

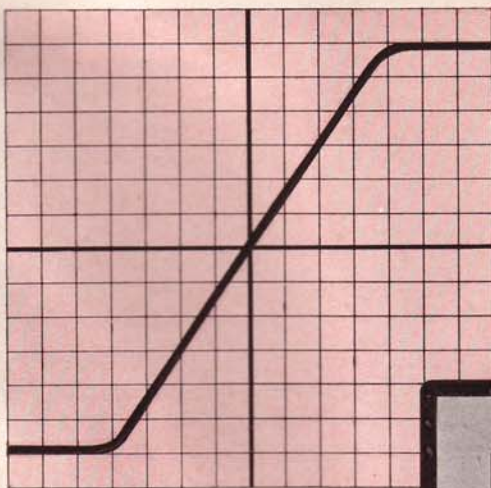
Neu



TELEFUNKEN

Erläuterungen zu der
DIA-Reihe

ANALOGRECHNER



Zu beziehen durch die

TELEFUNKEN A. G.

Abteilung Nachwuchs und Ausbildung

1 BERLIN 10, Ernst-Reuter-Platz 7

Ele
teil
a)
b)
Bei
ter
Sp
Die
de
bz
Be
da
an
Di
D
m
re
ch
Es
m
g
Be
k
M
w
d
D
1
2
D
F
j
l
Y
c
r
f

Analogrechnen

Elektronische Rechenanlagen lassen sich entsprechend ihrer prinzipiellen Wirkungsweise in zwei Gruppen einteilen:

- a) Ziffernrechner oder Digitalrechner
- b) Analogrechner

Bei Digitalrechnern werden alle Rechengrößen durch bestimmte Ziffernfolgen ausgedrückt, die als eine charakteristische Anzahl oder Anordnung von elektrischen Impulsen bzw. Magnetisierungszuständen magnetischer Speicher dargestellt sind.

Die Verknüpfung der Ziffernfolgen, entsprechend den Gesetzen der 4 Grundrechnungsarten, erfolgt in besonderen Rechenwerken. Die erzielbare Ergebnisgenauigkeit hängt nur von der verwendeten Anzahl der Ziffern bzw. der Zahl der Impulse je Wort ab. Form und Größe der Impulse beeinflussen die Genauigkeit nicht.

Bei allen Analogrechnern werden dagegen die Rechengrößen durch zugeordnete physikalische Größen dargestellt, deren kontinuierliche Änderungen den Änderungen der Rechengrößen analog sind. Einfachstes analoges Rechenggerät ist der Rechenschieber, bei dem die Zahlendarstellung durch Längen erfolgt.

Die Analogie ist jedoch nicht nur auf die Art der Zahlendarstellung beschränkt.

Da es für physikalische Vorgänge eine gesicherte mathematische Beschreibung gibt, ist es andererseits auch möglich, mathematische Zusammenhänge durch physikalische Vorgänge nachzubilden. Mit Hilfe des Analogrechners läßt sich ein derartiges physikalisches Modell aufbauen, in dem sich die Variablen nach den gleichen Gesetzen ändern, wie sie das zu lösende Problem vorschreibt.

Es gibt mechanische und elektronische Analogrechner, von denen sich letztere wegen ihrer leichteren Programmierbarkeit, bequemerer Bedienung und größerer Rechengeschwindigkeit für allgemeine Anwendung durchgesetzt haben. Mechanische Analogrechner sind nach wie vor für Spezialzwecke in Gebrauch.

Beim elektronischen Analogrechner werden die Rechengrößen durch elektrische Spannungen dargestellt. 3 Volt kann z. B. je nach Maßstab die Zahl 30 oder 3 oder 0,3 usw. bedeuten.

Mit Hilfe verschiedener, im Analogrechner vorhandener Rechenelemente baut man sich ein elektrisches Netzwerk als physikalisches Modell des zu untersuchenden Vorganges auf. Die Messung der Variablen, d. h. der Spannungen, an bestimmten Punkten dieses Netzwerkes, ergibt die gesuchte Lösung.

Die Anwendungsgebiete des Analogrechners umfassen:

1. Lösung gewöhnlicher linearer und nichtlinearer Differentialgleichungen und Systeme solcher Gleichungen, u. U. auch partieller Differentialgleichungen.
2. Allgemeine Nachbildung physikalischer Systeme, die durch Differentialgleichungen beschrieben werden. Damit ist bereits zum Ausdruck gebracht, daß sich der Analogrechner vorwiegend zur Lösung dynamischer Probleme eignet. Diese Probleme liegen einmal auf dem Gebiet der reinen Mathematik, zum größten Teil jedoch bei der Berechnung und Simulation von Vorgängen in Mechanik, Elektrotechnik, Chemie, Optik, Regelungstechnik, Verfahrenstechnik und Biologie.

