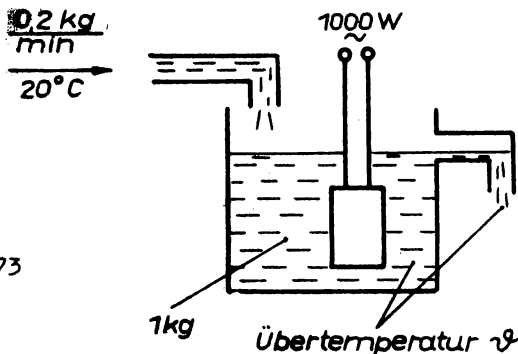


Bild 73

Anleitung: Setzen Sie die zugeführte Energie bei Übertemperatur  $\vartheta$  im Zeitintervall  $dt$  gleich der abgeführten plus der gespeicherten.

$$1 \text{ Ws} = 0,239 \text{ cal, spezifische Wärme von Wasser} \\ = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \text{ } ^\circ\text{C}}$$

12. Als beschreibende Gleichung einer elektrisch geheizten Temperaturregelstrecke wurde die folgende Differentialgleichung gefunden:

$$300 \text{ min}^2 \ddot{\vartheta} + 35 \text{ min } \dot{\vartheta} + \vartheta = 0,5 \cdot \frac{\text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Watt}} \cdot N$$

Diese Temperaturstrecke soll an einem elektronischen Modellregelkreis in rückwirkungsfreier Schaltung mit der Zeitraffung 1 : 3000 nachgebildet werden.

- a) Wie groß müssen die Zeitkonstanten der Speicher eingestellt werden?

- b) Das elektronische Modell hat eine Verstärkung

$$K = 1 \frac{\text{Volt}}{\text{Volt}}$$

Wie müssen also die Zusammenhänge zwischen der Temperatur und der Bildspannung  $u_a$  einerseits und zwischen der Leistung  $N$  und der Eingangsspannung  $u_e$  andererseits lauten, wenn der Modellregelkreis mit Spannungen von - 30 V bis + 30 V arbeitet, ein Temperaturbereich von 1000  $^\circ\text{C}$  abgebildet werden soll und der Modellregelkreis in seinem Arbeitsbereich voll angesteuert werden soll.

- c) Wie lautet die am Modellregelkreis nachgebildete Differentialgleichung?
- d) Wie groß müssen die Widerstände der Verzögerungsglieder (RC-Vierpole) eingestellt werden, wenn Kondensatoren von 10  $\mu\text{F}$  verwendet werden?

# Lösungen der Aufgaben

## Aufgabe 2.1

Differentialgleichung:  $\Delta p = \frac{0,2}{10} \frac{\text{at}}{\text{grd}} \Delta \vartheta = 0,02 \frac{\text{at}}{\text{grd}} \cdot \Delta \vartheta$

Übergangsfunktion:

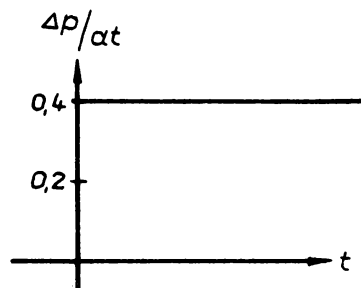
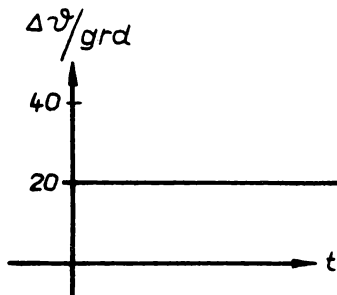


Bild 74

Frequenzgang  $F = \frac{\Delta p}{\Delta \vartheta} = 0,02 \frac{\text{at}}{\text{grd}}$

Ortskurve:

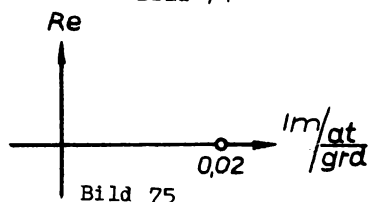


Bild 75

## Aufgabe 2.2

Differentialgleichung:  $\dot{x}_a = \frac{2}{0,05} \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot \Delta p_e$

Übergangsfunktion:

$$x_a = 40 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \int \Delta p_e dt$$

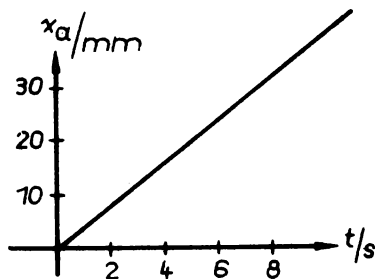
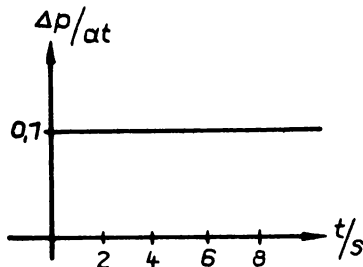


Bild 76

Frequenzgang:  $F = \frac{40 \frac{\text{mm/s}}{\text{at}}}{p}$

Ortskurve:

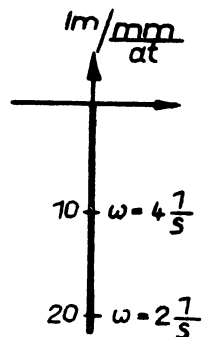


Bild 77

### Aufgabe 2.3

Differentialgleichung:  $p_a = 0,1 \frac{\text{mm WS}}{\text{A/s}} \cdot \dot{i}_e$

Übergangsfunktion:

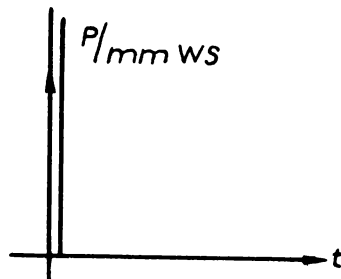
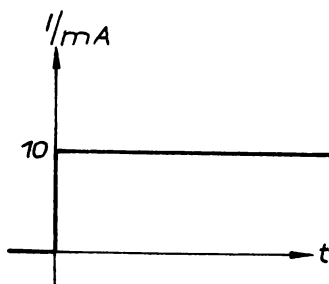


Bild 78

Frequenzgang:  $F = \frac{p_a}{i_e} = 0,1 \frac{\text{mm WS}}{\text{A/s}} p$

Ortskurve:

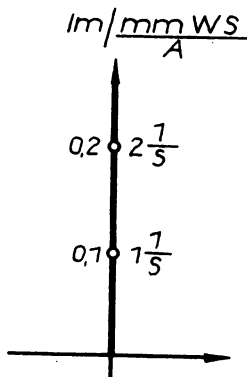


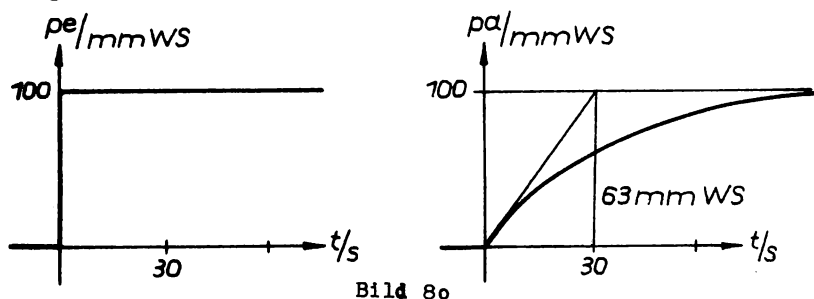
Bild 79



## Aufgabe 2.4

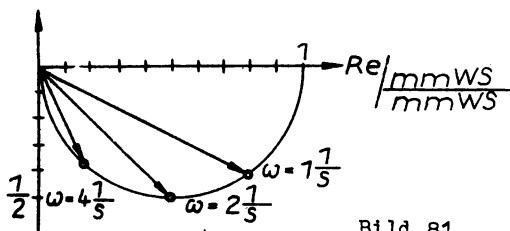
Differentialgleichung:  $30 \text{ s } \dot{p}_a + p_a = p_e$

Übergangsfunktion:



Frequenzgang:  $F = \frac{1}{1 + 30 \text{ s } p}$

Ortskurve:



## Aufgabe 2.5

Die Spannungen im unverzweigten elektrischen Stromkreis verhalten sich wie die komplex geschriebenen Widerstände, über denen sie abfallen.

$$\frac{u_a}{u_e} = F = \frac{\frac{1}{C p}}{R + \cancel{L p} + \frac{1}{C p}} = \frac{1}{1 + RC p + LC p^2}$$

$$LC \ddot{u}_a + RC \dot{u}_a + u_a = u_e$$

Charakteristische Gleichung:

$$LC \lambda^2 + RC \lambda + 1 = 0$$

$$\lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} = 0$$

$$\lambda_{1/2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

Grenzfall: aperiodisches - periodisches Einschwingen bei

$$\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC} \quad \hookrightarrow \quad L = \frac{R^2 C}{4} = \frac{10^4 \Omega^2 \cdot 10^{-5} F}{4} = \frac{1}{40} H = 25 \text{ mH}$$

Die Induktivität müßte  $> 25 \text{ mH}$  sein, damit gedämpfte Schwingungen auftreten.

Für  $L = 50 \text{ mH}$  lautet die Differentialgleichung:

$$0,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^2 \ddot{u}_a + 10^{-3} \text{ s} \dot{u}_a + u_a = u_e$$

$$0,5 (\text{ms})^2 \ddot{u}_a + \text{ms} \dot{u}_a + u_a = u_e$$

Die Übergangsfunktion ergibt sich rechnerisch durch Lösen der Differentialgleichung für  $x_e = 10 \text{ V} = u_e$

$$0,5 (\text{ms})^2 \ddot{u}_a + \text{ms} \dot{u}_a + u_a = u_e$$

Substitution:  $u_a - 10 \text{ V} = z$  führt auf:

$$0,5 (\text{ms})^2 \ddot{z} + \text{ms} \dot{z} + z = 0$$

Charakteristische Gleichung:

$$\lambda^2 + 2 \frac{1}{\text{ms}} \lambda + 2 \frac{1}{(\text{ms})^2} = 0$$

$$\lambda_{1/2} = -\frac{1}{\text{ms}} \pm \frac{1}{\text{ms}} \cdot j$$

Also ist

$$u_a - 10 \text{ V} = C_1 e^{-\frac{1}{\text{ms}} t} \sin\left(\frac{1}{\text{ms}} t + C_2\right)$$

Mit den Anfangsbedingungen  $u_a(0) = \dot{u}_a(0) = 0$  bestimmt man die Integrationskonstanten:

$$\begin{aligned} \dot{u}_a = & -\frac{1}{\text{ms}} C_1 e^{-\frac{1}{\text{ms}} t} \sin\left(\frac{1}{\text{ms}} t + C_2\right) \\ & + C_1 e^{-\frac{1}{\text{ms}} t} \frac{1}{\text{ms}} \cos\left(\frac{1}{\text{ms}} t + C_2\right) \end{aligned}$$

Die Integrationskonstanten ergeben sich damit aus dem folgenden Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} -10 \text{ V} &= C_1 \sin C_2 \\ 0 &= -\frac{1}{\text{ms}} C_1 \sin C_2 + C_1 \frac{1}{\text{ms}} \cos C_2 \end{aligned}$$

Man erhält so:

$$C_1 = -10 \sqrt{2} \text{ V} \text{ und } C_2 = \frac{\pi}{4}$$

Damit wird die Lösung der Differentialgleichung

$$u_a = 10 \text{ V} \left[ 1 - 1,41 e^{-\frac{1}{\text{ms}} t} \sin \left( \frac{1}{\text{ms}} t + \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

Das ist die rechnerische Formulierung der Übergangsfunktion.  
Nun noch die graphische Darstellung:

Kurvendiskussion:

Schnittpunkte mit der Geraden  $u_a = 10 \text{ V}$  bei

$$\sin \left( \frac{1}{\text{ms}} t + \frac{\pi}{4} \right) = 0 \quad t = \frac{3}{4}\pi \text{ ms} + n\pi \text{ ms}$$

n = ganze Zahl

Maxima und Minima (alle Zeiten in ms):

$$\dot{u}_a = -14,1 \text{ V e}^{-t} \left[ -\sin \left( t + \frac{\pi}{4} \right) + \cos \left( t + \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

Die Extremwerte liegen also bei

$$\sin \left( t + \frac{\pi}{4} \right) = \cos \left( t + \frac{\pi}{4} \right) \quad \curvearrowright \quad \tan \left( t + \frac{\pi}{4} \right) = 1$$

t = n · π ms  
n = ganze Zahl

Die Werte an diesen Stellen erhält man durch Einsetzen in  
 $u_a = \dots$

$t/\text{ms}$	$u_a = 10 \text{ V} \left[ 1 - 1,41 e^{-\frac{1}{\text{ms}}t} \sin \left( \frac{1}{\text{ms}}t + \frac{\pi}{4} \right) \right]$	$u_a/\text{V}$
$\pi$	$10 \text{ V} \left[ 1 - \frac{1,41}{e^{3,14}} \sin \left( \pi + \frac{\pi}{4} \right) \right]$	10,44
$2\pi$	$10 \text{ V} \left[ 1 - \frac{1,41}{e^{2 \cdot 3,14}} \frac{1}{2} \sqrt{2} \right]$	9,98
$3\pi$	$10 \text{ V} \left[ 1 + \frac{1}{e^{3 \cdot 3,14}} \right]$	10,00



Kreisfrequenz  $\omega = \frac{1}{\text{ms}}$

erste Überschwingung  $= x_1 = 10 \text{ V} \cdot e^{-\pi} = 0,44 \text{ V}$

$\frac{x_{n+1}}{x_n} = e^{-\pi} = 1:23$

Bild 82

Man achte auf die durch die e-Funktion bewirkte Verschiebung der Extremwerte. Die Extremwerte liegen nicht in der Mitte zwischen zwei Durchgängen der Funktion durch die Gerade  $u_a = 10 \text{ V}$ .

$$\text{Frequenzgang } F = \frac{u_a}{u_e} = \frac{1}{1 + ms p + 0,5 (ms)^2 p^2}$$

Ortskurve: (alle Zeiten in ms, alle Frequenzen in  $\frac{1}{ms}$ )

$$F = \frac{1}{1 - 0,5 \omega^2 + \omega j} \cdot \frac{1 - 0,5 \omega^2 - \omega j}{1 - 0,5 \omega^2 - \omega j}$$

$$= \frac{1 - 0,5 \omega^2}{(1 - 0,5 \omega^2)^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{(1 - 0,5 \omega^2)^2 + \omega^2} j$$

$\omega / \frac{1}{ms}$	Re	Im
0	1	0
0,25	0,97	0,25
0,5	0,86	0,49
1	0,4	- 0,8
2	0	- 0,7
2	- 0,2	- 0,4
3	- 0,16	- 0,14
4	- 0,11	- 0,06

Um die Ortskurve aus dem Frequenzgang zu entwickeln und sehr genau darzustellen, müßten sich noch Extremwertbetrachtungen für die Zeigerlänge (Resonanzerscheinungen!), für den Realteil und für den Imaginärteil anschließen. Das sind langwierige Rechnungen. Sie sind hier weggelassen, da doch der normale Weg zur Ortskurve der über die experimentelle Ortskurvenaufnahme ist.

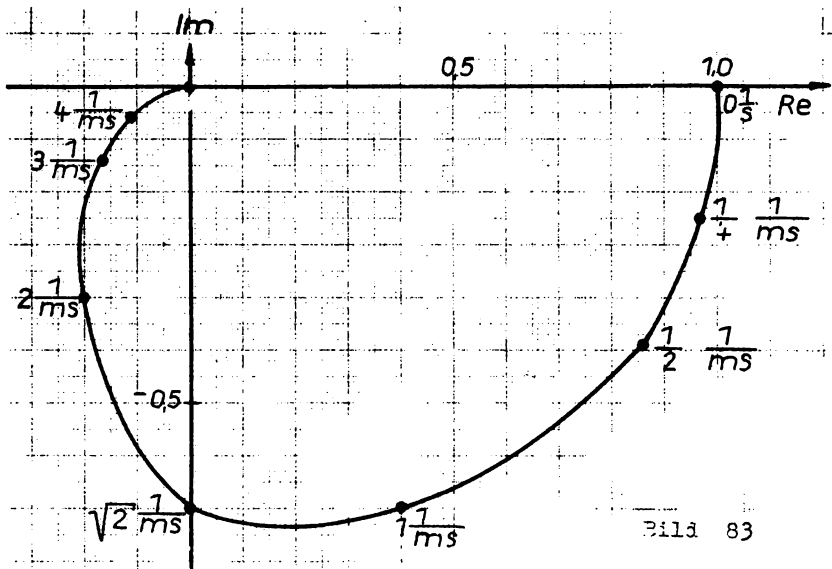


Bild 83

#### Aufgabe 2.6

$$T_2^2 \ddot{x} + T_1 \dot{x} + x = K u$$

$$K = \frac{10 \text{ cm}}{5 \text{ V}} = 2 \frac{\text{cm}}{\text{V}}, \quad \omega = \frac{1}{2 T_2^2} \sqrt{4 T_2^2 - T_1^2} = 2 \frac{1}{s}$$

$$\zeta = \frac{T_1}{2 T_2^2}, \quad \frac{x_1}{x_2} = 4 = e^{\frac{\pi \zeta}{\omega}}$$

Man erhält (mit allen Zeiten in s) zur Bestimmung von  $T_1$  und  $T_2^2$  folgendes Gleichungssystem:

$$\ln 4 = \frac{\pi T_1}{4 T_2^2}$$

$$4 T_2^2 = \sqrt{4 T_2^2 - T_1^2}, \text{ dessen Lösung } T_1 = 0,37 \text{ und } T_2^2 = 0,21$$

ergibt.

Die gesuchte Differentialgleichung lautet also

$$0,21 \text{ s}^2 \ddot{x} + 0,37 \text{ s} \dot{x} + x = 2 \frac{\text{cm}}{\text{V}} u$$

### Aufgabe 2.7

$$T_t = \frac{10 \text{ m}}{0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 20 \text{ s}, \quad \text{Gleichung: } x_a = x_e(t - 20 \text{ s})$$

Übergangsfunktion:

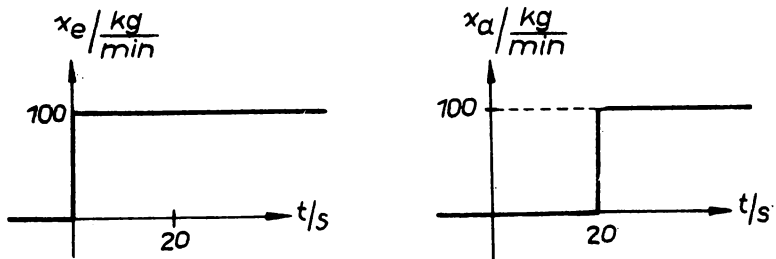


Bild 84

Frequenzgang:  $F = e^{-20 \text{ s } p}$

Ortskurve:

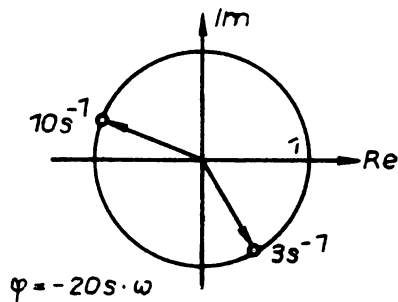


Bild 85

Aufgabe 2.8

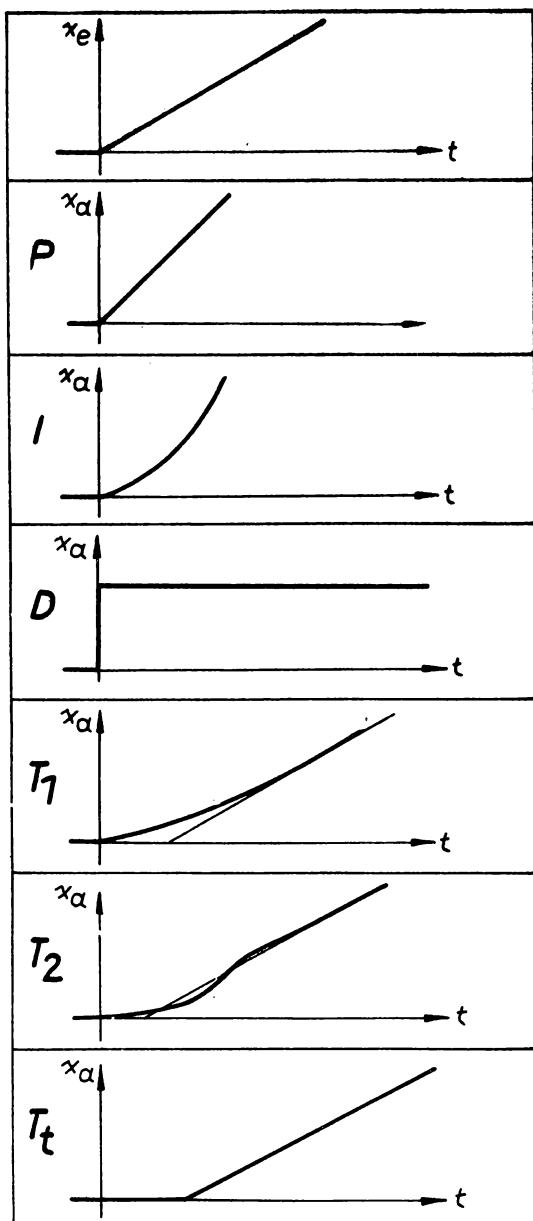


Bild 86



# Aufgabe 2.9

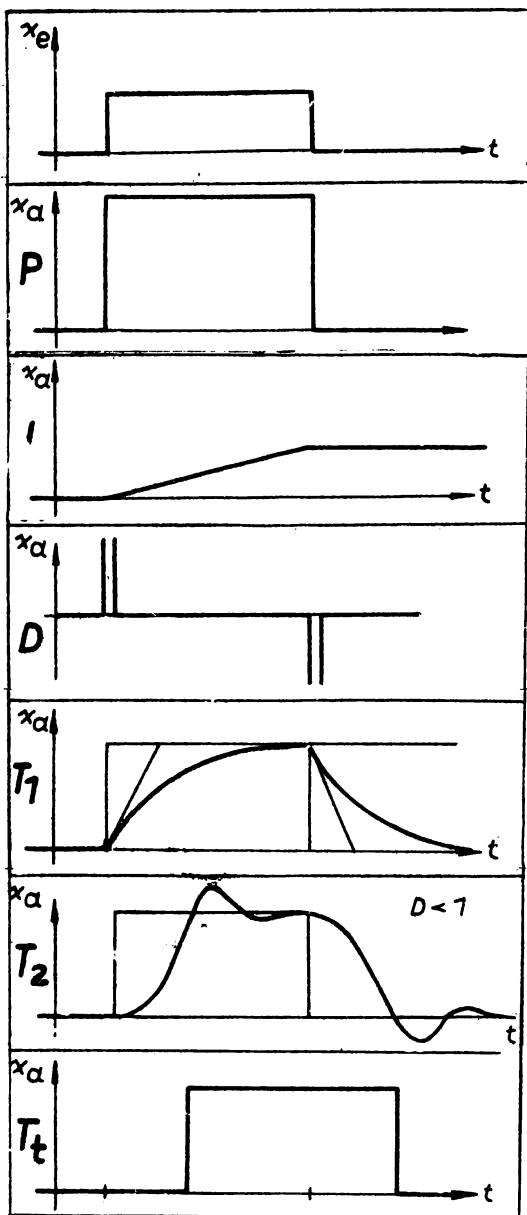


Bild 87

#### Aufgabe 4.1

Die Übergangsfunktion eines Gliedes ist die graphische Darstellung des Ausgangs für Eingang =  $\sqrt{c}$  = Sprungeingang.

PI-Glied:  $x_a = K (x_e + \frac{1}{T_n} \int x_e dt)$ , für  $x_e = c$  ist

$x_a = K (c + \frac{1}{T_n} c t)$ , wenn als Anfangsbedingung  
für die Integration

$x_a(+0) = Kc$  genommen wurde. Grundsätzlich arbeitet das PI-Glied von der Bezugsstelle aus (Anfangsbedingung), auf die es auf Grund der vorangehenden Arbeitsweise gekommen ist.

PD-Glied:  $x_a = K (x_e + T_v \dot{x}_e)$

$x_a = K (c + D)$  mit  $D = \begin{cases} + \infty & \text{für } t = 0 \\ 0 & \text{für } t \neq 0 \end{cases}$

PID-Glied:  $x_a = K (x_e + \frac{1}{T_n} \int x_e dt + T_v \dot{x}_e)$

$x_a = K (c + \frac{1}{T_n} c t + D)$  mit  $D = \begin{cases} + \infty & \text{für } t = 0 \\ 0 & \text{für } t \neq 0 \end{cases}$

Die Ortskurve eines Gliedes ist die graphische Darstellung des Frequenzganges.