Wichtige Anwendungen sind weiter der Einsatz als Simulator für Geräteelemente, Geräte und Verfahren, deren Modelluntersuchung aus Zeit- und Kostengründen oder wegen der Gefährlichkeit eines Originalexperimentes notwendig ist.

Beispiele:

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Elektrotechnik:
Analyse und Synthese linearer und nichtlinearer Netzwerke. Untersuchung dynamischer Vorgänge, z. B. in elektrischen Maschinen, Transformatoren, Leistungsschaltern usw.2. Maschinenbau:
Untersuchung von Schwingungen und schwingungsfähigen Gebilden. Hydraulische und pneumatische Vorgänge, Eigenwertprobleme.3. Luftfahrttechnik:
Simulation von Flugkörpern
Steuerung und Regelung von Flugkörpern
Flugbahnberechnung.4. Kerntechnik:
Simulation von Kernreaktoren
Allgemeine kinetische Untersuchungen. | <ol style="list-style-type: none">5. Regelungstechnik:
Dynamische Vorgänge in Regelsystemen aller Art
Simulation von Regelkreisgliedern
Stabilitätsuntersuchungen.6. Verfahrenstechnik:
Simulation verfahrenstechnischer Abläufe
Optimierung verfahrenstechnischer Abläufe in Chemie
Wärmetechnik
Elektrotechnik7. Biologie und Physiologie:
Herz-, Nieren-, Kreislaufmodelle
Physiologische Regelsysteme |
|---|---|



Bild 1 RAT 740

Am Tisch-Analogrechner in Bild 1 erkennt man im oberen Einschub links die Übersteuerungslampen zur Anzeige der Überschreitung des zulässigen Rechenbereiches (d. h. Spannungsbereiches) von 19 Rechenverstärkern, rechts daneben die Netzeinheit mit Anzeigeinstrument und Sicherungsautomaten für die notwendigen Versorgungsspannungen. Das Instrument gestattet gleichzeitig über eine Einzelwahl die Anzeige der Ausgangsspannungen aller Rechenverstärker. Darunter befinden sich unter der aufklappbaren Abdeckung 2 Knopfreihen mit je 21 Potentiometerantrieben, die 2 Funktionsgeneratoren zugeordnet sind.

Nochmals darunter befinden sich 20 Koeffizientenpotentiometer mit Zehngang-Antrieben.

Diese Elemente sowie Multiplizierer und Komparatoren erscheinen auf dem Buchsenfeld des unteren Einschubes, wo auf auswechselbaren Programmierfeldern die Schaltungen gesteckt werden.

Die Bedienungstastatur zur Wahl verschiedener Rechen- und Prüfzustände befindet sich am unteren Einschub rechts, ebenso Anschlußbuchsen für Auswertegeräte wie Oszillographen und XY-Schreiber. Das Instrument dient zum Nullen der Rechenverstärker, Ausmessen von Spannungen nach dem Kompensationsmeßverfahren und genauen Einstellen der Koeffizientenpotentiometer. Das Potentiometer im unteren Einschub gestattet eine kontinuierliche Einstellung der Rechenzeit zwischen $\frac{1}{10}$ sec und 100 sec bei repetierendem Rechenbetrieb.

Elektronische Analogrechner bestehen aus einer Ansammlung von Rechenelementen, mit deren Hilfe anhand der vorliegenden mathematischen Beschreibung des zu untersuchenden Vorganges eine Rechenschaltung aufgebaut wird.

Rechenelemente sind:

1. Summierende und integrierende Verstärker
2. Potentiometer zur Einstellung fester Koeffizienten
3. Multiplizierer
4. Funktionsgeneratoren zur Erzeugung beliebiger stetiger Funktionen
5. Komparatoren zum Vergleich zweier Spannungen.

Diese Rechenelemente werden in bestimmter Anzahl und Kombination zusammengefaßt und in Tisch- oder Schrankgestellen zusammen mit den notwendigen Netzversorgungseinheiten und Bedienungselementen untergebracht. Ein- und Ausgänge der Rechenelemente erscheinen auf einem zentralen Programmierfeld, wo sie mit Hilfe von Steckern und Programmierschnüren zu Rechenschaltungen verbunden werden.

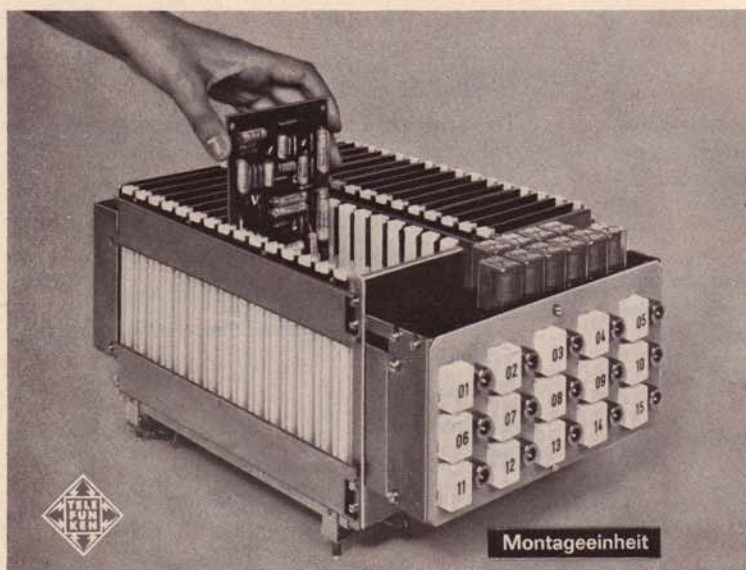
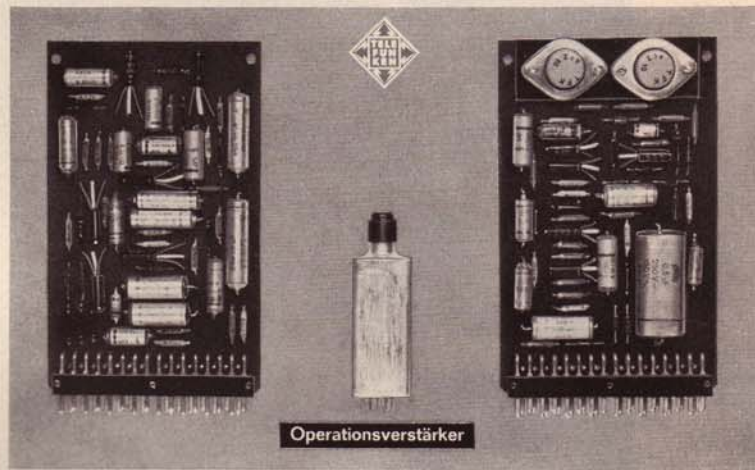


Bild 2
Montageeinheit Rechenverstärker

Man erkennt den inneren Aufbau des Rechners aus Montageeinheiten mit Magazinen für Steckkarten (im vorliegenden Fall die Montageeinheit Rechenverstärker für einen 15-Verstärker-Rechner). Die Karten sind leicht auswechselbar.

Bild 3
Operationsverstärker



Das Bild zeigt einen Rechenverstärker (oder Operationsverstärker), bestehend aus einem sog. Hauptverstärker und einem Hilfsverstärker auf je einer Steckkarte. Dazwischen ein Chopperrelais, das bei der Stabilisierung des Verstärkers eine wichtige Rolle spielt.

Alle übrigen Rechenelemente sind in ähnlicher Weise auf Steckkarten aufgebaut und in Magazinen untergebracht.