PI-Glied:  $F = K (1 + \frac{1}{T_n \omega j}) = K - \frac{K}{T_n \omega} j$

$\text{Re} = K = \text{konstant}$   Ortskurve = Gerade

$\text{Im} = \begin{cases} -\infty & \text{für } \omega = 0 \\ 0 & \text{für } \omega = \infty \end{cases}$

PD-Glied:  $F = K (1 + T_v p) = K + K T_v \omega j$

$\text{Re} = K = \text{konstant}$   Ortskurve = Gerade

$\text{Im} = \begin{cases} 0 & \text{für } \omega = 0 \\ +\infty & \text{für } \omega = \infty \end{cases}$

$$\text{PID-Glied: } F = K \left( 1 + \frac{1}{T_n \omega j} + T_v \omega j \right)$$

$$= K + \left( K T_v \omega - \frac{K}{T_n \omega} \right) j$$

Re = K = konstant  Ortskurve = Gerade

$$\text{Im} = \begin{cases} -\infty & \text{für } \omega = 0 \\ +\infty & \text{für } \omega = \infty \end{cases}$$

#### Aufgabe 4.2

Rückführung Name	Rückführung Frequenzgang	Frequenzgang des Reglers	Kennwerte des Reglers		
			$K_R$	$T_n$	$T_v$
starr (P-Rückf.)	$K_R$	$\frac{1}{K_R}$	$\frac{1}{K_R}$	-	-
nachgebend (DT <sub>1</sub> -Rückf.)	$\frac{K_R p}{1 + T_R p}$	$\frac{T_R}{K_R} \left( 1 + \frac{1}{T_R} p \right)$	$\frac{T_R}{K_R}$	$T_R$	-
verzögert (PT <sub>1</sub> -Rückf.)	$\frac{K_R}{1 + T_R p}$	$\frac{1}{K_R} (1 + T_R p)$	$\frac{1}{K_R}$	-	$T_R$
nachgebend und verzögert (DT <sub>2</sub> -Rückf.)	$\frac{K_R p}{1 + T_1 p + T_2 p^2}$	$\frac{T_1}{K_R} \left( 1 + \frac{1}{T_1} p + \frac{T_2}{T_1} p^2 \right)$	$\frac{T_1}{K_R}$	$T_1$	$\frac{T_2}{T_1}$
differenzie- rend (D-Rückf.)	$K_R p$	$\frac{1}{K_R p}$	-	-	-

Bild 88

### Aufgabe 4.3

$$F_v = K_v, \quad F_r = K_r$$

$$F = \frac{x_a}{x_e} = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r} = \frac{K_v}{1 + K_v K_r}$$

$$x_a = \frac{K_v}{1 + K_v K_r} x_e$$

### Aufgabe 4.4

$$F_v = \frac{K_v}{p}, \quad F_r = \frac{K_r}{p}$$

$$F = \frac{x_a}{x_e} = \frac{1}{\frac{p}{K_v} + \frac{K_r}{p}} = \frac{K_v p}{p^2 + K_v K_r} = \frac{\frac{1}{K_r} p}{1 + \frac{1}{K_v K_r} p^2}$$

$$\frac{1}{K_v K_r} \ddot{x}_a + \dot{x}_a = \frac{1}{K_r} \dot{x}_e$$

Die Lösungsfunktion dieser Differentialgleichung ist eine Dauerschwingung mit konstanter Amplitude (Schwingungsdifferentialgleichung!). Das heißt also: Zwei gegeneinander geschaltete I-Glieder sind von der Struktur der Schaltung her instabil. Die Schaltung ist "strukturinstabil". Wie auch  $K_v$  und  $K_r$  eingestellt werden mögen, Stabilität ist nicht zu erreichen.

### Aufgabe 4.5

$$F = \frac{x}{z} = \frac{1}{\frac{1 + T_s p}{K_s} + K_r \left(1 + \frac{1}{T_n p}\right)}$$

Umformung ergibt:

$$F = \frac{x}{z} = \frac{\frac{T_n}{K_r} p}{1 + T_n \left(1 + \frac{1}{K_s K_r}\right) p + \frac{T_s T_n}{K_s K_r} p^2}$$

#### Aufgabe 4.6

$$F = \frac{1}{(1 + 60 s p) (1 + 100 s p)} = \frac{1}{1 + 160 s p + 6000 s^2 p^2}$$

#### Aufgabe 4.7

$$F_v = \frac{K_v}{p}, \quad F_r = K_r$$

$$F = \frac{x_a}{x_e} = \frac{1}{\frac{p}{K_v} + K_r} = \frac{K_v}{p + K_v K_r} = \frac{\frac{1}{K_r}}{1 + \frac{1}{K_v K_r} p}$$

$$\frac{1}{K_v K_r} \dot{x}_a + x_a = \frac{1}{K_r} x_e \quad (\text{PT}_1\text{-Glieder})$$

#### Aufgabe 4.8

$$F = \frac{x_a}{x_e} = \frac{1}{2 s p} \quad x_a = \frac{1}{2 s} \int x_e dt$$

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{1}{2 s} \int 3 V \sin \frac{5}{s} t dt \\ &= \frac{3 V s}{2 s^2 5} (-\cos \frac{5}{s} t) + C_1 \end{aligned}$$

Die Anfangsbedingung verlangt  $0 = -0,3 V + C_1 \quad \hookrightarrow \quad C_1 = 0,3 V$

$$x_a = 0,3 V (1 - \cos \frac{5}{s} t)$$

### Aufgabe 4.9

a) Blockschaltbild

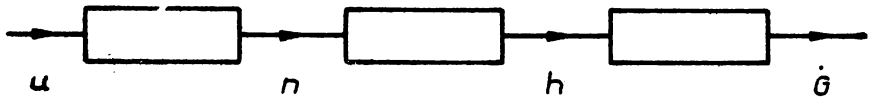


Bild 89

b) Motor:  $0,5 \text{ s } \dot{n} + n = \frac{10 \frac{1}{\text{min}}}{20 \text{ V}} u$

Spindel:  $\dot{h} = \frac{4 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{1 \frac{1}{\text{s}}} n = 4 \text{ mm } n$

Ventil:  $\dot{G} = \frac{3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{5 \text{ mm}} h$

Es soll die Abhängigkeit des Durchflusses  $\dot{G}$  von der Steuerspannung  $u$  bestimmt werden. Elimination von  $n$  und  $h$  ergibt

$$0,5 \text{ s } \ddot{G} + \dot{G} = 1,2 \frac{\frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\text{min V}} \int u \, dt$$

c)  $F = \frac{\text{Durchfluß } \dot{G}}{\text{Steuerspannung } u} = \frac{1,2 \frac{\text{kg/s}}{\text{min V}} \cdot \frac{1}{p}}{1 + 0,5 \text{ s } p}$

d) Die Anordnung hat  $IT_1$ -Verhalten.

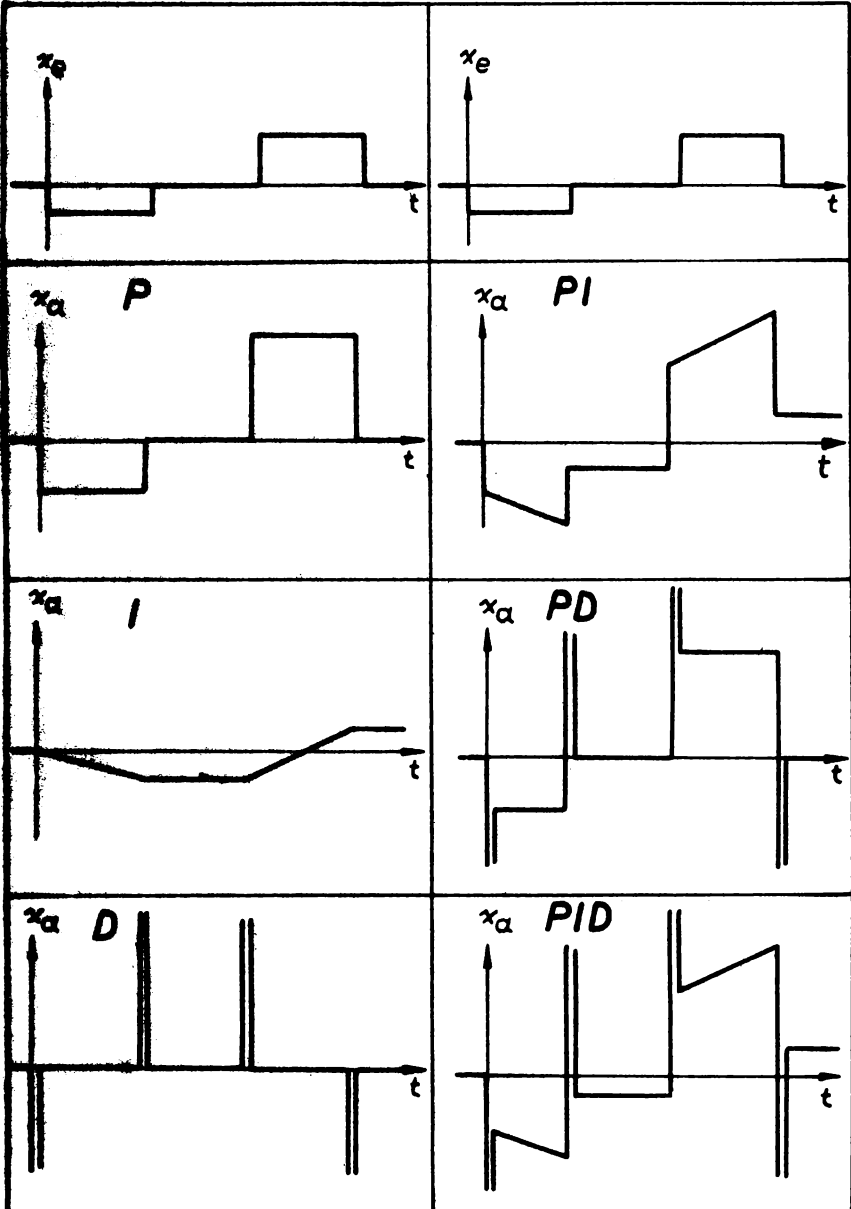
### Aufgabe 4.10

$$K = \frac{2 \text{ V/s}}{\frac{5 \text{ V}}{10 \text{ s}}} = 4, \quad T_v = 5 \text{ s}$$

### Aufgabe 4.11

Verstärkung  $K = -2$ , Nachstellzeit  $T_n = 10 \text{ min}$

# Aufgabe 4.12



### Aufgabe 4.13

$$1.) \quad \frac{u_a}{u_e} = \frac{\frac{1}{C p}}{R + \frac{1}{C p}} = \frac{1}{1 + R C p} \quad (T_1\text{-Verhalten})$$

2.) Die Impedanz der Parallelschaltung von  $C$  und  $R_2$  erhält man zunächst als:

$$Z = \frac{\frac{1}{C p} R_2}{\frac{1}{C p} + R_2} = \frac{R_2}{1 + R_2 C p}$$

Mit dieser Beziehung ergibt sich der gesuchte Frequenzgang:

$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{\frac{R_2}{1 + R_2 C p}}{R_1 + \frac{R_2}{1 + R_2 C p}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_1 R_2 C p}$$

$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C p} \quad (PT_1\text{-Verhalten})$$

$$3.) \quad \frac{u_a}{u_e} = \frac{R}{R + \frac{1}{C p}} = \frac{R C p}{1 + R C p} \quad (DT_1\text{-Verhalten})$$

$$4.) \quad \frac{u_a}{u_e} = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{R_2 + \frac{1}{1 + R_1 C p}} = \frac{R_2 (1 + R_1 C p)}{R_1 + R_2 + R_1 R_2 C p}$$



$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (1 + R_1 C p)}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C p} \quad (\text{PDT}_1\text{-Verhalten})$$

$$5.) \quad \frac{u_a}{u_e} = \frac{R_2 + \frac{1}{C p}}{R_1 + R_2 + \frac{1}{C p}} = \frac{1 + R_2 C p}{1 + (R_1 + R_2) C p} \quad (\text{PDT}_1\text{-Verhalten})$$

$$6.) \quad \frac{u_a}{u_e} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \frac{1}{C p}} = \frac{R_2 C p}{1 + (R_1 + R_2) C p} \quad (\text{DT}_1\text{-Verhalten})$$

7.) Diese Schaltung läßt sich durch Zusammenfassung von Impedanzen nicht auf einen unverzweigten Stromkreis zurückführen, wie das bei den Beispielen 1 - 6 leicht möglich war.

Man muß mehrere Gleichungen aufschreiben und aus diesen Beziehungen  $u_a : u_e$  ausrechnen.

$I_1$  = Strom durch  $C_1$

$I_2$  = Strom durch  $C_2$  und  $R_2$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + \frac{1}{C_2 p}}{\frac{1}{C_1 p}} = \frac{C_1}{C_2} + R_2 C_1 p$$

$$I_1 + I_2 = I$$

$$u_a = I_2 R_2$$

$$u_e = I R_{\text{gesamt}} = I R_1 + \frac{\frac{1}{C_1 p} (R_2 + \frac{1}{C_2 p})}{\frac{1}{C_1 p} + R_2 + \frac{1}{C_2 p}}$$

Zur Vereinfachung der sich nun zur Bildung von  $\frac{u_a}{u_e}$  anschließenden Umformungen sei  $C_1 = C_2 = C$  angenommen.

Man erhält:

$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{R_2 C p + \frac{1}{2} R_2^2 C^2 p^2}{1 + \frac{C}{2} (4 R_1 + 3 R_2) p + \frac{C^2}{2} (4 R_1 R_2 + R_2^2) p^2 + \frac{C^3}{2} R_1 R_2^2 p^3}$$

( $D_2 T_3$ -Verhalten)

Die Schaltung stellt einen Vorhalt 2. Ordnung mit Verzögerung 3. Ordnung dar. Sie wird als verzögerte und nachgebende Rückführung in Reglern verwendet. Dieses Verhalten kann man sich auch anschaulich deutlich machen. Für  $u_e = c =$  Sprungeingang ist  $u_a$  zunächst 0 und steigt so, wie der Kondensator  $C_1$  über  $R_1$  aufgeladen wird, verzögert an. Noch mehr verzögert (über  $R_1$  und  $R_2$ ) wird aber auch der Kondensator  $C_2$  aufgeladen. Damit wird der verzögerte Anstieg von  $u_a$  wieder rückgängig gemacht, und  $u_a$  wird für  $t \rightarrow \infty$  zu null.

### Aufgabe 5.1

$$a) K_s = \frac{190 \text{ grd}}{80 \text{ W}} = 2,38 \frac{\text{grd}}{\text{W}}, \quad q = \frac{1}{K_s} = 0,42 \frac{\text{W}}{\text{grd}}$$

Durch Aufzeichnen findet man  $T_s \approx 90 \text{ min}$ ,  $T_t \approx 5 \text{ min}$

$$b) \frac{T_s}{T_t} \approx 18 > 10 \quad \curvearrowright \quad \text{Strecke gut regelbar.}$$

### Aufgabe 5.2

$$K_s = \frac{120 \frac{\text{mm WS}}{50 \frac{1}{\text{min}}}} = 2,4 \frac{\text{mm WS}}{\frac{1}{\text{min}}}, \quad q = 0,42 \frac{\frac{1}{\text{min}}}{\text{mm WS}}$$

### Aufgabe 5.3

$$K_s = \frac{75 \frac{\text{grd}}{25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}} = 3 \frac{\text{grd}}{\frac{\text{m}^3}{\text{h}}}, \quad q = \frac{1}{3} \frac{\frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\text{grd}}$$

### Aufgabe 5.4

- a) Nach  $3T_s$  bis  $4T_s$  ist bei einem Übergang 1. Ordnung der Endwert praktisch erreicht.

$$2 \cdot 60 \text{ min} - 10 \text{ min} \approx 4 T_s \quad \curvearrowright \quad T_s \approx 30 \text{ min}$$

$$K_s = \frac{40 \frac{\text{grd}}{4 \text{ mm}}}{1} = 10 \frac{\text{grd}}{\text{mm}}$$

$$F(p) = \frac{10 \frac{\text{grd}}{\text{mm}}}{1 + 30 \text{ min } p} e^{-10 \text{ min } p}$$

$$\text{b) } F(p) = \frac{10 \frac{\text{grd}}{\text{mm}}}{(1 + 30 \text{ min } p)(1 + 10 \text{ min } p)}$$

c)

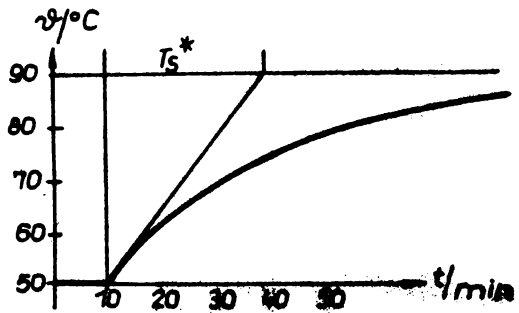
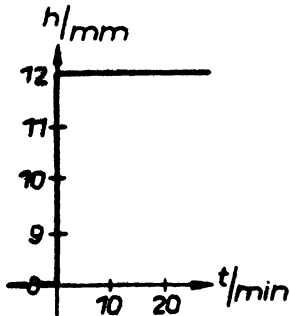


Bild 90

### Aufgabe 5.5

a)  $p_a = 100 \text{ mm WS} (1 - e^{-\frac{1}{60 \text{ s}} t})$

b) Übergangsfunktion

c) Frequenzgang

$$F(p) = \frac{1 \frac{\text{mm WS}}{\text{mm WS}}}{1 + 1 \text{ min } p}$$

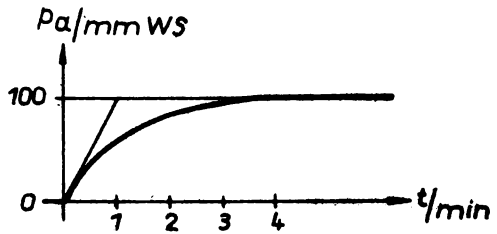


Bild 91

d) Ortskurve

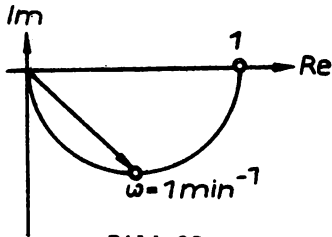


Bild 92

### Aufgabe 5.6

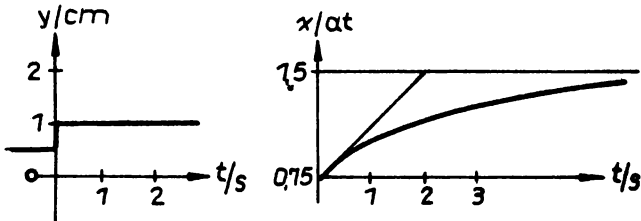


Bild 93

### Aufgabe 5.7

$$K_s = \frac{25 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 2,5, \quad q = 0,13$$

### Aufgabe 5.8

Das Verhältnis  $\frac{T}{T_k}$  ist kleiner als 3, also ist die Temperaturregelung mit einem einschleifigen Regelkreis schwer zu bewältigen. Es werden in der Praxis durchweg Aufschaltungen von Hilfsgrößen vorgenommen.

### Aufgabe 5.9

$$\frac{dx}{dt} = \frac{40 \text{ cm}}{20 \text{ s}}, \quad A = \frac{1}{\frac{dx}{dt}} \cdot \frac{y_0}{y_h} = \frac{1}{2 \text{ cm/s}} \cdot \frac{5 \text{ m}^3/\text{h}}{15 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$A = \frac{1}{8} \frac{\text{s}}{\text{cm}}, \quad K_I = \frac{6 \text{ cm/s}}{15 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,4 \frac{\text{cm/s}}{\text{m}^3/\text{h}}$$

### Aufgabe 5.10

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max} = \frac{2 \text{ m}^3/\text{min}}{6 \text{ m}^2} = \frac{1}{3} \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$A = \frac{1}{\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max}} = 3 \frac{\text{min}}{\text{m}}$$

### Aufgabe 5.11

In der Zeit  $dt$  erhöht sich die Temperatur um  $d\vartheta$

Gleichungsansatz:

In der Zeit  $dt$  zugeführte Energie = In der Zeit  $dt$  abgeführte Energie + In der Zeit  $dt$  gespeicherte Energie

$$239 \frac{\text{cal}}{\text{s}} dt = 0,2 \frac{\text{kg}}{\text{min}} dt \cdot 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \text{ } ^\circ\text{C}} + 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \text{ } ^\circ\text{C}} d\vartheta$$

Division aller Glieder der Gleichung durch  $\frac{\text{cal} \cdot dt}{\text{s} \text{ } ^\circ\text{C}}$  und Verwendung der Beziehungen  $1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$  und  $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$  führt auf:

$$239 \text{ grad} = \frac{200}{60} \dot{\vartheta} + 1000 \text{ s} \frac{d\dot{\vartheta}}{dt}$$

$$300 \text{ s} \dot{\vartheta} + \vartheta = 71,7 \text{ grad}$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet unter Verwendung der Anfangsbedingung  $\vartheta(0) = 0$ :

$$\vartheta(t) = 71,7 \text{ grad} \left(1 - e^{-\frac{1}{5 \text{ min}} t}\right)$$

Die sich einstellende Endtemperatur beträgt  $91,7^\circ \text{C}$ .

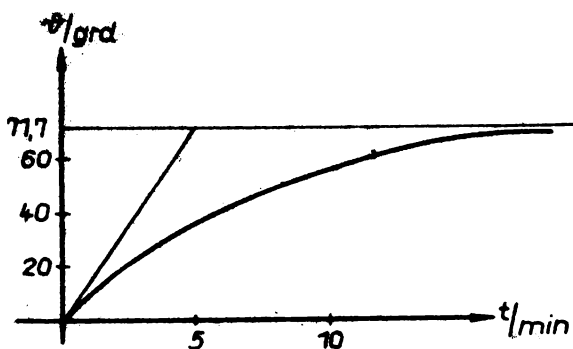


Bild 94

### Aufgabe 5.12

$$\begin{aligned} \text{a) } F(p) &= \frac{\vartheta}{N} = \frac{0,5 \frac{\text{grad}}{\text{W}}}{1 + 35 \text{ min } p + 300 \text{ min}^2 p^2} \\ &= \frac{0,5 \frac{\text{grad}}{\text{W}}}{(1 + 15 \text{ min } p)(1 + 20 \text{ min } p)} \end{aligned}$$

Modellzeitkonstanten:

$$T_{s1} = \frac{15 \cdot 60 \text{ s}}{3000} = 0,3 \text{ s}$$

$$T_{s2} = \frac{20 \cdot 60 \text{ s}}{3000} = 0,4 \text{ s}$$

b) Eingangsgrößen:  $1000 \text{ grad} \hat{=} 60 \text{ V} \curvearrowright 1 \text{ grad} \hat{=} 0,06 \text{ V}$   
 Ausgangsgrößen:  $2000 \text{ W} \hat{=} 60 \text{ V} \curvearrowright 1 \text{ W} \hat{=} 0,03 \text{ V}$

$$c) F_{\text{Modell}} = \frac{0,5 \frac{0,06 \text{ V}}{0,03 \text{ V}}}{(1+0,3s \cdot p)(1+0,4s \cdot p)}$$

$$0,12 \text{ s}^2 \ddot{u}_a + 0,7 \text{ s} \dot{u}_a + u_a = u_e$$

$$d) T_s = R C \quad R_1 = \frac{0,3 \text{ s}}{10 \mu\text{F}} = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{0,4 \text{ s}}{10 \mu\text{F}} = 40 \text{ k}\Omega$$





# INGENIEUR FERNSTUDIUM

Birnstiel

## Einführung in die Regelungs- und Steuerungstechnik 4.1

Regler

Herausgeber:  
Ingenieurschule für  
Feinwerktechnik, Jena

LEHRWERK  
für das Ingenieur-Fernstudium

Horst Birnstiel

EINFÜHRUNG IN  
DIE REGELUNGS - UND  
STEUERUNGSTECHNIK

4.1

Regler

Veröffentlicht:  
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER  
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK  
KARL - MARX - STADT

Alle Rechte vorbehalten

Gebühr DM 2.50

Ag 613/167/64/1400

Best.-Nr. 1008-04.1

# Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einteilung der Glieder von Steuerungen und Regelungen nach TGL 14591	1
Wiederholungsfragen	3
2. Einteilung der Regler	9
3. Stetige lineare Regler, Grundbegriffe	11
Wiederholungsfragen	26
Aufgaben	27
4. Beispiele stetiger Regler ohne Rückführung	29
4.1. Beispiele von P-Reglern ohne Rückführung	29
4.1.1. P-Regler ohne Hilfsenergie	29
4.1.2. P-Regler mit pneumatischer Hilfsenergie	30
4.1.3. P-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie	33
4.1.4. P-Regler mit elektrischer Hilfsenergie	35
4.1.5. P-Regler mit elektronischer Hilfsenergie	37
4.2. Beispiele von I-Reglern ohne Rückführung	38
4.2.1. I-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie	38
4.2.2. I-Regler mit elektrischer Hilfsenergie	39
4.3. Beispiele von PI-, PD-, PID-Reglern ohne Rückführung	41
4.4. Nachteile von Reglern ohne Hilfsenergie	43
Wiederholungsfragen	46
5. Rückführungen	46
5.1. Beispiel	46
5.2. Theoretische Grundlagen zu den Rückführungen	48
5.3. Die gerätemäßige Verwirklichung der verschiedenen Rückführungen	53
Wiederholungsfragen	61
Aufgaben	62
Lösungen der Aufgaben	65

## 1. Einteilung der Glieder von Steuerungen und Regelungen nach TGL 14591

---

Steuern und Regeln sind technische Vorgänge in abgegrenzten Systemen, bei denen die Werte physikalischer oder technischer Größen auf Grund eingebauter Gesetzmäßigkeiten in beabsichtigter Weise beeinflusst werden. Steuerungen und Regelungen können gerätetechnisch und funktionell betrachtet werden. Bei der gerätetechnischen Betrachtung werden die verwendeten Geräte, Bauglieder und sonstigen Einrichtungen sowie Anlagen und Anlagenteile unter besonderer Berücksichtigung der in ihnen wirkenden physikalischen und technischen Gesetzmäßigkeiten und Größen sowie ihrer Aufgabenstellung innerhalb des Steuerungs- oder Regelungsprozesses beschrieben.

Bei der funktionellen Betrachtung wird die prinzipielle Realisierung des gesamten Steuerungs- bzw. Regelungsprozesses auf Grund der Zuordnung der wirksamen Signale beschrieben. Der Weg, längs dessen die einen Steuerungs- bzw. Regelungsprozeß bestimmenden Wirkungen übertragen werden, heißt Wirkungsweg. Glieder sind Abschnitte des Wirkungsweges und als solche die wirkungsmäßigen Grundbestandteile von Steuerungen bzw. Regelungen. Bei der gerätetechnischen Betrachtung spricht man von Baugliedern, bei der funktionellen Betrachtung von Übertragungsgliedern. Die Wirkungsrichtung ist die Fortpflanzungsrichtung der Wirkungen. Sie kann nur angegeben werden, wenn alle beteiligten Glieder rückwirkungsfrei sind.

Glieder werden danach eingeteilt, welche Eingangssignale sie zu welchen Ausgangssignalen verarbeiten. Die also zunächst notwendige Unterteilung der Signale möge von einem Beispiel ausgehend erfolgen (Bild 1).

Ein induktiver Geber formt einen Weg in eine Wechselspannung um. Die Wechselspannung wird durch ihre Amplitude, ihre Frequenz und ihre Phasenlage bestimmt. Amplitude, Fre-

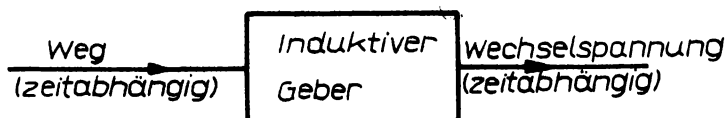


Bild 1

quenz und Phasenlage sind Parameter (Bestimmungswerte) der Wechselspannung. Der Weg wird auf die Amplitude der Wechselspannung abgebildet. Die Wechselspannung als Signal hat einen Parameter (Amplitude), der ein Abbild des Eingangsweges ist.

Allgemein:

Eine von einer physikalischen Größe getragene Zeitfunktion wird Signal genannt, wenn diese Zeitfunktion einen Parameter besitzt, der den Werteverlauf einer technischen oder physikalischen Größe, die signalisierte Größe genannt wird, abbildet.

Dieser Parameter läßt dabei eindeutige Rückschlüsse auf die signalisierte Größe zu. Der Parameter des Signals, auf den der Werteverlauf der signalisierten Größe abgebildet wird, heißt Informationsparameter. Diejenige physikalische Größe, von der das Signal getragen wird, heißt Signalträger. Die Dimension eines Signals ist die Dimension des Informationsparameters. Es gibt meßwertabhängige Signale (die signalisierte Größe ist eine im Prozeß gemessene Größe) und Be-fehlssignale (die signalisierte Größe ist Ausgangsgröße einer Eingabeeinrichtung, z.B. eines Schalters oder einer Kurvenscheibe).

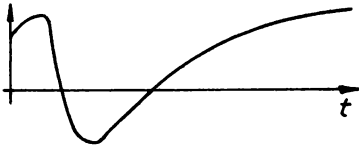
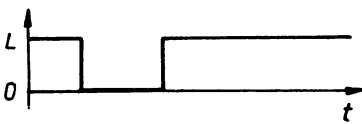
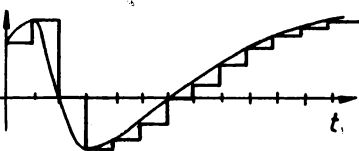
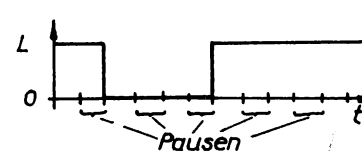
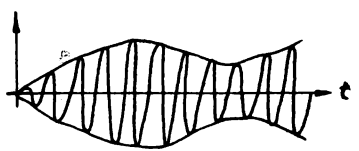
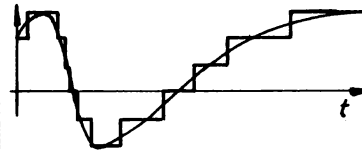

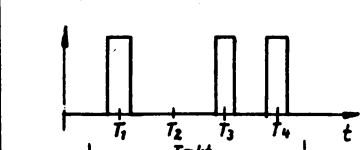
Die Einteilung der Signale kann nach verschiedenen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Dabei sind Teilungen in zwei Gruppen, von denen die eine das Gegenteil der anderen ist, am übersichtlichsten.

Mehrere solcher Teilungen werden im folgenden vorgenommen, mit Beispielen erläutert und schließlich in einer Übersicht zusammengestellt.

#### Wiederholungsfragen zu 1.

1. Was ist ein Signal?
2. Was versteht man unter dem Informationsparameter eines Signals?
3. Welche physikalischen Größen kommen hauptsächlich als Signalträger vor?
4. Welches sind die Kennzeichen von analogen bzw. diskreten Signalen?
5. Nennen Sie Beispiele von analogen bzw. diskreten Signalen!
6. Welches sind die Kennzeichen von kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen Signalen?
7. Nennen Sie Beispiele von kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen Signalen!
8. Welches sind die Kennzeichen von stetigen bzw. unstetigen Signalen?
9. Nennen Sie Beispiele von stetigen bzw. unstetigen Signalen!
10. Wodurch ist ein digitales Signal charakterisiert?
11. Nennen Sie Beispiele von Zweipunktsignalen!
12. Verdecken Sie die rechte Seite der Tabelle 6 und charakterisieren Sie mit eigenen Worten die verschiedenen Glieder!

Tab.  
1

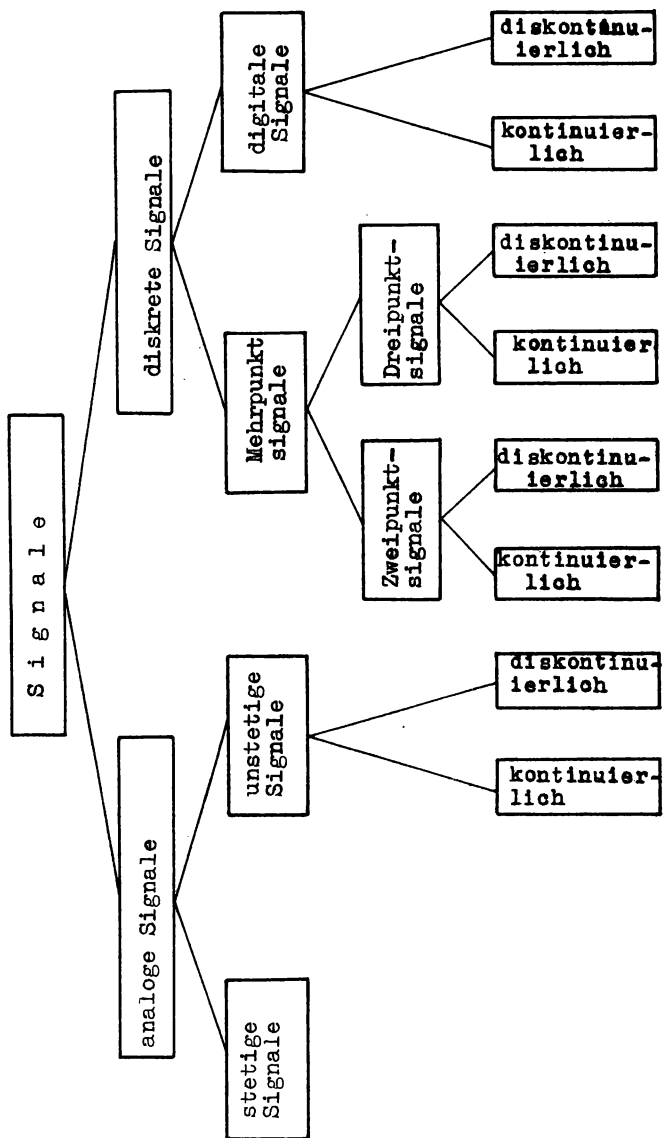
Bezeichnung	Signale	
	ohne Quantisierung des Informationsparameters	mit Quantisierung des Informationsparameters
	analoge Signale	diskrete Signale
Kennzeichen	Der Informationsparameter kann innerhalb gewisser Grenzen jeden beliebigen Wert annehmen.	Der Informationsparameter kann nur endlich viele (diskrete) Werte annehmen.
Beispiele	 <p>1, 2</p> <p><math>J_p</math> = Amplitude</p>	 <p>Der <math>J_p</math> kann nur 2 Werte (0 u. L) annehmen (binäre Signale)</p>
3, 4	 <p><math>J_p</math> = Höhe der Rechteckimpulse In gewissen Grenzen ist jede Höhe möglich.</p>	 <p>Ausgang eines Zweipunkt-Fallbühel-Reglers. In den Tastpausen wird der Wert der vorangehenden Tastung übertragen</p>
5, 6	 <p><math>J_p</math> = Amplitude</p>	 <p><math>J_p</math> = Höhe der Rechteckimpulse Es sind nur Höhen, die ganzzahlige Vielfache einer Einheit sind, möglich.</p>
7, 8	 <p><math>J_p</math> = Breite der Rechteckimpulse In gewissen Grenzen ist jede Breite möglich.</p>	 <p><math>J_p</math> = Anordnung von Impulsen. Zu bestimmten Zeitpunkten <math>T_i</math> kann ein Impuls erscheinen oder nicht. Die Anordnung der Impulse enthält die Information.</p>



Tab. 2	Signale	
	ohne Zeitquantisierung	mit Zeitquantisierung
Bezeichnung	<i>kontinuierliche Signale</i>	<i>diskontinuierliche Signale</i>
Kennzeichen	<i>Der Informationsparameter kann sich in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern</i>	<i>Der Informationsparameter kann sich nicht in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern.</i>
Beispiele nach Tab.1	1, 2, 5, 6	3, 4, 7, 8

Tab.3	Signale	
	<i>stetige Signale</i>	<i>unstetige Signale</i>
Bezeichnung		
Kennzeichen	<i>Der zeitliche Verlauf des Informationsparameters ist eine stetige Funktion der Zeit.</i>	<i>Der zeitliche Verlauf des Informationsparameters ist eine unstetige Funktion der Zeit</i>
Beispiele nach Tab.1	1, 5	3, 7, 2, 4, 6, 8

Tab. 4	Diskrete Signale	
	<i>Mehrpunktsignale</i>	<i>Digitale Signale</i>
Bezeichnung		
Kennzeichen	<i>Mehrpunktsignale sind alle diskreten Signale, die keine digitalen Signale sind.</i>	<i>Die diskreten Werte des Informationsparameters entsprechen Worten eines vereinbarten Alphabetes.</i>
Beispiele nach Tab.1	2, 4	6, 8



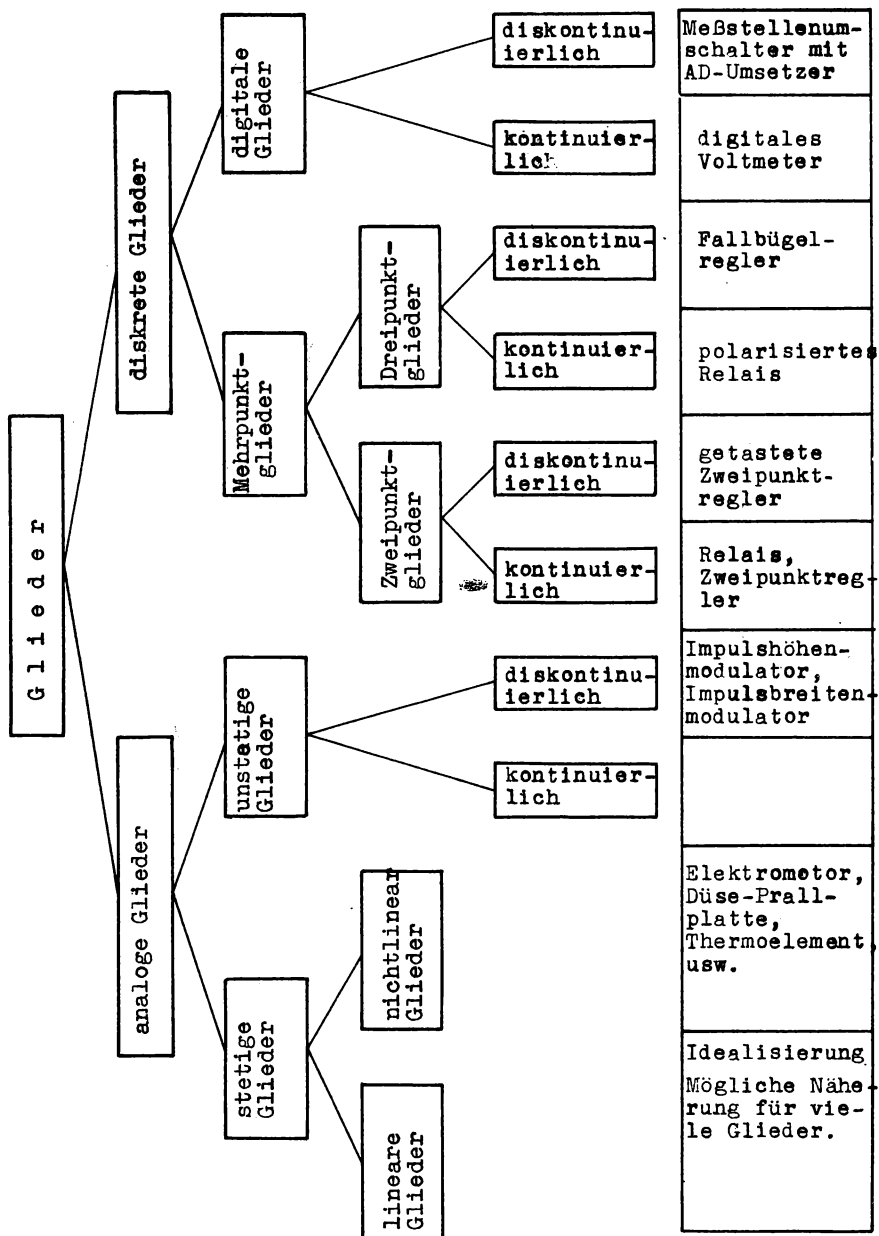
Tab. 5

Die Einteilung der Glieder wird anhand der übertragenen Signale vorgenommen.  
 Man erhält so in Anlehnung an die Signaleinteilung die folgenden Bezeichnungen.

Tabelle 6

<u>Bezeichnung</u>	<u>Kennzeichen</u>
analoge Glieder	Zu analogen Eingangssignalen werden analoge Ausgangssignale abgegeben.
diskrete Glieder	Die Ausgangssignale sind diskret (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
kontinuierliche Glieder	Zu kontinuierlichen Eingangssignalen werden kontinuierliche Ausgangssignale abgegeben.
diskontinuierliche Glieder	Die Ausgangssignale sind diskontinuierlich (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
stetige Glieder	Zu stetigen (und ggf. in allen ihren Ableitungen stetigen) Eingangssignalen werden stetige Ausgangssignale abgegeben.
unstetige Glieder	Die Ausgangssignale sind unstetig (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
lineare Glieder	Es gilt das Überlagerungsgesetz. $k$ -fache Eingangsänderungen ergeben $k$ -fache Ausgangsänderungen.
nichtlineare Glieder	Das Überlagerungsgesetz gilt nicht.
Mehrpunktglieder	Die Ausgangssignale sind Mehrpunktsignale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
digitale Glieder	Die Ausgangssignale sind digitale Signale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
Zweipunktglieder	Die Ausgangssignale sind Zweipunktsignale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
binäre Glieder	Binäre Eingangssignale werden zu binären Ausgangssignalen verarbeitet.
Dreipunktglieder	Die Ausgangssignale sind Dreipunktsignale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).

Als übersichtliche Zusammenstellung der Unterteilungen ergibt sich Tabelle 7.



Tab. 7

## 2. Einteilung der Regler

"Das Regeln - die Regelung - ist ein technischer Vorgang in einem abgegrenzten System, bei dem eine technische oder physikalische Größe - die zu regelnde Größe (Regelgröße) - fortlaufend erfaßt und durch Vergleich ihres Signales mit dem Signal einer anderen Größe (Führungsgröße) im Sinne einer Angleichung an deren Signal beeinflußt wird. Der hierzu notwendige Wirkungsablauf vollzieht sich in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis. Innerhalb des Regelkreises wird stets gemessen, verglichen und gestellt.

Fortlaufend im Sinne der angegebenen Definition des Regelns ist jeder Vorgang, der sich aus einer hinreichend häufigen Wiederholung gleichartiger Einzelvorgänge zusammensetzt, z.B. Abtastregelungen, Zweipunktregelungen." (TGL 14591)

Der Regelkreis besteht aus Regelstrecke und Regeleinrichtung (Bild 2). Regelstrecken und Regeleinrichtungen sind

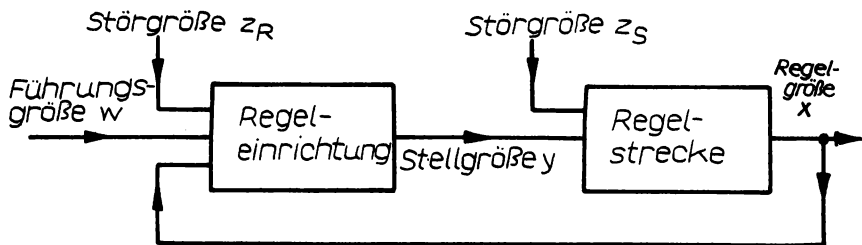


Bild 2

Übertragungsglieder und werden als solche eingeteilt und benannt. Als Regler wird ein der Regeleinrichtung angehörendes Gerät bezeichnet, wenn es die wesentliche Verarbeitung des Signals der Regelabweichung durchführt. Meßeinrichtung, Wandler, Vergleichsglied, Verstärker, Stellantrieb sind Teile der Regeleinrichtung. Das Stellglied zählt man zur Regelstrecke.

In diesem Lehrbrief wird von den prinzipiellen Möglichkeiten der Verarbeitung der Regelabweichung zu einer Stellab-

weichung die Rede sein. Dabei wird nur der wesentliche Teil dieser Signalverarbeitung besprochen. Die Meßeinrichtung, die Wandler, die Leistungsverstärker und Stellantriebe werden meist nicht behandelt. Der Titel des Lehrbriefes lautet also zu Recht: Regler. Nun sind natürlich die Regler wieder Übertragungsglieder und werden als solche eingeteilt und benannt. Es gibt also z.B. analoge Regler, diskrete Regler, diskontinuierliche Zweipunktregler, lineare stetige Regler, usw.

Zur technischen Beschreibung dieser Regler und von Systemen der entsprechenden Glieder gibt es Rechenverfahren und graphische Methoden. Wie in dieser Lehrbriefreihe bereits mehrfach betont wurde, beschränken wir uns auf die Methoden zur Beschreibung stetiger linearer Glieder: lineare Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten, Sprungantworten, Frequenzgänge, Ortskurven. Wir verstehen diese Methoden als mögliche Näherungsbeschreibung der meisten nichtlinearen Systeme. Nur die Schaltsysteme, die ausschließlich Zweipunktglieder enthalten, bedürfen einer grundsätzlich anderen Beschreibung, die mittels der Rechenverfahren der Schaltalgebra möglich ist. Die verschiedenen Methoden zur exakten Behandlung nichtlinearer Vorgänge haben nicht die umfassende Bedeutung der linearen Verfahren.

Bei den nichtlinearen Systemen ohne Quantisierung des Informationsparameters bzw. der Zeit spielen nichtlineare Differentialgleichungen eine Rolle und bei den Systemen mit Quantisierung des Informationsparameters bzw. der Zeit Differenzengleichungen. Der mathematische Aufwand dieser Methoden ist beachtlich.

Praktisch werden nichtlineare Probleme sinnvoll mittels eines Modellregelkreises bzw. eines Analogrechners behandelt. Auch umfangreichere lineare Regelungen werden normalerweise so gelöst und optimiert. Es sei hier auf die entsprechenden Lehrbriefe verwiesen.

Weil die zur Näherungsbeschreibung mögliche Linearisierung des Verhaltens von Gliedern sich durch die gesamte Steue-

rungs- und Regelungstechnik zieht, ist es auch sinnvoll, als oberstes Einteilungsprinzip der Glieder die Trennung in linear - nichtlinear vorzunehmen.

Im folgenden wird zu den linearen stetigen Reglern (P-, I-, PI-, PD-, PID-Reglern) und zu den Zweipunkt- und Dreipunktreglern als den grundsätzlich wichtigen Reglertypen einiges gesagt werden.

### 3. Stetige lineare Regler

#### Grundbegriffe

Der Regler ist ein Glied des Regelkreises. Für ihn gelten somit die im 3. Lehrbrief bereits kennengelernten Begriffe, Gleichungen, Sprungantworten, Frequenzgänge und Ortskurven. Dabei wollen wir jetzt nicht mehr allgemein von Eingangsgröße  $x_e$  und Ausgangsgröße  $x_a$  reden, sondern als Eingang des Reglers das Signal  $\tilde{x}_w$  der Regelabweichung  $x_w$  und als Ausgang die Stellgrößenabweichung  $y$  ansehen (Bild 3a).

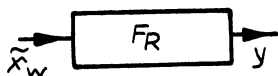


Bild 3a

Das ist eine Vereinfachung. Eigentlich erhält der Regler mindestens zwei Eingänge, nämlich vom Meßwerk das Signal  $\tilde{x}$  der Regelgrößen-

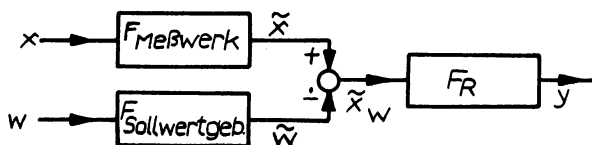


Bild 3b

abweichung  $x$  und vom Sollwertgeber das Signal  $\tilde{w}$  der Führungsgrößenabweichung  $w$  (Bild 3b). Von Abweichungen wird deshalb gesprochen, weil man sinnvollerweise auf Bezugswerte beziehen wird, die die Beschreibung vereinfachen. Der Regler bildet die Differenz  $\tilde{x} - \tilde{w} = \tilde{x}_w$  und verarbeitet das Signal  $\tilde{x}_w$  der Regelabweichung zu einem Stelleingriff.

Weiter wirken noch Störgrößen auf den Regler. Sie sollen hier vernachlässigt werden. Statt Signal  $\tilde{x}$  der Regelgrößenabweichung und Signal  $\tilde{w}$  der Führungsgrößenabweichung sagt man häufig einfach Regelgröße und Führungsgröße (meint aber meist Abweichungen und Signale der betreffenden Größen).

$x$  wie  $w$  haben im allgemeinen unterschiedliche Dimensionen. So kann ja z.B. bei einer Temperaturregelung die Führungsgröße als elektrischer Strom erscheinen. Man müßte dann die Reglergleichung angeben als

$$y = F_R (F_{\text{Meßwerk}} \cdot x - F_{\text{Sollwertgeber}} \cdot w) = F_R (\tilde{x} - \tilde{w}) \\ = F_R \cdot (\text{Signal von } x \text{ minus Signal von } w)$$

Statt nun dauernd von "Signal der Regelgrößenabweichung" und "Signal der Führungsgrößenabweichung" zu sprechen, sagen wir vereinfachend "Regelgröße" und "Führungsgröße" und schreiben  $y = F_R x_w = F_R (x - w)$ .  $x$  und  $w$  haben in dieser Gleichung gleiche Dimension, denn nur dann läßt sich ja ihre Differenz bilden. Wenn also im folgenden die Buchstaben  $x$ ,  $w$ ,  $x_w$  auftauchen, sind damit durchweg die Signale der zugehörigen Größen gemeint.

Zusammenstellung der Bezeichnungen:

$x$  Abweichung des Signals der Regelgröße von seinem Bezugswert, kurz: Regelgröße

$w$  Abweichung des Signals der Führungsgröße von seinem Bezugswert, kurz: Führungsgröße

$x_w$  Regelabweichung  $x_w = x - w$

Sinnvollerweise wird man für  $x$  wie für  $w$  den gleichen Bezugswert wählen und für  $y$  den Wert als Bezugswert nehmen, der im stationären Zustand bei  $z = 0$  zu  $x_w = 0$  gehört. Eine Festwertregelung ist durch  $w = 0$  charakterisiert.

$w = 0$  bedeutet: keine Führungsgrößenabweichung, also Festwertregelung. Nach diesen grundsätzlichen Bemerkungen ist für uns der Regler ein Glied mit einem Eingang  $x_w$  und einem Ausgang  $y$ . Alle allgemeinen Überlegungen zu den regelungstechnischen Gliedern gelten auch für ihn. Dabei kann man den Regler meist als unverzögert ansehen. Das ist möglich, weil die Strecken, mit denen der Regler zusammengeschaltet



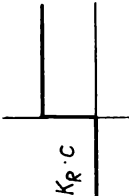
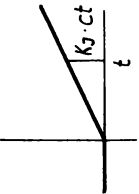
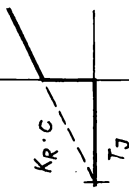
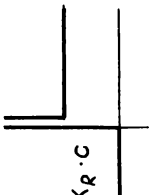
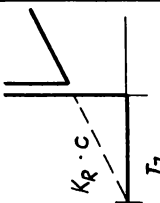
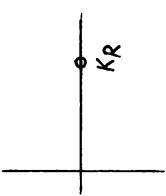
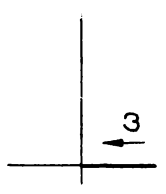
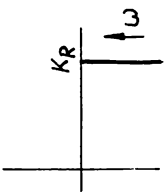
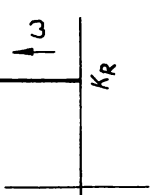
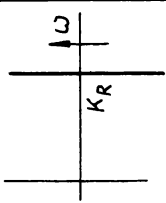
wird, meist wesentlich größere Verzögerungen haben, so daß die praktisch natürlich vorhandene Verzögerung des Reglers vernachlässigt werden kann.

Die folgende Tabelle 8 bringt eine Zusammenstellung der Gleichungen, Sprungantworten, Frequenzgänge, Ortskurven und Kennwerte von stetigen linearen Reglern ohne Verzögerung.

Die Sprungantworten der unverzögerten stetigen linearen Regler enthalten Sprünge, scharfe Knicke und Stellen, an denen der Funktionswert unendlich groß ist. Es leuchtet ein, daß so etwas von keinem realen Gerät, auch von keinem "schnellen" elektronischen Gerät ausgeführt werden kann. Reale Regler haben also mit Sicherheit Verzögerungen.

Auch an den Ortskurven läßt sich erkennen, daß kein reales Gerät solche Idealkurven ergeben kann. Für eine entsprechend schnelle Eingangsschwingung ( $\omega \rightarrow \infty$ ) wird bei jedem realen Glied der Ausgang "nicht mehr mitkommen", also  $x_{ao}=0$  und damit  $F = \frac{x_{ao}}{x_{eo}} = 0$  sein. So wird z.B. bei einer Temperaturregelstrecke die Temperatur konstant sein, also keine Schwingung ausführen, wenn die Heizung mit 50 Hz sinusförmig verstellt wird; bei einem bestimmten elektronischen Verstärker wird eventuell der Ausgang erst bei einer Eingangsfrequenz von GHz nicht mehr mitschwingen. Bei jedem realen Glied wird für  $\omega \rightarrow \infty |F| \rightarrow 0$  gehen, d.h. die Ortskurve eines jeden realen Gliedes wird für  $\omega \rightarrow \infty$  in den Nullpunkt einmünden. Von den Ortskurven der Zusammenstellung stetiger linearer Regler tut das nur die Ortskurve des I-Gliedes. Angenähert ideales I-Verhalten läßt sich also noch am ehesten erreichen.

Obwohl man die Regler meist als unverzögert (relativ zu den Strecken) annehmen kann, soll hier doch angegeben werden, was sich ändert, wenn man die Regler mit einer Verzögerung 1. Ordnung behaftet nimmt. Wie dann die Differentialgleichungen und Frequenzgänge aussehen, geht unmittelbar aus den allgemeinen Bemerkungen über lineare Glieder hervor (Tabelle 9).

Stetige lineare Regler ohne Verzögerung					
Name	P	I	PI	PD	PID
Gleichung	$y = K_R x_w$	$y = K_I \int x_w dt$	$y = K_R(x_w + \frac{1}{T_I} \int x_w dt)$	$y = K_R(x_w + T_D \dot{x}_w)$	$y = K_R(x_w + \frac{1}{T_I} \int x_w dt + T_D \dot{x}_w)$
Sprungantwort $x_w = \begin{cases} 0 \\ C \end{cases}$					
$F_R$	$K_R$	$\frac{K_I}{P}$	$K_R(1 + \frac{1}{T_I P})$	$K_R(1 + T_D P)$	$K_R(1 + \frac{1}{T_I P} + T_D P)$
Ortskurve					
Kennwerte	$K_R$ - Übertragungsfaktor	$K_I$ - Integraler Übertragungsfaktor, auf die Einheit des Einganges bezogene Stellgeschwindigkeit	$K_R$ - Übertragungsfaktor $T_I$ - Integralzeit (auch: $T_I = T_n$ - Nachstellzeit)	$K_R$ - Übertragungsfaktor $T_D$ - Differentialzeit (auch: $T_D = T_v$ - Vorhaltzeit)	$K_R$ - Übertragungsfaktor $T_I$ - Integralzeit $T_D$ - Differentialzeit

Tab. 8

Regler	Differentialgleichung	Frequenzgang
$PT_1$	$T\dot{y} + y = K_R x_w$	$\frac{K_R}{1 + T_p}$
$IT_1$	$T\dot{y} + y = K_I \int x_w dt$	$\frac{\frac{K_I}{p}}{1 + T_p}$
$PIT_1$	$T\dot{y} + y = K_R (x_w + \frac{1}{T_I} \int x_w dt)$	$\frac{K_R (1 + \frac{1}{T_I p})}{1 + T_p}$
$PDT_1$	$T\dot{y} + y = K_R (x_w + T_D \dot{x}_w)$	$\frac{K_R (1 + T_D p)}{1 + T_p}$
$PIDT_1$	$T\dot{y} + y = K_R (x_w + \frac{1}{T_I} \int x_w dt + T_D \dot{x}_w)$	$\frac{K_R (1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p)}{1 + T_p}$

Tabelle 9

Regler	Sprungantwort, $x_W = \sqrt{c}$	Ortskurve
$PT_1$		
$JT_1$		
$PJT_1$		
$PDT_1$		
$PJDT_1$		

Wie die Übergangsfunktionen und die Ortskurven aussehen, wird in der Tabelle 1o angegeben. In dieser Übersicht ist auch eingetragen, wie man die Sprungantworten auswerten kann.

Für das PIDT<sub>1</sub>-Verhalten soll abgeleitet werden, welche Länge die einzelnen Abschnitte haben. In dieser Ableitung sind das PIT<sub>1</sub>- und das PDT<sub>1</sub>-Verhalten als Sonderfälle enthalten; das PT<sub>1</sub>- und das IT<sub>1</sub>-Verhalten sind schon früher behandelt worden.

Die Differentialgleichung des PIDT<sub>1</sub>-Gliedes lautet:

$$T\ddot{y} + \dot{y} = K_R \left( x_w + \frac{1}{T_I} \int x_w dt + T_D \dot{x}_w \right)$$

Mit  $x_w = \sqrt{c}$  erhält man für  $t > 0$  die Gleichung

$$T\ddot{y} + \dot{y} = K_R \left( c + \frac{1}{T_I} ct \right)$$

Die Lösung der zugehörigen homogenen Differentialgleichung

$y = C_1 e^{-\frac{t}{T}}$  muß mit variabel gedachtem  $C_1$  in die inhomogene Differentialgleichung zwecks Bestimmung von  $C_1$  eingesetzt werden (Variation der Konstanten).

$$T \left[ \dot{C}_1 e^{-\frac{t}{T}} - \frac{1}{T} C_1 e^{-\frac{t}{T}} \right] + C_1 e^{-\frac{t}{T}} = K_R c + \frac{K_R ct}{T_I}$$

$$\dot{C}_1 = \frac{K_R \cdot c}{T} e^{+\frac{t}{T}} + \frac{K_R \cdot c}{T \cdot T_I} t e^{+\frac{t}{T}}$$

Durch partielle Integration erhält man:

$$C_1 = K_R \cdot c \cdot e^{\frac{t}{T}} + \frac{K_R \cdot c}{T \cdot T_I} \left[ t \cdot T \cdot e^{\frac{t}{T}} - T^2 \cdot e^{\frac{t}{T}} \right] + C_2$$

$$C_1 = e^{\frac{t}{T}} \left[ K_R \cdot c + \frac{K_R \cdot c}{T_I} (t - T) \right] + C_2$$

In die Lösung der homogenen Differentialgleichung einge-

setzt:

$$y = K_R \cdot c + \frac{K_R \cdot c}{T_I} (t - T) + C_2 e^{-\frac{t}{T}}$$

Die Anfangsbedingung zur Bestimmung von  $C_2$  ergibt sich aus der Differentialgleichung, wenn man alle Glieder einmal integriert.

$$Ty + \int y dt = K_R \left( \int x_w dt + \frac{1}{T_I} \iint x_w dt dt + T_D x_w \right)$$

Zu einer infinitesimal kleinen Zeit (+0 schreibt man) sind die Zeitintegrale vernachlässigbar klein, der Eingangssprung hat stattgefunden und es ist  $x_w = c$ . Also ist

$$y(+0) = \frac{K_R \cdot T_D}{T} \cdot c$$

Die so gewonnene Anfangsbedingung dient der Bestimmung von  $C_2$ .

$$\frac{K_R \cdot T_D}{T} \cdot c = K_R \cdot c - \frac{K_R \cdot c}{T_I} T + C_2$$

In die Lösung der Differentialgleichung eingesetzt, erhält man nach einigen Umformungen:

$$y = K_R \cdot c \left[ e^{-\frac{t}{T}} \left( \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I} - 1 \right) + \left( 1 - \frac{T}{T_I} + \frac{t}{T_I} \right) \right]$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß die Übergangsfunktion für große  $t$  ( $e^{-\frac{t}{T}}$  wird vernachlässigbar klein) sich mehr und mehr der Geraden

$$y = K_R \cdot c \left( 1 - \frac{T}{T_I} + \frac{t}{T_I} \right) \quad \text{annähert.}$$

Diese Gerade hat die Steigung  $\frac{K_R \cdot c}{T_I}$ ; sie schneidet die y-Achse bei  $y = K_R \cdot c \left( 1 - \frac{T}{T_I} \right)$

Die Anfangssteigung der Übergangsfunktion nach stattgefunden

denem Eingangssprung (an der Stelle +0) ist wegen

$$\dot{y} = K_R \cdot c \left[ -\frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \left( \frac{T_D}{T} + \frac{T}{T_I} - 1 \right) + \frac{1}{T_I} \right]$$

$$\dot{y}(+0) = -K_R \cdot c \left( \frac{T_D}{T^2} - \frac{1}{T_I} \right)$$

Die Anfangstangente

$$y = \frac{K_R \cdot T_D \cdot c}{T} - K_R \cdot c \left( \frac{T_D}{T^2} - \frac{1}{T_I} \right) \cdot t$$

schneidet die Gerade  $y = K_R \cdot c$ , wie man durch Einsetzen leicht findet, bei  $t = T$ .

Die Ermittlung der Kenndaten  $K_R$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ ,  $T$  einer experimentell aufgenommenen PIDT<sub>1</sub>-Sprungantwort würde nun wie folgt geschehen: Es werden die Gerade (Asymptote), an die sich die Übergangsfunktion für große  $t$  anschmiegt, und die Anfangstangente gezeichnet. Durch deren Schnittpunkt ist  $T$  und  $K_R$  ( $c$  ist ja als Sprunghöhe des Einganges bekannt) festgelegt (siehe Tabelle 10). Die Parallele zur Asymptote durch  $(0; K_R \cdot c)$  ergibt auf der Zeitachse  $T_I$ .  $T_D$  kann schließlich aus dem  $y$ -Wert des Schnittpunktes der Anfangstangente mit der  $y$ -Achse berechnet werden.

Für die praktische Auswertung ist das Verhältnis  $\frac{T}{T_I}$  meist so klein, daß sich die entsprechenden Vereinfachungen bei der Auswertung ergeben (Asymptote schneidet  $y$ -Achse bei  $K_R \cdot c$  und die  $t$ -Achse bei  $-T_I$ ).

Damit ist abgeleitet worden, wie man aus den Sprungantworten von stetigen linearen Reglern durch deren Auswertung die Gleichungen der betreffenden Regler finden kann.

Ehe nun besprochen wird, wie die verschiedenen Reglertypen gerätemäßig verwirklicht werden, sollen noch - an Beispielen entwickelt - einige weitere Grundbegriffe angeführt werden.

## Kennlinie und Proportionalbereich des P-Reglers:

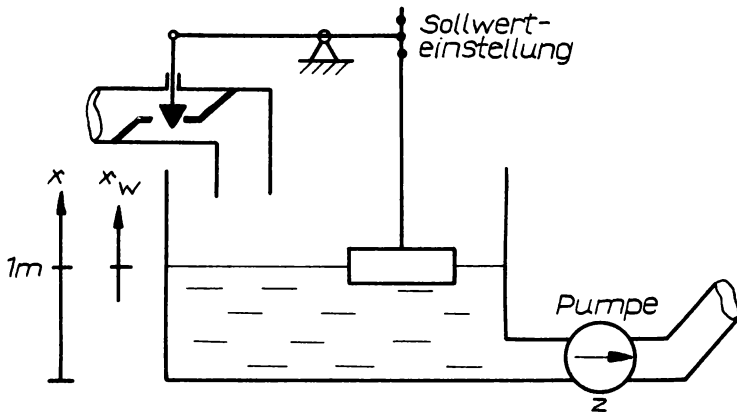


Bild 4

Bild 4 zeigt die Regelung eines Flüssigkeitsstandes mit einem P-Regler. Störgröße ist die unterschiedliche Entnahme, Regelgröße ist der Flüssigkeitsstand, Stellgröße der Zufluß. Es ist  $y = K_R \cdot x_w$ , mit angenommenen Zahlenwerten  $y = \frac{0,5 \text{ l}}{\text{s cm}} x_w$ . Die Sollwerteinstellung geschieht durch entsprechendes Anlenken des Hebels am Schwimmer. Es wird für die Normalentnahme (von angenommen  $5 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ ) bei Sollstand der Flüssigkeit die Grundstellung des Ventils so eingestellt, daß gerade Zufluß = Normalentnahme ist. Von dieser Bezugsstellung aus arbeitet dann der Regler.

$x_w = 0$  bedeutet: keine Abweichung der Regelgröße von der Bezugsregelgröße (Sollwert)  $x_s = 100 \text{ cm}$ .

$y = 0$  bedeutet: keine Abweichung der Stellgröße von der Bezugsstellgröße (Normalzufluß)  $y_0 = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ .

$z = 0$  bedeutet: keine Abweichung der Störgröße von der Bezugsstörgröße (Normalentnahme)  $z_0 = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ .

Die Bezugsstellgröße  $y_0$  (d.h.  $y = 0$ ) hält für  $z = 0$  (Normalentnahme durch die Pumpe) den Sollwert der Regelgröße ( $x_w = 0$ ).



Nun gilt die Reglergleichung  $y = K_R \cdot x_w$  nicht für alle  $x_w$ . Im skizzierten Beispiel wird, falls der maximale Zufluß  $Y_h = 10 \frac{1}{s}$  beträgt, die Proportionalität zwischen  $y$  und  $x_w$  wegen  $y = \frac{0,5}{s \text{ cm}} x_w$  nur für einen  $x_w$ -Bereich von 20 cm gelten. Außerhalb dieses Bereiches steht das Ventil gegen seinen oberen bzw. unteren Anschlag. Dieser Sachverhalt gilt allgemein. Jeder P-Regler kommt mit dem Stellglied einmal gegen Anschläge. Dann gilt die Proportionalität zwischen  $y$  und  $x_w$  nicht mehr (Nichtlinearität!). Der Bereich der Regelgröße, innerhalb dessen die Proportionalität gilt, heißt sinnvollerweise Proportionalbereich  $X_P$ . Der P-Bereich ist also der Bereich, um den sich die Regelgröße ändern muß, um bei einem P-Regler die Stellgröße über den gesamten Stellbereich zu ändern. Bild 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang in

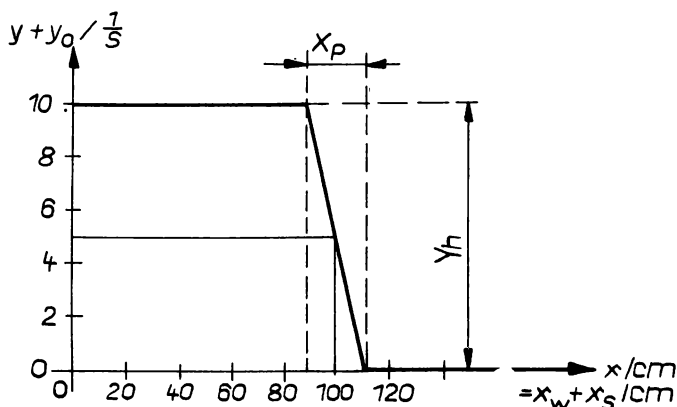


Bild 5

der sogenannten Kennlinie des P-Reglers.

Der Sollwert  $x_s = 100$  cm liegt im skizzierten Beispiel in der Mitte des P-Bereiches. Das muß nicht so sein. Es wird aber in vielen Fällen sinnvoll sein, weil so der P-Regler sowohl Störungen nach der einen Seite (Entnahme niedriger als normal), als auch Störungen nach der anderen Seite (Entnahme größer als normal) gleichermaßen proportional

begegnen kann. Bei der Veränderung der Verstärkung des P-Reglers (im Beispiel Verschiebung des Hebeldrehpunktes) ändert sich auch der P-Bereich (Bild 6). Man wählt die Lage

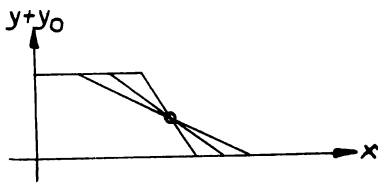


Bild 6

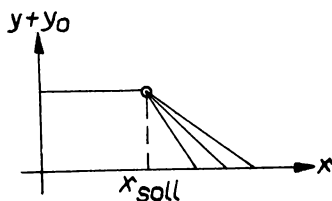


Bild 7

des Sollwertes innerhalb des P-Bereiches in den meisten Fällen als den Punkt, der bei einer Veränderung des P-Bereiches fest bleibt. Dieser Punkt muß nicht die Mitte des P-Bereiches sein. Auch Sollwertlagen nach Bild 7 sind denkbar. Das Zeichnen der Kennlinie des P-Reglers wird statt mit  $x$  und  $y + y_0$  als Koordinaten besser mit  $x_w$  und  $y$  als Koordinaten erfolgen (Bild 8).  $y = -3 \frac{1}{8}$  bedeutet dann z.B., daß der Zufluß  $3 \frac{1}{8}$  niedriger als der

Bezugszufluß von  $5 \frac{1}{8}$  ist.  $x_w = +5$  cm bedeutet entsprechend, daß die Regelgröße 5 cm größer als der Sollwert von 100 cm ist. Die Kennlinie bringt zum Ausdruck, daß bei größer als normal werdendem Stand (etwa durch verringerte Entnahme bewirkt) der Zufluß gedrosselt wird. Wegen  $K_R = \frac{y}{x_w}$  kann man aus der Kennlinie leicht den Zusammenhang zwischen Übertragungsfaktor  $K_R$  und P-Bereich  $x_p$  finden:

$$K_R = \frac{y_h}{x_p}$$

Dem größeren P-Bereich entspricht der kleinere Übertragungsfaktor. Der P-Bereich wird im allgemeinen in Einheiten der Regelgröße angegeben. Er kann aber auch in Prozent des Skalenumfanges (wenn der Regler eine Anzeigeskala hat) angegeben werden. Wenn im skizzierten Beispiel eine Skalanzeige von 0 bis 150 cm vorhanden wäre, würde der einge-

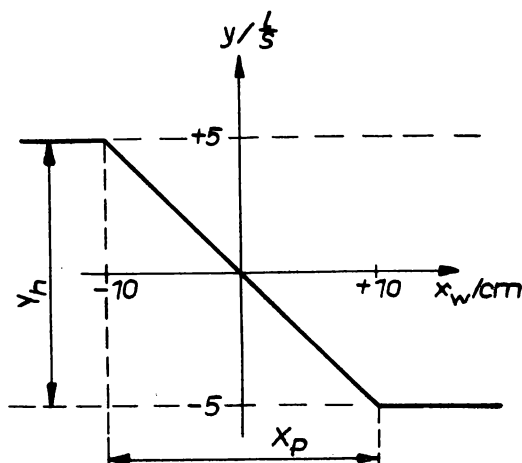


Bild 8

stellte P-Bereich  $\frac{20 \text{ cm}}{150 \text{ cm}} = 13,3 \%$  betragen. Der kleinste P-Bereich, der mit industriellen P-Reglern betriebssicher erzielbar ist, liegt bei 1 %, gelegentlich werden auch Einstellbereiche über 100 % hinaus vorgesehen. Für sehr kleine P-Bereiche nähert sich das Verhalten des P-Reglers dem eines Zweipunktreglers.

### Stellzeit, Laufbereich des I-Reglers

Bild 9 zeigt einen I-Regler. Die als Weg erscheinende Regelabweichung  $x_w$  verstellt einen Steuerkolben. Dieser steuert einen Druckölstrom, der die Stellkolbenbewegung  $y$  zur Folge hat.

In der Gleichung des I-Reglers  $\dot{y} = K_I \cdot x_w$  ist  $K_I$  die bezogene Stellgeschwindigkeit. Bewegt sich z.B. der Stellkolben mit einer Geschwindigkeit von  $0,2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$  bei einer Regelabweichung von  $0,1 \text{ cm}$ , so ist  $K_I = \frac{0,2 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{0,1 \text{ cm}} = 2 \frac{\text{cm/s}}{\text{cm}}$ . Dabei wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen  $y$  und  $x_w$  angenommen. Die gilt aber sicher nur innerhalb eines Bereiches (Bild 10).

Für  $x_w = 0$  steht der Stellkolben ( $\dot{y} = 0$ ), für  $x_w > 0$  bewegt sich der Stellkolben in der einen Richtung ( $\dot{y} > 0$ ), für  $x_w < 0$  bewegt sich der Stellkolben in der anderen Richtung ( $\dot{y} < 0$ ).

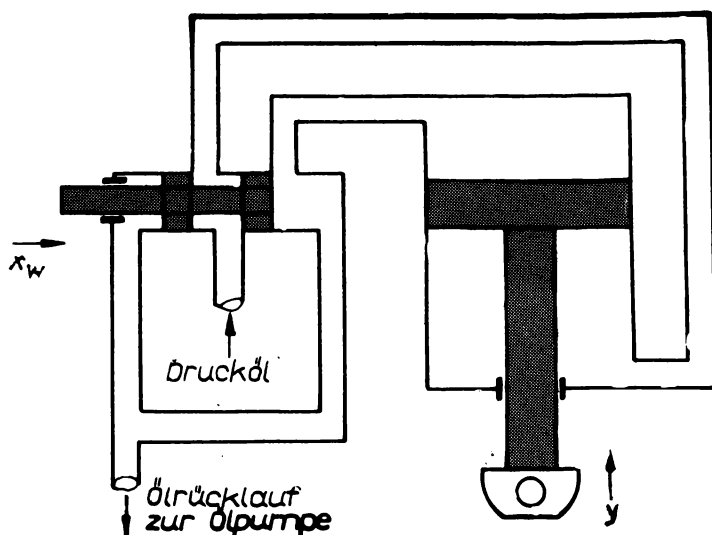


Bild 9

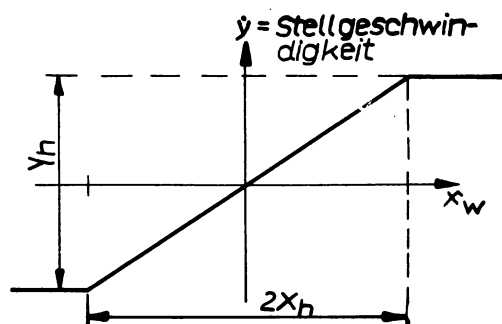


Bild 10

Neue Begriffe:  
Der Laufbereich  $x_h$  ist die Hälfte des Bereiches, den die Regelgröße durchlaufen muß, um die Stellgeschwindigkeit von ihrem größten Wert in der einen Richtung bis zu ihrem größten Wert in der anderen Richtung zu ändern.

Die Stellzeit  $T_y$  ist die Zeit, in der die Stellgröße den Stellbereich bei größtmöglicher Änderungsgeschwindigkeit durchläuft. Im skizzierten Beispiel (Bild 9) steht der Steuerkolben so, daß der Stellkolben die maximale Geschwin-

digkeit nach oben hat. Wir wollen annehmen, der Steuerkolben müsse 1 cm nach rechts geschoben werden, um die maximale Stellkolbengeschwindigkeit nach unten zu erreichen, und außerdem mögen die beiden maximalen Stellgeschwindigkeiten ihrem Betrage nach gleich sein. Weiter sei der maximale Stellkolbenweg 30 cm. Dann ist  $2 X_h = 1 \text{ cm}$ , also  $X_h = 0,5 \text{ cm}$ .

$$\dot{y}_{\max} = K_I \cdot x_w \max = 2 \frac{\text{cm/s}}{\text{cm}} \cdot 0,5 \text{ cm} = 1 \text{ cm/s}$$

$$T_y = \frac{30 \text{ cm}}{1 \text{ cm/s}} = 30 \text{ s.}$$

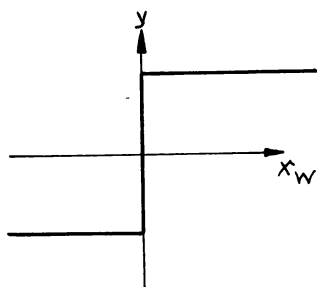
Allgemein bestehen zwischen  $K_I$ ,  $\dot{y}_{\max}$ ,  $X_h$ ,  $Y_h$  und  $T_y$  die Beziehungen:

$$\dot{y}_{\max} = K_I \cdot X_h = \frac{Y_h}{T_y}$$

Damit läßt sich die Gleichung des I-Reglers  $\dot{y} = K_I \cdot x_w$  auch schreiben als

$$\dot{y} = \frac{Y_h}{T_y \cdot X_h} x_w.$$

Beim I-Regler die Abhängigkeit der Stellgröße von der Regelgröße darzustellen, ist wenig sinnvoll. Zu jeder Regelabweichung, die ungleich Null ist, gehört ja eine Endlage der Stellgröße, zur Regelabweichung Null kann jede mögliche Stellgröße gehören. Es ergäbe sich das Bild 11.



Wenn die Gleichung des I-Reglers als  $\dot{y} = K_I \int x_w dt$  angegeben wird, so ist das Zeitintegral immer mit den Grenzen  $t_0$  (Anfang der Betrachtung) bis  $t$  gemeint.  $t_0$ , der Anfang der Betrachtung, wird meist gleich Null gesetzt.

Bild 11

Für  $x_w = \sqrt{c}$  wird  $y = K_I \int_{t_0}^t x_w dt = K_I \cdot c \cdot t - K_I \cdot c \cdot t_0$

$K_I \cdot c \cdot t$  ist die beim Sprungeingang  $c$  in der Zeit  $t$  erfolgte Stellgliedverstellung.  $K_I \cdot c \cdot t_0$  ist die vor dem Sprungeingang vorhandene Stellung des Stellgliedes. Ein I-Regler läßt, wenn  $x_w$  zu Null wird, das Stellglied dort stehen, wo es gerade steht.

### Wiederholungsfragen zu 2. und 3.

1. Zur Beschreibung welcher Glieder können lineare Differentialgleichungen verwendet werden?
2. Wieso ist jeder Regler "im großen" betrachtet ein nicht-lineares Glied?
3. Was ist der Unterschied zwischen Regeleinrichtung und Regler?
4. Was für ein Regler ist der Bimetallregler von Bügeleisen?
5. Nach welchen Prinzipien kann man Regler einteilen?
6. Wieso kennzeichnet  $w = 0$  eine Festwertregelung?
7. Erläutern Sie die Begriffe: Übertragungsfaktor, integraler Übertragungsfaktor, Integralzeit, Differentialzeit.
8. Wie kann man aus den Sprungantworten und Ortskurven der Tabelle 8 auf die Unmöglichkeit schließen, daß ein reales Gerät solche Sprungantworten exakt hat?
9. Welche der in Tabelle 10 skizzierten Sprungantworten und Ortskurven sind so, daß sie ein reales Gerät nicht haben kann?  
Wie müßten die Sprungantworten und Ortskurven real aussehen?
10. Seien Sie sich immer bewußt, daß alle Betrachtungen Näherungen der wirklichen Verhältnisse (der objektiven Realität) sind.
11. Was heißt: Der P-Bereich eines Reglers ist zwischen 20 % und 150 % einstellbar?
12. Was ist die Stellzeit, was der Laufbereich eines I-Reglers?

### Aufgaben zu 3.

1. Ein P-Regler mit elektrischem Eingang und pneumatischem Ausgang habe auf der Frontplatte eine Temperaturanzeige von  $70^{\circ}\text{C}$  bis  $90^{\circ}\text{C}$ . Auf eine Temperaturänderung von  $5^{\circ}\text{C}$  reagiere er mit einer Ausgangsdruckänderung von  $0,2\text{ at}$ . Der Ausgangsdruck kann sich zwischen  $0,2\text{ at}$  und  $1,0\text{ at}$  ändern. Wie groß ist der Übertragungsfaktor eingestellt, wie groß ist damit der P-Bereich in Einheiten der Regelgröße und in Prozent, wie groß ist der Stellbereich?

2. Ein I-Regler bestehe aus folgender Anordnung: Die als Spannung erscheinende Regelabweichung  $x_w$  wird von einem Magnetverstärker verstärkt. Der Magnetverstärker steuert einen Motor, welcher über ein Getriebe und eine Spindel einen Stellwiderstand verstellt. Stellgröße ist der Stellweg. Von den einzelnen Bauelementen sei bekannt:

Magnetverstärker: Verstärkung = 100

Motor: Eine Steuerspannung von  $+30\text{ V}$  hat die maximale Rechtslaufdrehzahl von  $2000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  zur Folge. Eine Steuerspannung von  $-30\text{ V}$  hat die maximale Linkslaufdrehzahl von  $2000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  zur Folge.

Getriebe: Übersetzung = Eingangs-drehzahl : Ausgangs-drehzahl = 50

Spindel: Gewindesteigung =  $2\text{ mm}$

Stellwiderstand: maximaler Stellweg =  $20\text{ cm}$

Es sind unter Annahme linearer Verhältnisse zu bestimmen:

1. Gleichung des I-Reglers (Eingang = Spannung  $x_w$ , Ausgang = Weg  $s$ ).
  2. Stellbereich, Stellzeit, Laufbereich.
3. Ein PI-Regler (Eingang = Strom, Ausgang = Druck) genüge der Gleichung

$$y = 0,04 \frac{\text{at}}{\text{mA}} \left( x_w + \frac{1}{10 \text{ min}} \int x_w dt \right).$$

Der Stellbereich gehe von  $0,2$  bis  $1,0\text{ at}$  über.

Wie groß sind Übertragungsfaktor, P-Bereich und Integralzeit eingestellt?

4. Der Ausgangsdruck eines pneumatischen Einheitsreglers betrage 0,6 at Ü bei einem Eingangsdruck von 0,6 at Ü. Von diesem Gleichgewichtszustand aus habe der Ausgangsdruck nach einer sprungförmigen Verstellung des Eingangsdruckes auf 0,8 at Ü folgende Zeitabhängigkeit:

t/s	0	1	5	10	15	20	25	30
$p_a/\text{at Ü}$	0,60	0,90	0,80	0,76	0,75	0,74	0,74	0,75
	40	50	60	70	80	90	100	110
	0,76	0,78	0,79	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87
	120							
	0,89							

1. Welches Zeitverhalten hat der Regler?
  2. Wie sind die Kenndaten des Reglers eingestellt?
  3. Wie lautet die beschreibende Gleichung des Reglers?
5. Bei der Aufnahme der Ortskurve eines elektronischen Reglers ergab sich ein oberhalb der reellen Achse liegender Halbkreis.

Für  $\omega = 0$  wurden der Phasenwinkel 0 und ein Amplitudenverhältnis von 10 gemessen. Die Phasenwinkel waren für alle Frequenzen positiv. Die maximale Phasenvoreilung wurde bei der Frequenz  $\omega = \frac{1}{\sqrt{50}} \cdot \frac{1}{\text{ms}}$  gemessen. Für höhere Frequenzen wurden die Phasenwinkel wieder kleiner. Für die höchste bei der Untersuchung einstellbare Frequenz war der Phasenwinkel wieder nahezu Null bei einem Amplitudenverhältnis von 500.

1. Welches Zeitverhalten hat der Regler?
2. Wie sind die Kenndaten des Reglers eingestellt?



#### 4. Beispiele stetiger Regler ohne Rückführung

Für unterschiedliche Regelungsaufgaben braucht man unterschiedliche Regler.

Wie kann man nun die verschiedenen stetigen Regler gerätemäßig verwirklichen? Die naheliegende Antwort wird lauten:

Aus Bauelementen mit P-Verhalten kann man P-Regler bauen.

Aus Bauelementen mit I-Verhalten kann man I-Regler bauen.

Aus Bauelementen mit D-Verhalten kann man den D-Anteil in Reglern verwirklichen. Parallelschaltung dieser Bauelemente ermöglicht PI-, PD- und PID-Regler zu bauen.

##### 4.1. Beispiele von P-Reglern ohne Rückführung

###### 4.1.1. P-Regler ohne Hilfsenergie

Regler ohne Hilfsenergie sind meist P-Regler. Die Kraft des Meßfühlers wird benutzt, um die gemessene Größe rückkoppelnd zu beeinflussen. Da die Meßkraft (wenigstens angenähert) proportional der Meßgröße ist, haben die auf diesem Prinzip beruhenden Regler P-Verhalten.

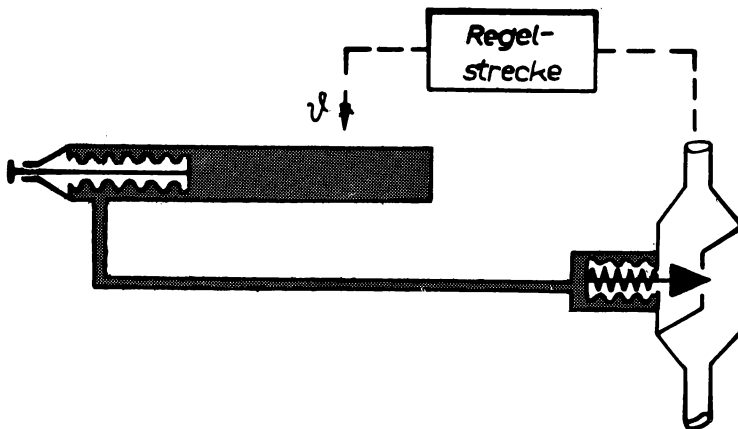


Bild 12

Bild 12 zeigt einen Temperaturregler. Der Druck einer sich ausdehnenden Meßflüssigkeit wird zur Verstellung eines Ven-

tiles (Gasventil, Warmwasserventil, Dampfventil) benutzt. Die Ventilverstellung wirkt auf die Temperatur, die - und damit schließt sich der Regelkreis - auf den Meßdruck zurückwirkt. Mittels einer Schraube am Meßfühler kann eine Grundstellung des Ventiles und damit der Sollwert der Temperatur eingestellt werden.

An Warmwasserkesseln wird häufig ein ähnlicher Regler verwendet. Der von einer sich ausdehnenden Flüssigkeit hervorgerufene Weg bewirkt die Verstellung der Luftklappe. "Zu hohe Wassertemperatur → Weg wird größer → Ofenklappe wird mehr geschlossen → weniger Kohle verbrennt → Wassertemperatur sinkt" ist dabei der Wirkungsablauf. Durch eine Grundstellung der Ofenklappe durch Einhängen in die vom Meßfühler kommende Kette wird der Sollwert eingestellt.

Schließlich beruhen die Kühlwassertemperaturregler in Kraftfahrzeugen auf dem gleichen Prinzip. Wirkungsablauf: Kühlwasser zu heiß → Meßsubstanz dehnt sich aus → Ventil öffnet → Wasserumlauf zum Kühler wird freigegeben → Kühlwassertemperatur sinkt. Da bei der Wärmedehnung von Flüssigkeiten und festen Körpern große Kräfte entstehen, ist es nicht verwunderlich, daß nach diesem Prinzip viele Temperaturregler gebaut werden.

Man braucht nun nur nach Meßühlern mit großen Meßkräften zu suchen, um weitere P-Regler ohne Hilfsenergie zu finden. Folgendes sei stichwortartig noch angeführt:

Standregelung: Schwimmer mit genügend großem Auftrieb ver-  
stellt Zulauf zu dem Behälter.

Druckregelung: Reduzierstation (Bild 13). Der Vordruck ver-  
stellt über eine Membran entgegen der Feder-  
kraft (Sollwert) das Reduzierventil.

#### 4.1.2. P-Regler mit pneumatischer Hilfsenergie

In vielen Varianten (Einlaßdüsensteuerung, Auslaßdüsen-  
steuerung, kombinierte Einlaß- Auslaßdüsensteuerung) immer  
wiederkehrendes Prinzip aller pneumatischen Regler ist das  
Erzeugen eines Stelldruckes durch Verstellen der Prall-

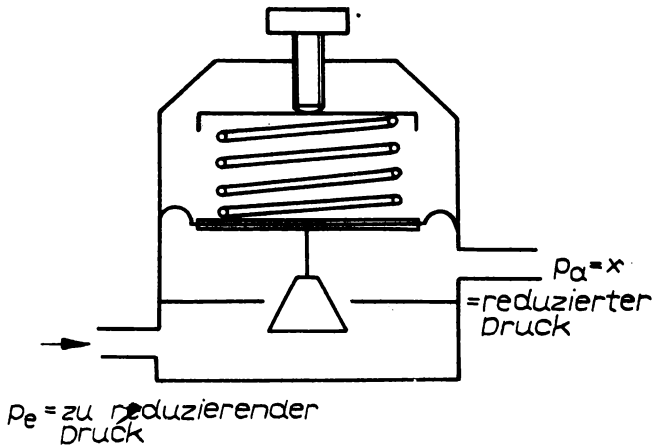


Bild 13

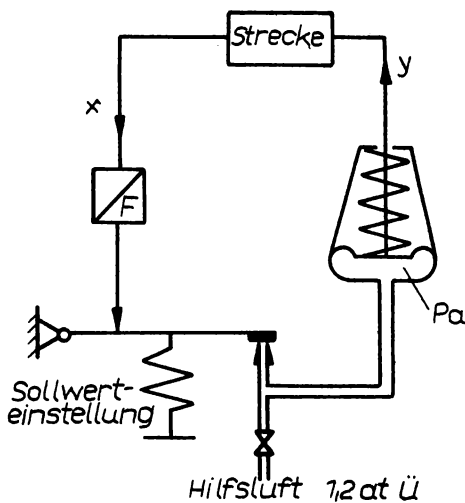


Bild 14

platte eines Düse-Prallplatte-Systems (Bild 14). Die Regelgröße wird als Moment abgebildet mit dem an einer Feder eingestellten Sollmoment verglichen. Stimmen die Momente nicht überein, wird die Prallplatte proportional zur Differenz der Momente verstellt, da ja das Moment der Sollwertkraft dem Prallplattenausschlag proportional ist.

Unter Vernachlässigung der Rückstellkraft an der Düse lautet die Gleichgewichtsbedingung (Bild 15):  $F_e \cdot l_e = F_s \cdot l_s$ . Zwischen der Verstellung  $s$  der Prallplatte und der Verstellung  $s_s$  der Angriffsstelle der Sollwertkraft besteht die

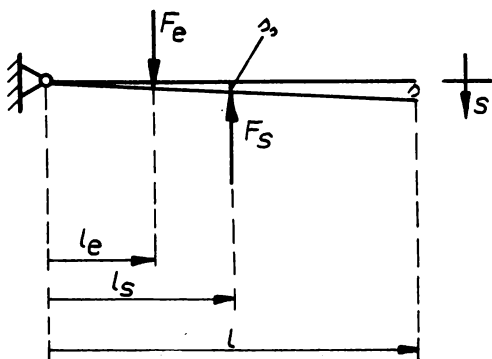


Bild 15

Beziehung

$$s_s = s \frac{l_s}{l}$$

Weiter ist

Federkraft =  
Eingestellte  
Grundkraft +  
Kraft durch Zusam-  
mendrücken der  
Feder bei Aus-  
schlag der  
Prallplatte

$$F_s = F_{so} + c \cdot s_s$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung  $F_e \cdot \frac{l_e}{l_s} = F_{so} + c \cdot s \cdot \frac{l_s}{l}$   
folgt damit

$$s = \frac{1}{c \cdot \frac{l_s^2}{l^2}} (l_e F_e - l_s F_{so})$$

Die Wahl des Koordinatensystems wird man so treffen, daß  
 $s = 0$  die Stellung der Prallplatte für  $F_e = F_{e0} =$  Solleing-  
gangskraft ist.  $0 = \frac{1}{c \cdot \frac{l_s^2}{l^2}} (l_e F_{e0} - l_s F_{so})$ , d.h. der Soll-  
wert wird an der Sollwertfeder durch die  
Kraft

$$F_{so} = \frac{l_e}{l_s} F_{e0} \quad \text{eingestellt.}$$

Wird noch  $F_e = F_{e0} + \Delta F_e$  geschrieben, so lautet die  
"Prallplattengleichung"

$$s = \frac{1}{c \cdot \frac{l_s^2}{l^2}} \cdot \Delta F_e$$

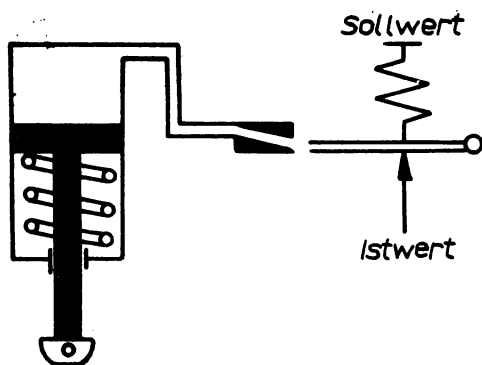
Der von einer Bezugsstellung aus gemessene Prallplattenaus-  
schlag ist der Abweichung der Eingangskraft proportional.  
Da über die Kennlinie von Düse-Prallplatte der angesteuerte  
Druck dem Prallplattenweg angenähert proportional ist, ist  
schließlich die Druckabweichung von einem Bezugswert der Ab-  
weichung der Eingangskraft proportional:

$$p_a = K_R \cdot \Delta F_e$$

Diese Proportionalität gilt nur angenähert (Kennlinie!). Die üblichen Prallplattenwege liegen in der Größenordnung von 0,1 mm. Die Sollwertfeder müßte also eine sehr große Federkonstante haben oder die Hebelübersetzung müßte konstruktiv entsprechend ausgebildet werden. Diese Schwierigkeiten bewirken, daß pneumatische Regler meist anders, nämlich mit Rückführungen gebaut werden.

#### 4.1.3. P-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie

Immer wiederkehrende Bauelemente aller hydraulischen Regler



sind kleine Steuer-ventile und das Strahlrohr. Das Prinzip ist: Kleine Kräfte steuern über Steuer-ventil oder Strahlrohr einen Druckölstrom, der auf großen Stellkolbenflächen große Stellkräfte auslöst. Dabei hat die Hydraulik "von Haus aus" I-Verhalten.

Bild 16a

ten, so wie die Pneumatik "von Haus aus" P-Verhalten hat. Die Funktion des in Bild 16a skizzierten Reglers ist ohne Erläuterung verständlich. Der Öldruck  $p$  ist von der Strahlrohrstellung  $s$  nach der in Bild 16b gezeigten Kennlinie abhängig. Man sieht, daß die Proportionalität zwischen Eingang und Ausgang angenähert gilt.

Hydraulische Regler müssen als Hilfsenergieträger nicht unbedingt Öl haben. Der im Bild 17 skizzierte Temperaturregler kann z.B. mit Druckwasser aus der Wasserleitung betrieben werden. Der Wasserverbrauch beträgt normal nur 1 bis 1,5 l/min. Die Längendifferenz bei der Ausdehnung von Metallschutzrohr und Quarzstab bewirkt bei einer über den

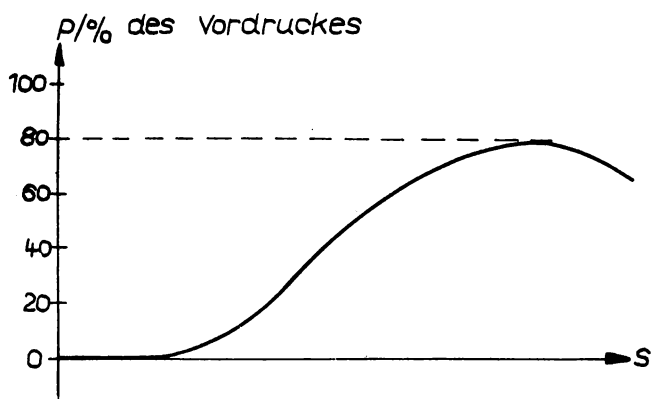


Bild 16b

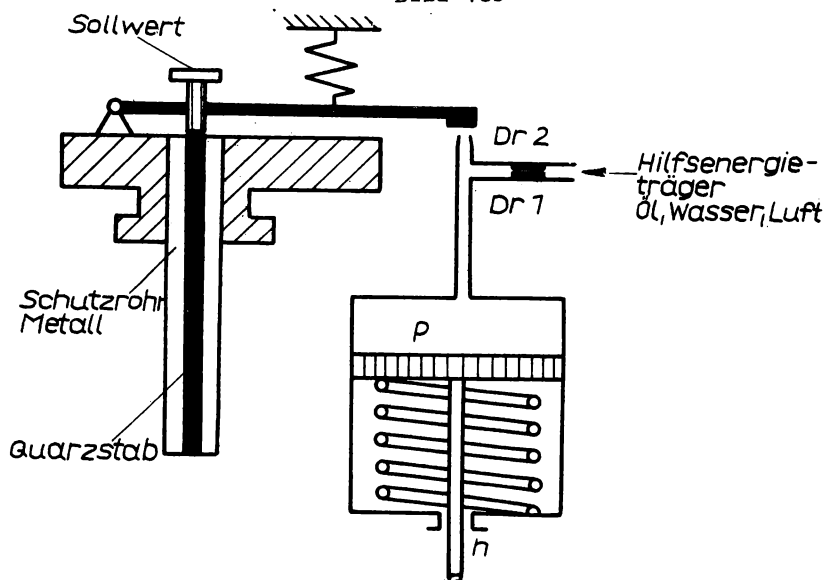


Bild 17

Sollwert angestiegenen Temperatur eine stärkere Drosselung des Wassers durch die Prallplatte an der Drossel Dr 2, was im Zusammenwirken mit der Vordrossel Dr 1 einen Anstieg des Druckes  $p$  zur Folge hat. Letztlich ist die Stellhub-

abweichung  $h$  der Temperaturabweichung angenähert proportional.

#### 4.1.4. P-Regler mit elektrischer Hilfsenergie

Bild 18 zeigt den Aufbau einer Spannungsregelung mit einem

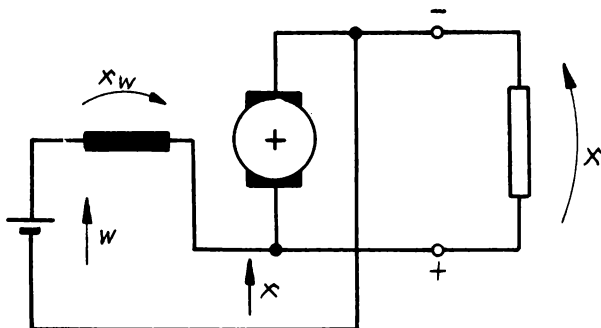


Bild 18

Maschinenverstärker. Jeder unterhalb seiner Sättigung erregte, remanenzfreie Gleichstromgenerator ist ein Verstärker, denn seine abgegebene elektrische Leistung ist wesentlich größer als die im Feldkreis aufgewendete Leistung. Es gibt etliche Abwandlungen des einfachen Gleichstromgenerators (Amplidyne, Rototrol, Metadyne, usw.). Meist wird dabei sehr große Verstärkung angestrebt. Ein Vorteil der Maschinenverstärker ist die mögliche Mischung verschiedener Eingangssignale in voneinander galvanisch getrennten Feldwicklungen. Es kann aber auch, da ja außerdem eine galvanische Trennung zwischen Feld- und Ankerkreis besteht, die Bildung der Regelabweichung unmittelbar durch Spannungsvergleich vorgenommen werden. Das ist im skizzierten Beispiel der Fall. Im Feldkreis ist die Summe der antreibenden Spannungen (Klemmenspannung  $x$  und Führungsspannung  $w$ ) gleich dem Spannungsabfall über der Erregerwicklung.  $x_w = w - x$ . Nach der Kennlinie von Gleichstromgeneratoren ist in gewissen Bereichen die induzierte Urspannung  $e$  dem Erregerstrom und damit  $x_w$  proportional.  $e = K x_w$ . Zwischen Urspannung und Klemmen-

spannung besteht die Beziehung  $e = x + iR_1$ , wenn  $R_1$  der Widerstand der Ankerwicklung und  $i$  der Ankerstrom ist.

$$w - x = x_w = \frac{e}{K} = \frac{x + i \cdot R_1}{K}$$

$$x = \frac{w}{1 + \frac{1}{K}} = \frac{R_1}{1 + K} \cdot i$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß die bei großem Belastungsstrom  $i$  sinkende Klemmenspannung  $x$  mit großem  $K$  (großer Verstärkung) weitgehend von dem Belastungsstrom  $i$  unabhängig wird und daß  $x$  durch  $w$  eingestellt werden kann. Dabei wird die Regelgröße  $x$  nicht genau gleich der Führungsgröße  $w$ . Der P-Regelkreis hat eine bleibende Regelabweichung. Für  $K \rightarrow \infty$  (idealer Verstärker mit unendlich großer Verstärkung) wird  $x = w$ . Bild 18 war übrigens ein Beispiel für die Art von Regelungen, bei denen Regelstrecke und Regelungseinrichtung eine Einheit und gerätemäßig nicht zu trennen sind. Diese Trennung ist andererseits bei den Regelungen nach den Bildern 12, 14, 17 leicht möglich.

Jeder Verstärker mit der Möglichkeit, Eingangssignale (Regelgröße, Führungsgröße und evtl. noch Störgrößen) zu mischen, kann als Regler benutzt werden. Das gilt für die Maschinenverstärker und auch für die Magnetverstärker. Magnetische Verstärker werden heute in steigendem Maße verwendet. Sie sind robust, betriebssicher, bedürfen keiner Wartung und beherrschen weite Leistungsbereiche (mW bis einige kW). Das Prinzip der magnetischen Verstärker ist die Änderung des Scheinwiderstandes einer Wechselstromdrossel durch Gleichstromvormagnetisierung des Eisenkernes. Die zur Gleichstromvormagnetisierung benötigte Steuerleistung ist gering im Verhältnis zu der dadurch steuerbaren Wechselstromleistung. Der Ausgangswechselstrom kann selbstverständlich gleichgerichtet werden. Durch mehrere Gleichstromwicklungen ist die Mischung von Eingangssignalen möglich (Bildung der Regelabweichung). Die Verwendung dieses grundsätzlichen Steuerverfahrens in magnetischen Verstärkern



führt zu recht komplizierten Anordnungen, deren Wirkungsweise nicht immer einfach zu überblicken ist. In der Regel werden mehrere vormagnetisierte Drosseln benutzt, und mit Hilfe einer Rückkopplung wird ein Teil des Ausgangsstromes (Arbeitsstrom) nach erfolgter Gleichrichtung wieder dem Eingang (Gleichstrom-Vormagnetisierung) zugeführt.

Das Prinzip eines Magnetverstärkers ohne Rückkopplung zeigt Bild 19. Näherungsweise beschreibt in gewissen Bereichen

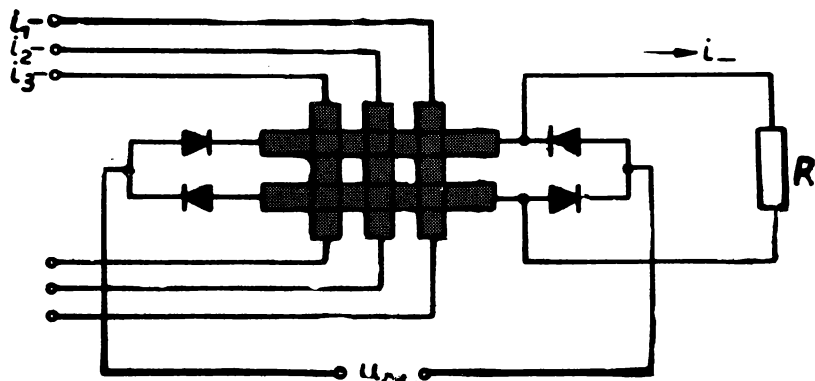


Bild 19

die folgende Gleichung das Verhalten:

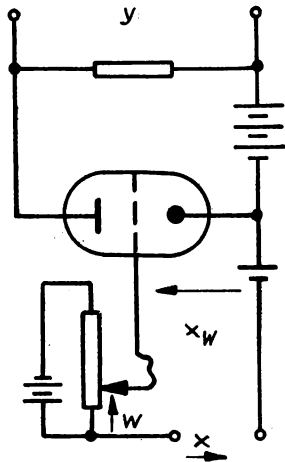
$$i = \pm K_1 i_1 \pm K_2 i_2 \pm K_3 i_3$$

Plus oder minus gilt je nachdem, in welcher Richtung der entsprechende Steuerstrom vormagnetisiert. Die  $K_1$  hängen von den Drosseleigenschaften ab. Man sieht, daß die Gleichung  $y = K(x-w)$  möglich ist. Das ist die Gleichung eines P-Reglers.

#### 4.1.5. P-Regler mit elektronischer Hilfsenergie

Unter elektronischer Hilfsenergie soll die Energie des im luftverdünnten oder gasgefüllten Raume oder in Halbleitern bewegten Elektrons verstanden werden. Durch Steuergitter läßt sich der Elektronenstrom durch eine luftverdünnte bzw.

gasgefüllte Röhre beeinflussen. Ähnliche Beeinflussungen mit verstärkender Wirkung sind bei Halbleitern möglich. Durch mehrere Gitter oder durch andere Maßnahmen (Bild 20)



ist Signalmischung möglich. Also können P-Regler gebaut werden. Es sind vielfältige Schaltungen bekannt. So gut wie immer wird durch geeignete Rückführungen ein gewünschtes Übertragungsverhalten erreicht. Von Haus aus haben die elektronischen Verstärkerelemente P-Verhalten. Bild 20 zeigt schematisch einen P-Regler ohne Rückführung. Alle kleinen Buchstaben bedeuten - wie immer - Abweichungen von Arbeitspunkten. Es gilt (in gewissen Bereichen)  $y = -K x_w$ .

Bild 20

#### 4.2 Beispiele von I-Reglern ohne Rückführung

Pneumatische und elektronische Bauelemente (Düse-Prallplatte, Elektronenröhre, Halbleiter) haben von Haus aus P-Verhalten. Will man pneumatisch bzw. elektronisch I-Regler bauen, so muß das mittels Rückführungen geschehen. Davon soll später die Rede sein. Ohne Rückführungen, also ohne zusätzliche Maßnahmen beim Aufbau, gibt es I-Regler mit hydraulischer und elektrischer Hilfsenergie.

##### 4.2.1. I-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie

Bild 21 zeigt einen Strahlrohrregler im Signalfluß eines Regelkreises. Die am schwenkbaren Strahlrohr durch Momentenvergleich gebildete Regelabweichung bewirkt eine Auslenkung des Strahlrohres aus der Mittelstellung. Dadurch wird der Öldruck in den beiden Druckaufnehmeröffnungen unterschiedlich, der Stellkolben bewegt sich und verstellt das Stellglied (Ventil, Schieber, Klappe, usw.) so, daß die

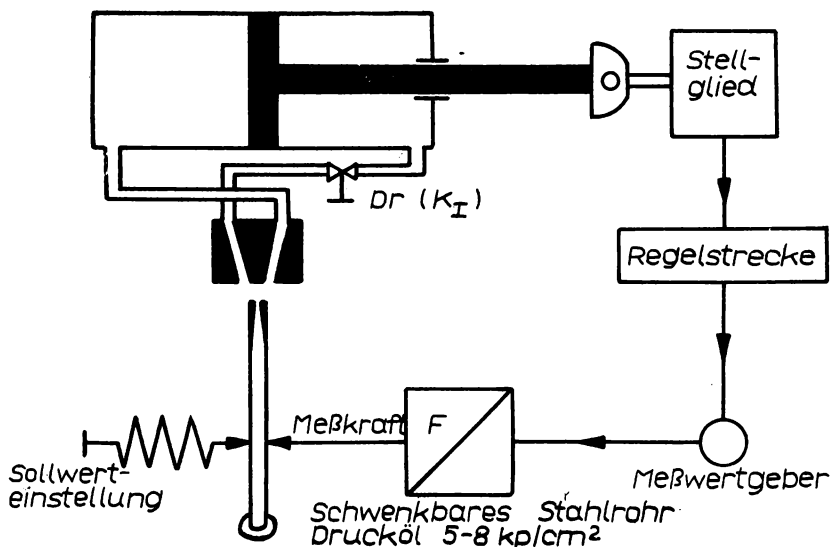


Bild 21

Meßkraft, die über Meßwertgeber und Umformer ein Abbild der Regelgröße ist, wieder gleich der Sollkraft (Mittelstellung des Strahlrohres) wird. Die Geschwindigkeit des Stellkolbens ist von der Strahlrohrauslenkung und von der Einstellung der Drossel  $Dr$  abhängig. Ein kleiner Drosselquerschnitt läßt nur einen kleinen Öldurchfluß und damit eine kleine Stellgeschwindigkeit zu. Es ist in gewissen Grenzen

$$y = K_I \cdot x_w$$

Bild 22 zeigt eine andere Möglichkeit eines hydraulischen I-Reglers. In Bild 21 war das Strahlrohr der Energieschalter, in Bild 22 ist es ein (etwa daumenstarker) Steuerkolben.

#### 4.2.2. I-Regler mit elektrischer Hilfsenergie

Der von einem Elektromotor verstellte Weg hat in Abhängigkeit von der Steuerspannung I-Verhalten. Das ist das Prinzip der elektrischen I-Regler. In Bild 23 hat der Meßwertgeber als Ausgang einen mechanischen Ausschlag, der einen

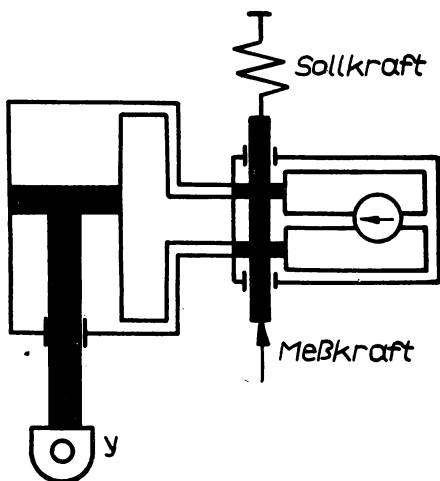


Bild 22

induktiven Geber ver-  
stellt. Der Geber ist so  
angelenkt, daß er keine  
Spannung abgibt, wenn  
die Regelgröße  $x$  gleich  
ihrem Sollwert ist. Von  
der Ausgangsspannung des induktiven Ge-  
bers ist der Effektiv-  
wert ein Maß für den Be-  
trag der Regelabweichung  
und die Phasenlage ein  
Maß für die Richtung  
der Abweichung. Der  
Soll-Istwert-Vergleich  
geschieht hier durch  
einen Wegvergleich. Die

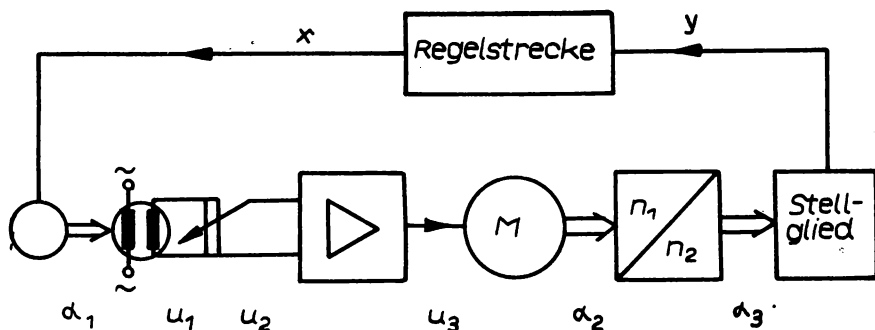


Bild 23

Ausgangsspannung des induktiven Gebers, die oft noch  
gleichgerichtet wird, beaufschlagt einen Verstärker (das  
kann u.a. ein einfacher Dreipunktschalter sein), der über  
Motor - Getriebe - Stellglied die Eingangsgröße der Regel-  
strecke verstellt. Der Motor bleibt erst stehen, wenn der  
induktive Geber (auch Ohmsche Geber werden benutzt) keine  
Spannung mehr abgibt. Dann ist  $x = x_s$ .

An Gleichungen wäre aufzuschreiben:

$\alpha_1 = c_1 \cdot x$  Der Ausschlag des Meßwerkes ist der Regelgröße proportional.

$u_1 = c_g \cdot x_w$  Die Geberspannung ist der Regelabweichung proportional.

$u_2 = c_t \cdot u_1$   $u_2$  ist ein einstellbarer Teil von  $u_1$ .

$u_3 = V \cdot u_2$   $V$  = Verstärkung

$n = c_M \cdot u_3$  Die Drehzahl ist der Spannung proportional.

$\omega = 2\pi n = \dot{\alpha}_2$

$\alpha_2 = i \cdot \alpha_3$  Getriebeübersetzung  $i$

$y = c \cdot \alpha_3$  Die Stellgliedverstellung ist der Winkelverstellung der Antriebsspindel proportional.

Zwischen  $y$  und  $x_w$  gilt also die Beziehung

$$y = c \frac{1}{i} \int 2\pi c_M V c_t c_g x_w dt$$

$$y = K_I \int x_w dt$$

#### 4.3. Beispiele von PI-, PD-, PID-Reglern ohne Rückführung

PI-, PD-, PID-Regler werden durchweg durch entsprechende Rückführungen an Verstärkern verwirklicht. Die Verwirklichung des zusammengesetzten Zeitverhaltens durch Parallelschaltung der Einzelglieder ist zwar denkbar, wird aber kaum benutzt, weil durch Rückführungen das gewünschte Zeitverhalten viel eleganter erreicht werden kann. Davon wird noch die Rede sein. Trotzdem sollen einige Möglichkeiten der Parallelschaltung skizziert werden.

In Bild 24 ist der Weg des linken Kolbens der Regelabweichung, der Weg des rechten Kolbens dem Integral der Regelabweichung proportional.

$$y_1 = K \cdot x_w, \quad y_r = K_I \int x_w dt$$

Falls  $y$  in der Mitte des Verbindungsstückes abgenommen wird, ist

$$y = \frac{1}{2} K x_w + \frac{1}{2} K_I \int x_w dt$$

$$y = \frac{1}{2} K \left( x_w + \frac{1}{K/K_I} \int x_w dt \right)$$

$$K_R = \frac{1}{2} K$$

$$T_I = \frac{K}{K_I}$$

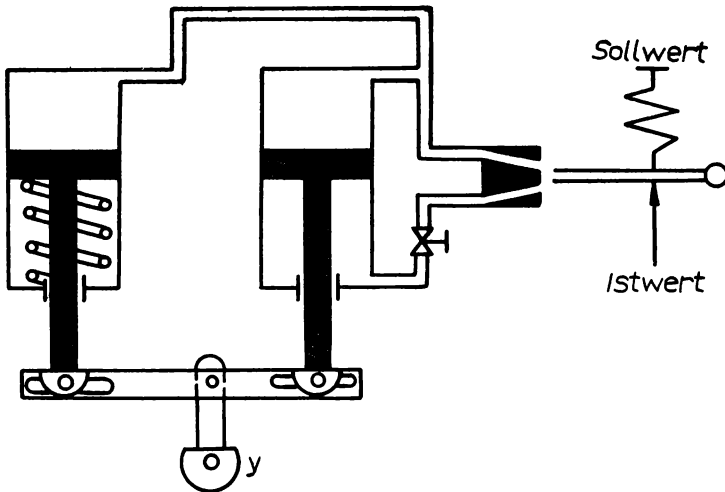


Bild 24

In Bild 25 hat  $y$  in Abhängigkeit von  $x_w$  PID-Verhalten. Alle kleinen Buchstaben bedeuten Abweichungen von Bezugswerten. Es gelten näherungsweise folgende Gleichungen:

$$y = u_1 + u_2, \quad u_1 = V \cdot u_g, \quad u_2 = K_I \int x_w dt$$

Wendet man auf den Eingangskreis die Spannungsteilerregel an und schreibt die Widerstände komplex, so erhält man:

$$\frac{x_w}{u_g} = \frac{\frac{R \cdot \frac{1}{Cp}}{R + \frac{1}{Cp}} + R_g}{R_g} = 1 + \frac{\frac{R}{R_g}}{1 + RC \cdot p}$$

Elimination der Zwischengrößen ergibt die Abhängigkeit der

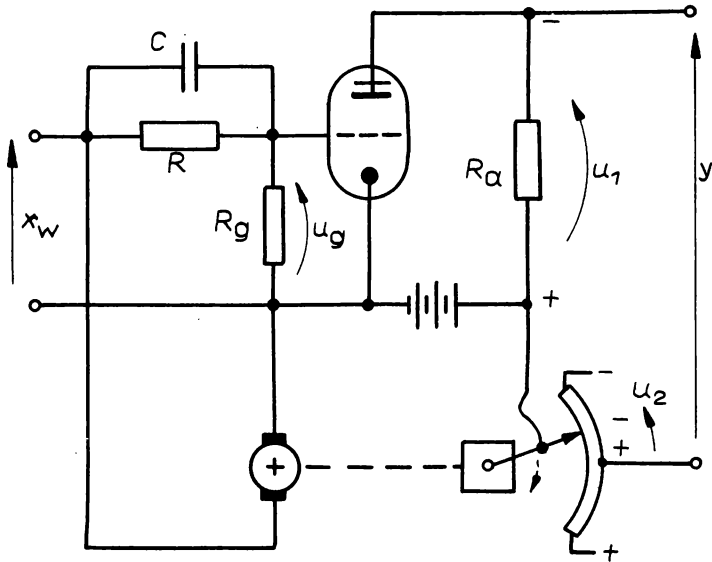


Bild 25

Ausgangsgröße  $y$  von der Eingangsgröße  $x_w$  in komplexer Schreibweise:

$$y = V \frac{1 + RC \cdot p}{1 + \frac{R}{R_g} + RC \cdot p} x_w + \frac{K_I \cdot x_w}{p}$$

Nach Umformung dieses Ausdruckes ist das PID-Verhalten ersichtlich:

$$y = \frac{\frac{R_g(V + RCK_I)}{R + R_g} + \frac{K_I}{p} + \frac{VR_gRC}{R + R_g} \cdot p}{1 + \frac{R_g \cdot R \cdot C}{R + R_g} \cdot p}$$

Es handelt sich um ein PID-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung.

#### 4.4. Nachteile von Reglern ohne Rückführung

Beim Regler ohne Rückführung steuert die Regelabweichung die Stellgröße, ohne daß die Stellgröße anders als über die Regelstrecke auf die Regelgröße zurückwirkt (Bild 26).

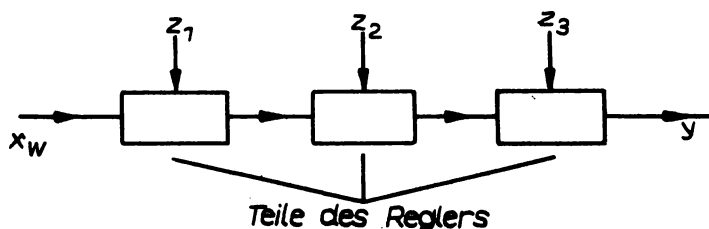


Bild 26

Ob ein  $x_w$  das richtige  $y$  auslöst, stellt sich erst an der Auswirkung auf die Regelgröße  $x$  heraus. Auf die einzelnen Teile des Reglers wirken aber Störgrößen, die die gewünschte Abhängigkeit  $y = f(x_w)$  in ungewollter Weise beeinflussen.

Beispiele:

Das Übertragungsverhalten des Reglers wird verändert

in Bild	durch
14	Vordruckschwankungen der Hilfsluft, Verschmutzen der Düse, Hysterese des Membranantriebes, usw.
16,17,21, 22,24	Vordruckschwankungen des Drucköles, Federhysterese, Änderung der Viskosität des Öles, usw.
18,19,23	Speisespannungsschwankungen, usw.
20,25	Speisespannungsschwankungen, Röhrenalterung, usw.

Tabelle 11

Nun soll aber eigentlich ein Regler eine gewollte Abhängigkeit der Stellgröße von der Regelabweichung immer möglichst genau einhalten, auch entgegen Störgrößen. Das ist bei den bisher skizzierten Reglern nicht möglich. Der Regler soll die nötige Leistungsverstärkung haben, um mit der meist niedrigen Meßenergie die weit größere Stellenergie zu steuern, und außerdem soll diese Steuerung noch gewünschte Übertragungseigenschaften konstant besitzen. Das ist beides auf



einmal mit einer Geradeausschaltung von Bauelementen nicht exakt möglich. Weiter sollen die Übertragungsfaktoren möglichst auch unabhängig von der Größe der Regelabweichung sein. Denkt man aber an die Kennlinien von Düse-Prallplatte, Strahlrohr, Elektronenröhre usw., so ist deutlich, daß dort keine konstanten Übertragungsfaktoren über größere Bereiche vorliegen. Das könnte, im gesamten Regelkreis betrachtet, z.B. zu Instabilität führen, wenn der Regler bei größeren Regelabweichungen zu stark eingreift; stellte man dagegen die Übertragungsfaktoren kleiner ein, so wäre für kleinere Regelabweichungen die Einstellung nicht optimal. Es sind also konstante Übertragungseigenschaften im allgemeinen wünschenswert. Manchmal wird die Veränderung der Übertragungseigenschaften mit der Größe der Regelabweichung allerdings bewußt eingeführt (z.B. bei den sog. progressiven Reglern).

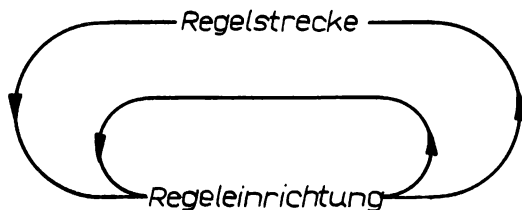


Bild 27

Wenn Übertragungseigenschaften der Regler von Störgrößen unabhängig gemacht werden sollen und diese Übertragungseigenschaften unabhängig von "krummen" Kennlinien der verwendeten Bauelemen-

te für alle Regelabweichungen konstant sein sollen, dann muß das getan werden, was zur Konstanthaltung immer getan wird: es müssen die Übertragungseigenschaften *g e r e g e l t* werden. Im Regler wird eine Regelung zur Konstanthaltung der Übertragungseigenschaften eingeführt. Man spricht von Rückführung im Regler. Verschiedene Rückführungen ergeben verschiedenes Zeitverhalten. Ein "kleiner Regelkreis" (Bild 27) innerhalb des "großen Regelkreises" sorgt dafür, daß die Signalverarbeitung der Regeleinrichtung oder auch die Signalverarbeitung von Teilen der Regeleinrichtung (z.B. des Reglers) im gewünschten Sinne kon-

stant bleibt. Durch die Rückführung tritt eine Linearisierung des Reglerverhaltens ein. Man linearisiert Glieder sehr oft durch Rückführungen.

#### Wiederholungsfragen zu 4.

1. Beschreiben Sie einige P-Regler ohne Hilfsenergie!  
Wie wird jeweils der Soll-Istwert-Vergleich vorgenommen?
2. Denken Sie sich die Regelung nach Bild 13 so im Gleichgewicht, daß  $p_a$  = Solldruck ist. Von diesem Zustand aus werde  $p_e$  etwas kleiner. Machen Sie sich klar, daß der Regler dann  $p_a$  = Solldruck nicht mehr halten kann (bleibende Regelabweichung beim P-Regelkreis).
3. Welche Funktionen haben die beiden in Bild 17 skizzierten Federn?
4. Machen Sie sich klar, wieso in Bild 16 b der Druck für große  $s$  wieder absinkt!
5. Wie findet der Soll-Istwert-Vergleich in den Reglern nach den Bildern 18 - 24 statt?

#### 5. Rückführungen

**5.1 Beispiel:** Es werde ein Verstärker mit dem Übertragungsfaktor  $K = 10$  gebraucht. Es muß (z.B. durch Röhrenalterung, Hilfsenergieabhängigkeit usw.) mit einer 10 %igen Änderung des Übertragungsfaktors gerechnet werden.

1. Lösung: Es wird ein Verstärker ohne Rückführung mit  $K = 10 \pm 10\%$  gebaut.
2. Lösung: Es wird ein Vorwärtsverstärker mit einem Übertragungsfaktor von  $K_v = 100 \pm 10\%$  mit einer Rückführung ausgerüstet, die den Gesamtübertragungsfaktor auf  $K = 10$  bringt (Bild 28).

Die Rückführung besteht aus passiven Bauelementen, deren Eigenschaften konstant sind. Die Rückführung habe den Übertragungsfaktor  $K_r$ . Es ist

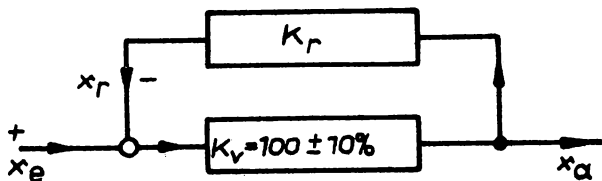


Bild 28

$$x_a = K_v (x_e - K_r \cdot x_a), \text{ also } x_a = \frac{K_v}{1 + K_v \cdot K_r} x_e$$

Der Gesamtübertragungsfaktor ist:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}$$

Ändert sich in dieser Beziehung  $K_v$  um 10 %, so ändert sich  $K$  nur um weniger als 10 %. Das läßt sich mit den bekannten Methoden der Fehlerrechnung leicht zeigen.

1. Das totale Differential  $df$  einer Funktion

$f = f(x_1, \dots, x_n)$  ist

$$df = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot dx_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot dx_n$$

Die Anwendung dieses mathematischen Satzes mit  $dx_i = \Delta x_i$  und  $df \approx \Delta f$  ist die Grundlage der Fehlerrechnung!

2.  $dK = \frac{\partial K}{\partial K_v} \cdot dK_v$ , da der Fehler nur vom Vorwärtsglied kommt.

3. Ausrechnung und Umformung:

$$dK = \frac{-1}{\left(\frac{1}{K_v} + K_r\right)^2} \cdot \frac{-1}{K_v^2} dK_v$$

$$\frac{dK}{K} = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r} \cdot \frac{1}{K_v^2} dK_v$$

$$\frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + K_r K_v} \cdot \frac{dK_v}{K_v}$$

Der relative Fehler des Gesamtübertragungsfaktors ist also der  $(1 + K_r \cdot K_v)$  - te Teil vom relativen Fehler des Übertragungsfaktors des Vorwärtsverstärkers. Für unser Zahlenbeispiel ist aus  $K = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}$  die Einstellung von  $K_r$  zu ersehen.

$10 = \frac{1}{\frac{1}{100} + K_r}$ , also  $K_r = \frac{9}{100}$ . Aus der allgemeinen Beziehung zwischen den relativen Fehlern erhält man

$$\frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + \frac{9}{100} \cdot 100} \cdot 10 \% = 1 \%,$$

d.h. der Gesamtübertragungsfaktor ändert sich nur um 1 %. Diese Änderung wäre bei noch größerem  $K_v$  noch geringer.  
 $K = 10 \pm 1 \%$ .

Also: Rezept zum Bau von P-Gliedern mit weitgehend konstantem Übertragungsfaktor:

1. Teilung in Vorwärtszweig und Rückführzweig. Im Eingang des Vorwärtszweiges muß eine Signalmischung möglich sein.
2. Vorwärtszweig mit möglichst großem Übertragungsfaktor auslegen. Das gilt für elektronische, elektrische, hydraulische und pneumatische Anordnungen gleichermaßen. Der Übertragungsfaktor des Vorwärtszweiges muß nicht konstant sein; Hauptsache: er ist genügend groß.
3. Durch Rückführzweig aus passiven Bauelementen, die keiner Veränderung unterworfen sind ( $K_r = \text{konstant}$ ), den Gesamtübertragungsfaktor auf den gewünschten Wert bringen. Selbst wenn sich  $K_r$  etwas ändert, bleibt die fehleraufhebende Wirkung immer noch erhalten.
4. Die Übertragungskonstante des Vorwärtszweiges wird nicht als Gesamtübertragungskonstante ausgenutzt, sondern zu deren Konstanthaltung.

## 5.2 Theoretische Grundlagen zu den Rückführungen

Das allgemeine Signalflußbild einer Rückführschaltung (Bild 29) besteht aus dem Vorwärtszweig (Frequenzgang  $F_v$ ) und dem Rückführzweig (Frequenzgang  $F_r$ ). Die Eingangsgröße

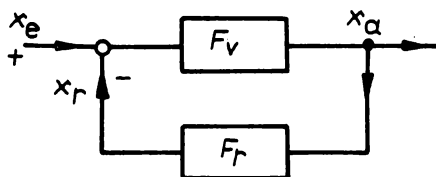


Bild 29

für den Vorwärtzweig ist die Differenz  $x_e - x_r$ . Es ist

$$x_a = F_v (x_e - F_r \cdot x_a),$$

also

$$\frac{x_a}{x_e} = F = \frac{1}{\frac{1}{F_v} + F_r}$$

Das ist die grundlegende

Beziehung für Rückführschaltungen. Für den Bau von Reglern ist das Vorwärtsglied ein Verstärker großer Verstärkung. Das sind P-Verstärker ( $F_v = K_v$ , z.B. Röhrenverstärker) und I-Verstärker ( $F_v = \frac{K_I}{p}$ , z.B. schnelle Motoren).  $F_v$  ist also eine komplexe Zahl von großem Betrag.  $\frac{1}{F_v}$  ist in erster Näherung gegenüber  $F_r$  vernachlässigbar klein. Damit wird

$$F = \frac{1}{F_r}$$

d.h. der Gesamtfrequenzgang ist gleich dem reziproken Rückführfrequenzgang. Verschiedene Rückführungen ergeben damit verschiedenes Übertragungsverhalten für den Regler. Die folgende Tabelle gibt übersichtlich die praktisch meist verwendeten Rückführungen mit den durch sie erzeugten Zeitverhalten an.

Die rechnerisch gewonnenen Ergebnisse lassen sich sehr anschaulich verstehen.

a) Starrere Rückführung erzeugt P-Verhalten (Bild 30).

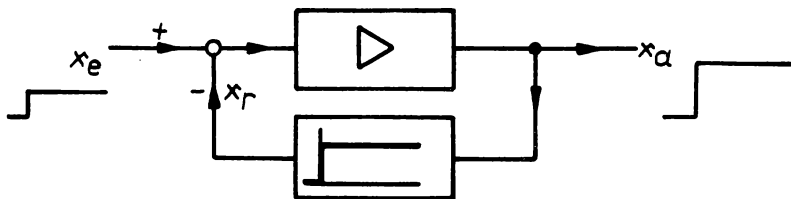
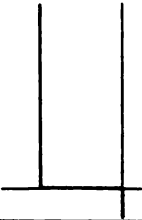
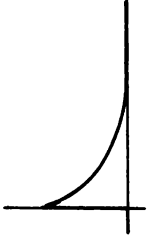
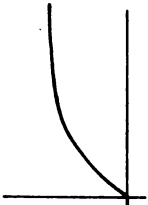
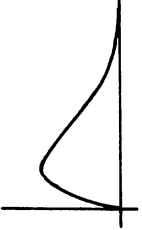

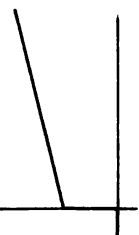
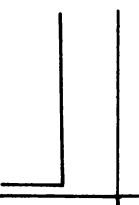
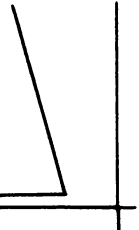


Bild 30

Tabelle 12

Rückführungen				
Bezeichnung	starr	nachgebend	verzögert	verzögert und nachgebend
Übergangsfunktion der Rückführung				
Frequenzgang der Rückführung $F_r$	$K_r$	$\frac{K_r p}{1 + T_r p}$	$\frac{K_r}{1 + T_r p}$	$\frac{K_r p}{1 + T_1 p + T_2 p^2}$
erzeugen an Verstärkern (Düse - Prallplatte - System, hydraulische Steuerventile, Strohlrohr, Magnetverstärker, elektrische Maschinenverstärker, schnelle Motoren, elektronische Verstärker)				
Frequenzgang der Gesamtschaltung $F \frac{1}{F_r}$	$\frac{1}{K_R}$	$\frac{T_r}{K_r} (1 + \frac{1}{T_r p})$	$\frac{1}{K_r} (1 + T_r p)$	$\frac{T_1}{K_r} (1 + \frac{1}{T_1 p} + \frac{T_2}{T_1} p)$
Zeitverhalten	P	PI	PD	PID
Übergangsfunktion des Gesamtverhaltens				

Der Vorwärtsverstärker will ein auftretendes  $x_e$  hoch verstärken, wird aber durch die sofort vorhandene Gegenkopplung "im Zaume" gehalten.

b.) Nachgebende Rückführung erzeugt PI-Verhalten (Bild 31).

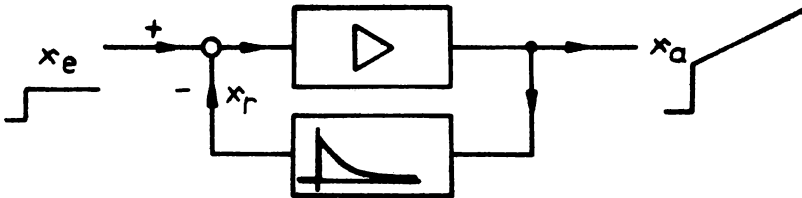


Bild 31

Die nachgebende Rückführung wirkt im ersten Moment wie eine starre Rückführung ( $\rightarrow$  P-Verhalten), dann gibt sie aber nach, d.h. die Gegenkopplung wird allmählich geringer. Dadurch kann der Ausgang immer größer werden ( $\rightarrow$  I-Verhalten). Insgesamt entsteht also PI-Verhalten.

c.) Verzögerte Rückführung erzeugt PD-Verhalten (Bild 32).

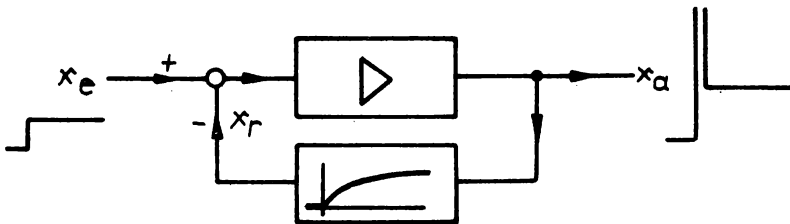


Bild 32

Die verzögert einsetzende Rückführung gibt dem Vorwärtsverstärker die Möglichkeit, ein auftretendes  $x_e$  zuerst mit seiner vollen Verstärkung (sehr groß, wenn  $\frac{1}{F}$  weggelassen wird) zu verstärken, dann setzt aber die Rückführung ein. Da sie nach Ablauf der Verzögerung wie eine starre Rückführung wirkt, stellt sich schließlich P-Verhalten ein. Insgesamt entsteht also PD-Verhalten.

d) Verzögerte und nachgebende Rückführung erzeugt PID-Verhalten (Bild 33).

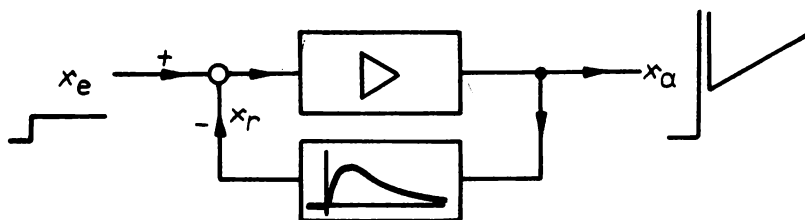


Bild 33

Da die Rückführung verzögert einsetzt, verstärkt der Vorwärtzweig zunächst mit seiner vollen Verstärkung ( $\rightarrow$  D-Anteil). Die einsetzende Rückführung bringt das P-Verhalten. Da die Rückführung aber nachgibt, kann der Ausgang dann ansteigen ( $\rightarrow$  I-Verhalten). Die angegebenen anschaulichen Überlegungen können keinesfalls die durchgeführte Rechnung ( $F_{\text{gesamt}} = \frac{1}{F_r}$ ) ersetzen. Der Ingenieur soll aber nicht nur rechnen, sondern soll die Ergebnisse auch anschaulich verstehen oder auch die Ergebnisse der Rechnung anschaulich qualitativ voraussehen. In dem Sinne wurden die obigen Überlegungen angegeben.

Die in Tabelle 12 angegebenen Rechnungen setzen eine sehr große Verstärkung des Vorwärtzweiges voraus ( $\frac{1}{F_v} \rightarrow 0$ ). Was eintritt, wenn diese Vereinfachung nicht gemacht werden kann (bessere Annäherung an die wirklichen Verhältnisse), ist aus der allgemeinen Rückführbeziehung

$$F = \frac{1}{\frac{1}{F_v} + F_r} \quad \text{leicht abzuleiten.}$$

Beispiel: Ein Verstärker mit  $F_v = \frac{K_v}{1 + T \cdot p}$ , also ein P-Verstärker mit der Verstärkung  $K_v$  und mit Verzögerung erster Ordnung (Zeitkonstante  $T$ ) werde mit einer verzögerten Rückführung versehen

$$F_r = \frac{K_r}{1 + T_r \cdot p} \quad . \text{ Was für Zeitverhalten mit welchen Konstanten wird erzeugt?}$$



Lösung:

$$F = \frac{1}{\frac{1 + T \cdot p}{K_v} + \frac{K_r}{1 + T_r \cdot p}}$$

Umformung auf die Form, die das Zeitverhalten nebst den charakterisierenden Konstanten erkennen läßt, führt auf

$$F(p) = \frac{\frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r} (1 + T_r \cdot p)}{1 + \frac{T + T_r}{1 + K_v K_r} \cdot p + \frac{T \cdot T_r}{1 + K_v \cdot K_r} \cdot p^2}$$

Es entsteht also PD-Verhalten mit Verzögerung 2. Ordnung.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}, \quad T_D = T_r$$

Der Übertragungsfaktor kann durch den Übertragungsfaktor der Rückführung eingestellt werden. Die Differentialzeit ist gleich der Zeitkonstante der verzögerten Rückführung und wird durch diese eingestellt.

### 5.3 Die gerätemäßige Verwirklichung der verschiedenen Rückführungen

Der Aufbau von Reglern läuft meist auf die Ausrüstung von Verstärkern hoher Verstärkung (Energieschaltern), die eingangsseitig Signale zu mischen gestatten, mit entsprechenden Rückführungen hinaus. Verschiedene Rückführungen ergeben verschiedene Reglertypen.

Als Verstärker kommen vor:

Düse-Prallplatte-System

hydraulische Steuerventile, Strahlrohr

Magnetverstärker, elektrische Maschinenverstärker

schnelle Motoren

elektronische Verstärker, usw.

Es sind nun folgende Fragen zu beantworten:

1. Wie verwirklicht man grundsätzlich die verschiedenen

Rückführungen, wie erreicht man also pneumatisch, hydraulisch, elektrisch und elektronisch das starre, nachgebende, verzögerte sowie das verzögerte und nachgebende Übertragungsverhalten von Bauelementen?

2. Wie sieht das Zusammenarbeiten von Vorwärtsverstärker und Rückführung an Beispielen aus?

Die 2. Frage wird im Abschnitt "Stetige lineare Regler mit Rückführungen" beantwortet.

Antwort auf die 1. Frage gibt die Tabelle 13, deren Skizzen teils bekannt, teils ohne weiteres verständlich sind.

Zur Erläuterung mögen noch die folgenden Bemerkungen dienen.

### Starre Rückführung

pneumatisch: Druckteilerschaltung. Der Eingang der Rückführung  $x_e = p_1$  (das ist der Ausgang des ganzen Reglers) steht mit dem Ausgang der Rückführung  $x_a = p_2$  (das ist die Größe  $x_r$  des Signalfußbildes Bild 29) in starrer Abhängigkeit. Ändert sich  $x_e$ , so ändert sich  $x_a$  sofort mit. Es gilt näherungsweise die Beziehung

$$\frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_3} = \frac{A_2^2}{A_1^2} = c, \text{ also ist } p_2 = \frac{p_1 + cp_3}{1 + c}$$

Die Druckteilerschaltung ist ein wichtiges Funktionselement der Pneumatik.

mechanisch-hydraulisch: starrer Hebel. Der Weg  $x_a$  ändert sich proportional zum Weg  $x_e$ . Diese Rückführung - wie auch alle anderen in Tabelle 13 angeführten - werden in späteren Beispielen von Reglern vorkommen.

elektrisch: Mit der Winkelverstellung  $x_e$  des Rotors eines induktiven Gebers ändert sich starr gekoppelt die im Stator induzierte Spannung  $x_a$ . In gewissen Grenzen gilt  $x_a = c_g \cdot x_e$ .

elektronisch: Die Verstellung des Widerstandsabgriffes hat sofort (eben starr) eine Widerstandsänderung  $x_a$  (bzw. Spannungsänderung) zur Folge.

Rückführung				
Bezeichnung	starr	nachgebend	verzögert	verzögert und nachgebend
pneumatisch	<p><math>x_e = p_1</math> <math>x_a = p_2</math> <math>p_3</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>
mechanisch hydraulisch	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>
elektrisch	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>
elektronisch	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>	<p><math>x_e</math> <math>x_a</math></p>

### Nachgebende Rückführung

pneumatisch: Der Eingangsdruck  $x_e$  (man denke an sprungförmiges Auftreten von  $x_e$ ) herrscht sofort in der unteren Membrankammer 1, in der oberen Membrankammer 2 (Drossel-Speicher-System) baut er sich verzögert auf. Dadurch wirkt auf die Membran zunächst eine Ausgangskraft  $x_a$  nach oben, die dann aber nachgibt und zu Null wird. Es ist unter Vernachlässigung der kleinen Durchführungsmembran mit  $x_e = p_e$ :

$$x_a = A (p_e - p_2)$$

$$T \cdot \dot{p}_2 + p_2 = p_e$$

Aus der ersten Gleichung folgt  $p_2 = p_e - \frac{1}{A} \cdot x_a$ . Wird das in die zweite Gleichung eingesetzt, so erhält man

$$T \cdot \dot{p}_e - \frac{T}{A} \dot{x}_a + p_e - \frac{1}{A} \cdot x_a = p_e \quad \text{und geordnet}$$

$$T \cdot \dot{x}_a + x_a = T \cdot A \cdot \dot{p}_e$$

Das ist  $DT_1$ -Verhalten, also nachgebendes Verhalten.

mechanisch-hydraulisch: Wird  $x_e$  sprungförmig nach rechts verstellt, so wird der ölgefüllte Zylinder nebst Kolben und Umgehungsleitung mit nach rechts genommen. Mit dieser sofort erfolgten sprungförmigen Verstellung von  $x_a$  ist die Feder gespannt worden (Federkraft  $c \cdot x_a$ ), das Öl links vom Kolben steht damit unter dem Druck

$$\frac{c \cdot x_a}{A}$$

( $A$  = Kolbenfläche) und strömt durch die Umgehungsleitung auf die andere Seite des Kolbens. Näherungsweise ist das pro Zeiteinheit strömende Ölvolumen  $\frac{dV}{dt}$  der Druckdifferenz  $\frac{c \cdot x_a}{A} - 0$  (der Druck auf der rechten Seite des Kolbens kann als 0 angesetzt werden) und der Drosseleinstellung  $d$  proportional. Indem der Kolben so im Zylinder nach links läuft, wird die Federkraft geringer und damit das pro Zeiteinheit strömende Ölvolumen geringer. Im Ausgleichszustand ist  $x_a$  wieder Null. Also: Bei sprungförmiger Verstellung des

Einganges wird der Ausgang zunächst sprungförmig mitverstellt, gibt dann aber nach und geht auf Null zurück. Es gelten folgende Gleichungen:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c}{A} \cdot x_a \cdot d, \quad x_a = x_e - \frac{V}{A},$$

aus denen V leicht eliminiert werden kann, um eine Beziehung zwischen  $x_e$  und  $x_a$  zu finden.

$$\frac{A^2}{c \cdot d} \cdot \dot{x}_a + x_a = \frac{A^2}{c \cdot d} \cdot \dot{x}_e$$

A = Kolbenfläche

c = Federkonstante

d = Drosselkonstante (einstellbar)

Aus  $\frac{dV}{dt} = \frac{c}{A} \cdot x_a \cdot d$  folgt, da  $\frac{c}{A} \cdot x_a$  ein Druck ist, daß dimensionsmäßig d = Volumen pro Zeit- und Druckeinheit ist.

elektrisch: Die skizzierte Anordnung besteht aus folgenden Bauteilen: Ein Motor, dessen Drehzahl der Steuerspannung proportional ist ( $n = c_M \cdot u_M$ ), verstellt über ein angebautes Getriebe einen induktiven Geber. Die im Geber induzierte Spannung ist der Winkelverstellung proportional ( $u_g = c_g \cdot \alpha$ ). Die Geberspannung wirkt der Eingangsspannung entgegen. Dadurch läuft der Motor immer langsamer und kommt schließlich zur Ruhe. Wenn man den Spannungsabfall über der Geberwicklung gegenüber dem über der Motorwicklung vernachlässigt, so gilt zwischen Eingangsspannung  $x_e = u_e$ , im Geber induzierter Ursprung  $u_g$  und über dem Motor abfallender Steuerspannung  $u_M$  die Beziehung  $u_M = u_e - u_g$ .

Mit  $n = c_M \cdot u_M$ ,  $u_g = c_g \cdot \alpha$ ,  $\omega = \dot{\alpha} = 2\pi n$  läßt sich der Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang errechnen. Ausgangsgröße bei der Schaltung als nachgebende Rückführung ist die über dem Motor abfallende Spannung  $u_M = u_a$ .

Es wird  $u_a = u_e - c_g \int 2\pi c_M \cdot u_a \cdot dt$

$$\frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} \cdot \dot{u}_a + u_a = \frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} \cdot \dot{u}_e$$

elektronisch: Die den Vierpol beschreibende Gleichung wurde schon früher abgeleitet. Mit  $x_e = u_e$ ,  $x_a = u_a$  ist

$$R \cdot C \cdot \dot{u}_a + u_a = R \cdot C \cdot \dot{u}_e$$

Das ist nachgebendes Verhalten. Man kann sich das leicht anschaulich deutlich machen. Bei sprungförmiger  $u_e$ -Verstellung wirkt der Kondensator wie ein Kurzschluß, nach stattgefundenem Sprung sperrt er. Über dem Widerstand fällt also zuerst die volle Eingangsspannung ab, die aber mit der Kondensatoraufladung abklingt.

#### Verzögerte Rückführung:

pneumatisch: Ein Eingangsdruck  $p_e = x_e$  baut sich im Speicher des Drossel-Speicher-Systems verzögert auf.

$$T \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$$

Diese Gleichung wurde schon früher abgeleitet.

mechanisch-hydraulisch: Einer sprungförmigen Verstellung des Weges  $x_e$  folgt der Weg  $x_a$  verzögert. Wird  $x_e$  nach rechts verstellt, so wird die Feder gespannt.  $x_a$  folgt so, wie das Öl mit der Kolbenkraft  $c(x_e - x_a)$  durch die Umgeleitungsleitung gedrückt wird. Mit den bei der nachgebenden hydraulischen Rückführung verwendeten Bezeichnungen gilt:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c(x_e - x_a)}{A} \cdot d, \quad x_a = \frac{V}{A}$$

Also besteht zwischen  $x_e$  und  $x_a$  die Beziehung

$$\frac{A^2}{c \cdot d} \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$$

elektrisch: Die Schaltung ist prinzipiell die gleiche wie bei der nachgebenden Rückführung, nur daß jetzt die Geberspannung  $u_g$  als Ausgangsspannung herausgeführt wird. Mit den bereits verwendeten Bezeichnungen ist mit  $u_g = u_a$ :

$$u_a = u_e - \frac{1}{c_M \cdot 2\pi \cdot c_g} \cdot \dot{u}_a, \text{ also geordnet}$$

$$\frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} \cdot \dot{u}_a + u_a = u_e$$

Das ist  $T_1$ -Verhalten mit  $T = \frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g}$ .

Der Übertragungsfaktor (der hier 1 ist) läßt sich leicht durch einen angefügten Spannungsteiler noch einstellbar machen.

elektronisch: Der an dieser Stelle der Tabelle 13 skizzierte Verzögerungsvierpol ist bekannt.  $R \cdot C \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$  lautet seine beschreibende Gleichung.

Verzögerte und nachgebende Rückführung:

pneumatisch: Der Druck  $p_1$  in der unteren Membrankammer baut sich bei Sprungeingang von  $x_e = p_e$  verzögert auf, der Druck  $p_2$  in der oberen Membrankammer baut sich ebenfalls verzögert auf.

$$T_1 \cdot \dot{p}_1 + p_1 = p_e$$

$$T_2 \cdot \dot{p}_2 + p_2 = p_e$$

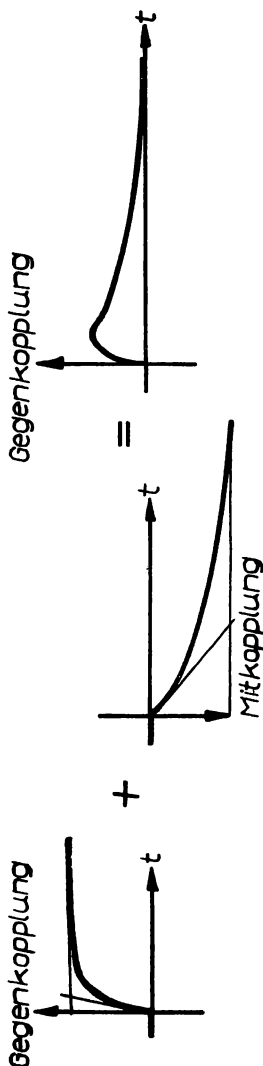
Es ist  $T_2 > T_1$  eingestellt. In der Skizze ist das durch verschieden große Speicher angedeutet. Praktisch geschieht die Einstellung durch unterschiedliche Drosseln. Die nach oben auf die Membran wirkende Kraft  $x_a$  wächst verzögert, wird dann aber - noch mehr verzögert - wieder zu Null. Es ist  $x_a = (p_1 - p_2) \cdot A$

Mit den beiden anderen Gleichungen erhält man die Beziehung zwischen  $p_e$  und  $x_a$ .

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \ddot{x}_a + (T_1 + T_2) \cdot \dot{x}_a + x_a = A(T_2 - T_1) \cdot \dot{p}_e$$

mechanisch-hydraulisch: Es sind solche Anordnungen möglich, aber kaum gebräuchlich. Man denke an eine Hintereinanderschaltung der verzögerten und der nachgebenden Rückführung als mögliches Beispiel.

elektrisch: Die Hintereinanderschaltung der skizzierten verzögerten und der nachgebenden Rückführung ergibt das



verzögerte und nachgebende Zeitverhalten.

Auch folgendes ist möglich: Ein Verstärker mit mehreren Eingängen (z.B. Magnetverstärker mit mehreren Eingangswicklungen) kann verzögert (Zeitkonstante  $T_1$ ) gegengekoppelt und verzögert (Zeitkonstante  $T_2$  mit  $T_2 > T_1$ ) mitgekoppelt werden. Insgesamt ergibt das eine verzögerte und nachgebende Gegenkopplung (Bild 34).

elektronisch: Wird die über  $R_1$  abfallende Spannung mit  $u_1$  bezeichnet, so verhält sich in komplexer Schreibweise mit  $x_e = u_e$  und  $x_a = u_a$ :

$$\frac{u_e}{u_1} = \frac{\frac{1}{C_1 \cdot p} + R_1 \parallel (R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p})}{R_1 \parallel (R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p})}$$

$$= 1 + \frac{1}{C_1 \cdot p} \frac{R_1 + R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p}}{R_1 (R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p})}$$

$$\frac{u_1}{u_a} = \frac{R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p}}{\frac{1}{C_2 \cdot p}} = 1 + R_2 C_2 \cdot p$$

Damit wird

Bild 34



$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{1}{(1 + R_2 \cdot C_2 \cdot p) \cdot \left(1 + \frac{1}{C_1 \cdot p} \cdot \frac{R_1 + R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p}}{R_1 \left(R_2 + \frac{1}{C_2 \cdot p}\right)}\right)}$$

Nach einigen Umformungen erhält man:

$$\frac{u_a}{u_e} = \frac{R_1 \cdot C_1 \cdot p}{1 + (R_1 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_2 + R_2 \cdot C_2) \cdot p + R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot p^2}$$

Das ist  $DT_2$ -Verhalten, also kann der skizzierte Vierpol als verzögerte und nachgebende Rückführung verwendet werden.

#### Wiederholungsfragen zu 5.

1. Wozu dienen Rückführungen?
2. Wieso linearisiert eine starre Rückführung das Übertragungsverhalten von Reglern?
3. Welche Regler entstehen durch die starre, die nachgebende und die verzögerte Rückführung an Verstärkern?
4. Machen Sie sich die "Arbeitsteilung" von Vorwärtzweig und Rückführzweig klar. Welche Aufgaben müssen Vorwärtzweig und Rückführzweig erfüllen?
5. Die Rückführung auf den Eingang des Vorwärtsgliedes erfordert die Möglichkeit der Signalmischung.  
Welche Möglichkeiten der Signalmischung gibt es bei pneumatischen, hydraulischen, elektrischen und elektromechanischen Verstärkern?
6. Welche Gegenkopplung würde nach Bild 34 bei  $T_1 = T_2$  entstehen?

## Aufgaben zu 5.

=====

1. Ein starr gegengekoppelter elektronischer Verstärker ohne Verzögerung soll als gegengekoppeltes Gesamtsystem eine Verstärkung von  $K = 100$  haben.

Welche Verstärkung muß man dem Vorwärtsverstärker geben (Röhrenkennlinien, Auswahl der Röhrentypen, Wahl der Verstärkerstufen, usw.), wenn sich eine 10 %ige Änderung seiner Verstärkung nur in einer 0,5 %igen Änderung der Gesamtverstärkung bemerkbar machen soll?

2. Ein Verstärker habe die Verstärkung 200. Es werden aber nur Verstärkungen von 1 bis 10 benötigt. Es wird eine starre Gegenkopplung angebracht, die eine Linearisierung der Verstärkerkennlinie bewirkt.

1. In welchem Bereich muß der Übertragungsfaktor der Rückführung einstellbar sein?

2. Mit wieviel Prozent wirkt sich bei Gesamtverstärkung gleich 1 eine 10 %ige Änderung der Verstärkung des Vorwärtsgliedes auf die Verstärkung des gegengekoppelten Systems aus?

3. Mit wieviel Prozent wirkt sich bei Gesamtverstärkung gleich 10 eine 10 %ige Änderung der Verstärkung des Vorwärtsgliedes auf die Verstärkung des gegengekoppelten Systems aus?

3. Welches Zeitverhalten entsteht durch die Ausrüstung eines I-Gliedes ( $F_v = K_I/p$ ) mit einer

1. starren

2. nachgebenden

3. verzögerten

4. verzögerten und nachgebenden Rückführung?

Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den für  $F_v \rightarrow \infty$  gewonnenen.

4. Für die Erzeugung eines gewünschten Zeitverhaltens gibt es aufbauend auf den im Lehrbrief dargestellten grundsätzlichen Möglichkeiten viele Varianten. Bild 35 zeigt das Blockschaltbild eines Reglers.

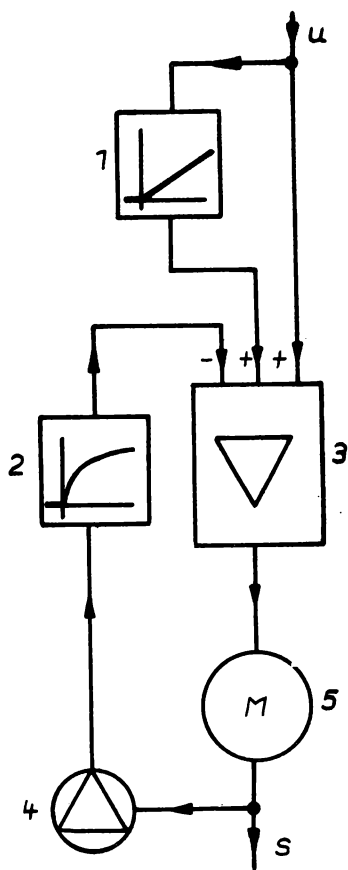


Bild 35

Es bedeuten:

1: I-Glied  $F_1 = \frac{K_1}{p}$

2: Verzögerungsglied

$$F_2 = \frac{K_2}{1 + T \cdot p}$$

3: Verstärker mit drei gleichberechtigten Eingängen

$$F_3 = K_3 \rightarrow \infty$$

4: Induktiver Geber

$$F_4 = K_4$$

5: Motor  $F_5 = \frac{K_5}{p}$

u: Eingangsspannung,

s: Ausgangsdrehweg.

1. Geben Sie s als Funktion von u an!
2. Welches Zeitverhalten hat der Regler?
3. Wie bestimmen sich die Kenndaten des Reglers aus den oben angegebenen Konstanten?
4. Wo kann welcher Kennwert eingestellt werden?
5. Welche Koppelungen der Einstelldaten liegen vor?

5. Von den Bauelementen der elektrischen Rückführungen nach Tabelle 13 mögen folgende Zahlenwerte angenommen werden:

Induktiver Geber: Zu einer Winkelverstellung von  $10^\circ$  gehöre eine Spannungsverstellung

von 5 V.

Motor und Getriebe: Der Motor habe bei einer Steuerung-  
spannung von 10 V eine Drehzahl von  
 $50 \frac{U}{\text{min}}$ , das Getriebe habe eine Unter-  
setzung von 1 : 1000.

1. Wie lauten unter Annahme linearer Verhältnisse die Gleichungen der starren, der nachgebenden und der verzögerten Rückführung?
2. Stellen Sie das Verhalten der nachgebenden und der verzögerten Rückführung für eine sprungförmige Verstellung der Eingangsspannung um  $x_e = u_e = 10 \text{ V}$  graphisch dar.
6. Für die nachgebende und für die verzögerte hydraulische Rückführung nach Tabelle 13 mögen folgende Zahlenwerte angenommen werden:  
Federkonstante  $c = \frac{0,5 \text{ kp}}{\text{mm}}$ , Kolbenfläche  $A = 50 \text{ cm}^2$ .  
Die Umgehungsdrössel möge einstellbar sein vom geschlossenen Zustand bis zu einem Durchfluß von 6 l pro Minute und pro at Druckdifferenz.  
In welchen Grenzen sind dann unter Annahme linearer Verhältnisse die Zeitkonstanten einstellbar?
7. Wie ändert sich die beschreibende Gleichung der nachgebenden pneumatischen Rückführung nach Tabelle 13, wenn die kleine Membran (Fläche a), die zur druckdichten Durchführung dient, berücksichtigt wird?  
Skizzieren Sie die Übergangsfunktion!  
Wie könnte man durch eine kleine konstruktive Änderung das bei Vernachlässigung der Fläche a errechnete Zeitverhalten erreichen, ohne a zu vernachlässigen?

# Lösungen der Aufgaben

## Aufgabe 3.1.

$$K = \frac{0,2 \text{ at}}{5 \text{ grad}} = 0,04 \frac{\text{at}}{\text{grad}}$$

$$x_p = 20 \text{ grad} \hat{=} 100 \%$$

$$y_h = 0,8 \text{ at}$$

## Aufgabe 3.2.

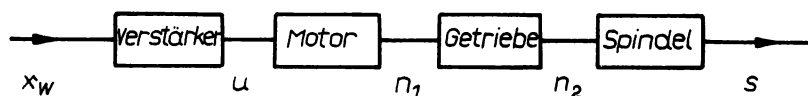


Bild 36

$$1.) \quad u = 100 \cdot x_w$$

$$n_1 = \frac{2000 \frac{1}{\text{min}}}{30 \text{ V}} \cdot u$$

$$n_2 = \frac{1}{50} \cdot n_1$$

Bei einer Umdrehung pro Zeiteinheit wäre die Ausgangsweg-  
änderung  $\frac{ds}{dt}$  der Spindel 2 mm pro Zeiteinheit. Also ist

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2 \text{ mm/min}}{1/\text{min}} \cdot n_2$$

Damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen s und  $x_w$  als

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2 \text{ mm/min}}{1/\text{min}} \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{2000 \text{ 1/min}}{30 \text{ V}} \cdot 100 \cdot x_w$$

$$\frac{ds}{dt} = 267 \frac{\text{mm}}{\text{min} \cdot \text{V}} \cdot x_w = 4,45 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot x_w$$

$$s = 4,45 \frac{\text{mm}}{\text{s} \cdot \text{V}} \int x_w \cdot dt$$

$$2.) \quad Y_h = 20 \text{ cm}$$

$$X_h = 0,3 \text{ V}$$

$$T_y = \frac{Y_h}{Y_{\max}} = \frac{200 \text{ mm}}{4,45 \frac{\text{mm}}{\text{s} \cdot \text{V}} \cdot 0,3 \text{ V}} = 150 \text{ s}$$

### Aufgabe 3.3.

$$K = 0,04 \frac{\text{at}}{\text{mA}}$$

$$X_P = \frac{Y_h}{K} = \frac{0,8 \text{ at}}{0,04 \text{ at}} \text{ mA} = 20 \text{ mA}$$

$$T_I = 10 \text{ min}$$

### Aufgabe 3.4.

Durch Zeichnen der Sprungantwort und Anlegen von Anfangstangente und Asymptote erhält man:

1.) PID-Verhalten

$$2.) \quad K = 0,5 \frac{\text{at}}{\text{at}} \quad T_I = 60 \text{ s} \quad T_D = 15 \text{ s}$$

### Aufgabe 3.5.

- 1.) Aus der angegebenen Form der Ortskurve ist auf  $PDT_1$ -Verhalten zu schließen (Tabelle 10).
- 2.) Die maximale Phasenvoreilung kann aus dem Frequenzgang mit den Mitteln der Differentialrechnung bestimmt werden. Man erhält so eine Bestimmungsgleichung für die gesuchten Größen. Die angegebenen Achsenabschnitte liefern zwei weitere Bestimmungsgleichungen, so daß die drei gesuchten Größen  $K_R$ ,  $T_D$  und  $T$  errechnet werden können.

$$F = \frac{K_R (1 + T_D \cdot \omega j)}{1 + T \omega j}$$

Zähler wie Nenner sind komplexe Zahlen, haben also einen Betrag und einen Phasenwinkel. Der Phasenwinkel des Quotienten ergibt sich als die Differenz  $\varphi_{\text{Zähler}}$  minus  $\varphi_{\text{Nenner}}$ .

$$\varphi = \arctan T_D \cdot \omega - \arctan T \cdot \omega$$

$$\frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{T_D}{1 + T_D^2 \omega^2} - \frac{T}{1 + T^2 \omega^2}$$

Das Maximum von  $\varphi$  liegt bei  $\frac{d\varphi}{d\omega} = 0$

$$T_D (1 + T^2 \omega^2) = T (1 + T_D^2 \omega^2)$$

Das zu  $\varphi_{\max}$  gehörende  $\omega$  ist in der Aufgabenstellung angegeben

$$T_D (1 + T^2 \frac{1}{50(\text{ms})^2}) = T (1 + T_D^2 \frac{1}{50(\text{ms})^2})$$

Die weiteren Zahlenangaben der Aufgabenstellung führen (Tabelle 10) zu den Gleichungen

$$K_R = 10 \quad \text{und} \quad \frac{K_R \cdot T_D}{T} = 500.$$

Aus der letzten Gleichung folgt  $T_D = 50 T$ . Das oben eingesetzt, ergibt

$$50 T (1 + \frac{T^2}{50(\text{ms})^2}) = T (1 + \frac{50 T^2}{(\text{ms})^2})$$

$$50 + \frac{T^2}{(\text{ms})^2} = 1 + 50 \frac{T^2}{(\text{ms})^2}$$

$$T = 1 \text{ ms}$$

Also:  $K_R = 10$

$$T_D = 50 \text{ ms}$$

$$T = 1 \text{ ms}$$

#### Aufgabe 5.1.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r} = \frac{K_v}{1 + K_r \cdot K_v}$$

$$\frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + K_r K_v} \cdot \frac{dK_v}{K_v}$$

Gegeben:  $K = 100$ ,  $\frac{dK_v}{K_v} = 10 \%$ ,  $\frac{dK}{K} = 0,5 \%$

Gesucht:  $K_v$

$$100 = \frac{K_v}{1 + K_r K_v}$$

$$0,5 = \frac{1}{1 + K_r K_v} \cdot 10 \quad 1 + K_r K_v = 20, \text{ also}$$

$$100 = \frac{K_v}{20} \quad K_v = 2000$$

Der Vorwärtsverstärker müßte also die Verstärkung 2000 haben.

### Aufgabe 5.2.

$$1.) \quad 1 = \frac{1}{\frac{1}{200} + K_{r1}} \quad K_{r1} = 0,995$$

$$10 = \frac{1}{\frac{1}{200} + K_{r2}} \quad K_{r2} = 0,095$$

$K_r$  muß zwischen 0,995 und 0,095 einstellbar sein.

$$2.) \quad \frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + 0,995 \cdot 200} \cdot 10 \% = 0,05 \%$$

$$3.) \quad \frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + 0,095 \cdot 200} \cdot 10 \% = 0,5 \%$$

### Aufgabe 5.3.

$$F = \frac{1}{\frac{1}{F_v} + F_r} = \frac{1}{\frac{p}{K_I} + F_r}$$

$$1.) \quad F = \frac{1}{\frac{p}{K_I} + K_r} = \frac{\frac{1}{K_r}}{1 + \frac{1}{K_r \cdot K_I} \cdot p} \quad (PT_1\text{-Verhalten})$$

$$2.) \quad F = \frac{1}{\frac{p}{K_I} + \frac{K_r \cdot p}{1 + T_r \cdot p}} = \frac{K_I (1 + T_r \cdot p)}{p + T_r p^2 + K_r K_I p} = \frac{K_I T_r (1 + \frac{1}{T_r p})}{1 + K_r K_I + T_r p}$$



$$F = \frac{\frac{T_r}{1/K_I + K_r} \left(1 + \frac{1}{T_r p}\right)}{1 + \frac{T_r}{1 + K_r K_I} \cdot p} \quad (\text{PIT}_1\text{-Verhalten})$$

$$3.) \quad F = \frac{1}{\frac{p}{K_I} + \frac{K_r}{1 + T_r p}} = \frac{K_I (1 + T_r p)}{p + T_r p^2 + K_r K_I}$$

$$F = \frac{\frac{1}{K_r} (1 + T_r p)}{1 + \frac{1}{K_r K_I} p + \frac{T_r}{K_r K_I} p^2} \quad (\text{PDT}_2\text{-Verhalten})$$

$$4.) \quad F = \frac{1}{\frac{p}{K_I} + \frac{K_r p}{1 + T_1 p + T_2^2 p^2}} = \frac{K_I (1 + T_1 p + T_2^2 p^2)}{p + T_1 p^2 + T_2^2 p^3 + K_r K_I p}$$

$$= \frac{K_I T_1 \left(1 + \frac{1}{T_1 p} + \frac{T_2^2}{T_1} p\right)}{1 + K_r K_I + T_1 p + T_2^2 p^2}$$

$$F = \frac{\frac{T_1}{\frac{1}{K_I} + K_r} \left(1 + \frac{1}{T_1 p} + \frac{T_2^2}{T_1} p\right)}{1 + \frac{T_1}{1 + K_r K_I} p + \frac{T_2^2}{1 + K_r K_I} p^2} \quad (\text{PIDT}_2\text{-Verhalten})$$

Gegenüber den Ergebnissen bei  $F_v \rightarrow \infty$  sind hier überall Verzögerungen hinzugekommen. Mit großem  $K_I$  nähern sich die Frequenzgänge den in Tabelle 12 angegebenen.

#### Aufgabe 5.4.

$$1.) \quad s = F_5 \cdot F_3 (u + F_1 \cdot u - F_2 \cdot F_4 \cdot s)$$

$$F = \frac{s}{u} = \frac{F_3 \cdot F_5 (1 + F_1)}{1 + F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5}$$

Das Einsetzen der gegebenen Frequenzgänge ergibt

$$F = \frac{s}{u} = \frac{K_3 \frac{K_5}{p} (1 + \frac{K_1}{p})}{1 + \frac{K_2}{1 + T \cdot p} K_3 \cdot K_4 \cdot \frac{K_5}{p}}$$

Für  $K_3 \rightarrow \infty$  erhält man nach Division von Zähler und Nenner durch  $K_3$ :

$$\begin{aligned} F = \frac{s}{u} &= \frac{\frac{K_5}{p} (1 + \frac{K_1}{p})}{\frac{K_2}{1 + T \cdot p} \cdot K_4 \cdot \frac{K_5}{p}} = \frac{1}{K_2 \cdot K_4} (1 + \frac{K_1}{p}) \cdot (1 + T \cdot p) \\ &= \frac{1}{K_2 \cdot K_4} (1 + \frac{K_1}{p} + T \cdot p + K_1 \cdot T) \end{aligned}$$

$$F = \frac{s}{u} = \frac{1 + K_1 T}{K_2 K_4} (1 + \frac{K_1}{1 + K_1 T} \cdot \frac{1}{p} + \frac{T}{1 + K_1 T} \cdot p)$$

2.) PID-Verhalten

$$3.) K_R = \frac{1 + K_1 T}{K_2 K_4}$$

$$T_I = \frac{1 + K_1 T}{K_1} = \frac{1}{K_1} + T$$

$$T_D = \frac{T}{1 + K_1 T} = \frac{1}{\frac{1}{T} + K_1}$$

4.) Es gibt mehrere Möglichkeiten, am günstigsten wird man die folgende wählen:

$K_R$  durch  $K_2$  an Glied 2 einstellen.

$T_I$  durch  $K_1$  an Glied 1 einstellen.

$T_D$  durch  $T$  an Glied 2 einstellen.

- 5.)  $K_R$  kann unabhängig von den anderen Einstelldaten eingestellt werden. Bei der Einstellung von  $T_I$  bzw.  $T_D$  ändern sich jeweils auch die beiden anderen Einstelldaten mit, allerdings nicht sehr stark, da üblicherweise  $T_I$  ungefähr fünfmal größer als  $T_D$  ist. D.h. daß  $\frac{1}{K_1}$  um einiges größer als  $T$  ist, also  $K_1$  um einiges kleiner als  $\frac{1}{T}$ . In den Summen  $\frac{1}{K_1} + T$  und  $\frac{1}{T} + K_1$  sind demnach  $\frac{1}{K_1}$  bzw.  $\frac{1}{T}$  die größeren und damit bestimmenden Summanden.

#### Aufgabe 5.5.

1.) Es ist  $c_M = \frac{n}{u_M} = \frac{50}{10 \text{ V}} \frac{1}{\text{min}} = 5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{min} \cdot \text{V}}$

$$c_g = \frac{u_g}{\alpha} = \frac{5 \text{ V}}{10^0} = \frac{5 \text{ V}}{360^0 \cdot 10^0} = \frac{90}{\pi} \text{ V}$$

$$T = \frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} = \frac{\text{min} \cdot \text{V} \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 90 \text{ V}} = \frac{100}{9} = 11,1 \text{ min}$$

Gleichung der starren Rückführung:

$$u_g = c_g \cdot \alpha = \frac{90}{\pi} \text{ V} \cdot \alpha = 28,6 \text{ V} \cdot \alpha$$

Gleichung der nachgebenden Rückführung:

$$11,1 \text{ min} \cdot \dot{u}_a + u_a = 11,1 \text{ min} \cdot \dot{u}_e$$

Gleichung der verzögerten Rückführung:

$$11,1 \text{ min} \cdot \dot{u}_a + u_a = u_e$$

2.)

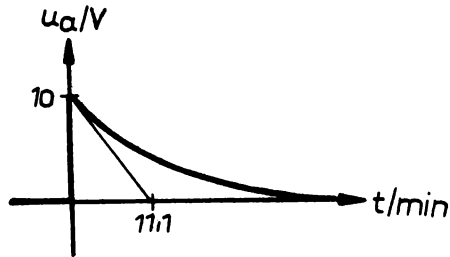


Bild 37

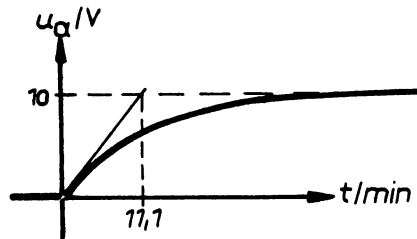


Bild 38

Aufgabe 5.6.

Zeitkonstante  $T = \frac{A^2}{c \cdot d}$ ,  $d = \frac{6 \text{ l}}{\text{min} \cdot \text{at}}$  bis  $\frac{0 \cdot 1}{\text{min} \cdot \text{at}}$

$$T = \frac{25 \cdot 10^2 \text{ cm}^4}{\frac{5 \text{ kp}}{\text{cm}} \cdot \frac{6 \cdot 10^3 \text{ cm}^3}{60 \text{ s} \cdot \text{kp/cm}^2}} = 5 \text{ s}$$

T ist einstellbar von 5 s an aufwärts.

### Aufgabe 5.7.

$$x_a = (A - a) p_e - A p_2$$

$$T \cdot \dot{p}_2 + p_2 = p_e$$

Elimination von  $p_2$  ergibt  $T \cdot \dot{x}_a + x_a = (A - a) T \dot{p}_e - a \dot{p}_e$

Zur Lösung der Differentialgleichung für  $p_e = \sqrt{p_0}$  = konstant erhält man aus

$$T x_a + \int x_a dt = (A - a) T p_e - a \int p_e dt \quad \text{die}$$

Anfangsbedingung

$$x_a(+0) = (A - a) p_0$$

Da für  $t > 0$   $\dot{p}_e = 0$  ist, läßt sich die Differentialgleichung leicht lösen.

$$x_a(t) = C e^{-\frac{t}{T}} - a p_0$$

Die Bestimmung der Integrationskonstanten führt auf

$$(A - a) p_0 = C - a p_0, \quad \text{also ist } C = A \cdot p_0$$

Lösung der Differentialgleichung:

$$x_a(t) = A \cdot p_0 e^{-\frac{t}{T}} - a p_0$$

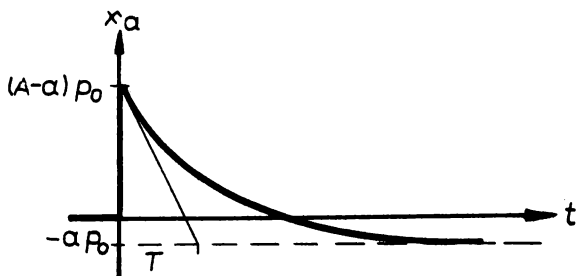


Bild 39

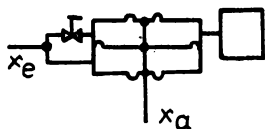


Bild 40

Die graphische Darstellung der Übergangsfunktion zeigt Bild 39.

Die gefragte konstruktive Änderung besteht in der Einfügung einer Kompensationsmembran (Bild 40).