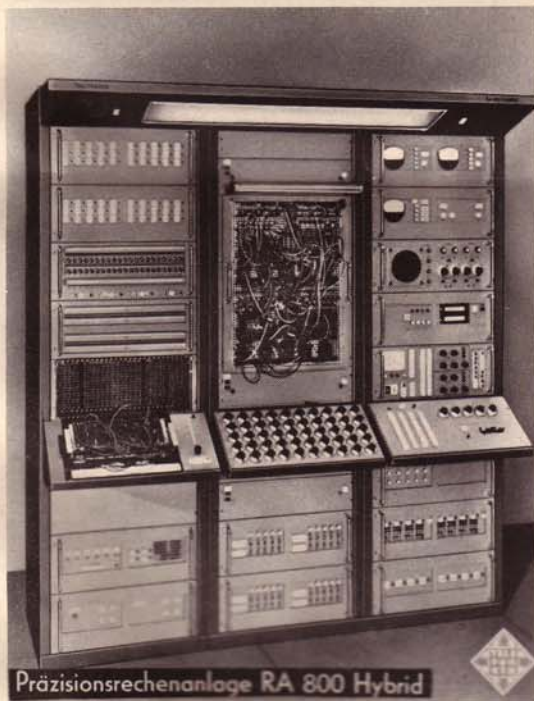


Bild 4

Bild 4

Präzisions-Analogrechenanlage RA 800 HYBRID

Da in der Analogrechenstechnik jeder Rechengröße in einer Gleichung oder einem Gleichungssystem ein eigenes Rechenelement zugeordnet wird, ist die notwendige Anzahl der Rechenelemente dem Umfang des vorliegenden Problems stets proportional. Insbesondere in der Luft- und Raumfahrttechnik, aber auch auf allen anderen Anwendungsgebieten erreicht der Aufwand häufig ein Ausmaß, der mit Tischrechnern nicht mehr zu bewältigen ist. Zwar lassen sich mehrere Tischrechner parallel schalten so daß der Anlagenumfang erweitert werden kann, aber es gehen Übersichtlichkeit und Bequemlichkeit der Programmierung schnell verloren. Darüberhinaus erfordern größere Rechenprobleme eine höhere Einzelgenauigkeit der beteiligten Rechenelemente, da die Genauigkeit der Gesamtlösung u. a. von den technischen Fehlergrenzen der Einzelkomponenten beeinflusst wird. Man hat daher große Analogrechenanlagen in Gestellschränken zusammengefaßt. Zugleich mit der Erhöhung der Zahl der Rechenelemente (Größenordnung: 150 Rechenverstärker, 100 Potentiometer, 8 Funktionsgeber, 20 Produkte) setzt man deren Fehlergrenzen etwa um den Faktor 10 herab und verbessert den allgemeinen Bedienungskomfort im Hinblick auf Automatisierung des des Prüf- und Rechenablaufes, Ausdrucksmöglichkeit für Rechenwerte auf Zeilendruckern oder Lochstreifen und Servoeinstellung der Rechenpotentiometer. Zusätzlich

kann eine Steuerung des Rechenablaufes durch eingebaute, digital arbeitende Logik-Elemente erfolgen sowie eine Anschlußelektronik für die Zusammenarbeit mit Digitalrechnern vorhanden sein.

In den beiden letzten Fällen spricht man von sog. Hybrid-Analogrechnern.

Das Bild zeigt eine Präzisions-Analogrechenanlage mit etwa 120 Rechenverstärkern, die sich bezüglich Umfang und Genauigkeit der Rechenelemente sowie des Bedienungskomforts von Tischanlagen unterscheidet. Alle Elemente sind auf einem auswechselbaren Programmierfeld zusammengefaßt. Der Ausbau zu einer Hybrid-Anlage ist möglich.



Bild 5
Analogrechenanlage

Wie sich bei umfangreichen Problemstellungen die Rechenelemente eines Präzisionsrechners noch durch Tischrechner-Elemente erweitern lassen, zeigt vorliegendes Bild. Ebenso lassen sich mehrere Präzisions-Analogrechenanlagen parallel schalten.

Der aktuelle Anlaß für vorliegende Rechnerkombination war die Simulation des Fluges einer Raumsonde von der Erde zum Mars.

Bild 6
Symbole (Rechenelemente des Analogrechners)

Das Bild zeigt eine Zusammenfassung aller vorkommenden Rechenelemente, wie sie als Symbole in Blockschaltbildern einer auf dem Papier entworfenen Rechenschaltung verwendet werden.

In der rechten Spalte steht mathematisch ausgedrückt die durchgeführte Operation, die von Eingangsgrößen y_e auf eine bestimmte Ausgangsgröße y_a führt.

1. Potentiometer: Spannungsteiler, gestattet die Einstellung von Koeffizienten zwischen Null und Eins. Vor Durchführung einer Rechnung werden alle Koeffizienten größer 1 durch eine sog. Normierung auf Werte kleiner 1 umgeschrieben.
2. Summierer: Es werden verschiedene Eingangsgrößen zu einer Ausgangsgröße aufsummiert, wobei die Eingangsgrößen zuvor mit bestimmten Faktoren c multipliziert werden können. Das Vorzeichen wechselt zwischen Eingang und Ausgang.
3. Integrierer: Im Anschluß an eine Summation aller Eingangsgrößen wird das zeitliche Integral über die Summe gebildet. Die Zeitkonstante k der Integration ist wählbar. Das Vorzeichen wechselt zwischen Eingang und Ausgang.
4. Offener Verstärker: Für spezielle Operationen.
5. Nichtlineares Rechenelement: Allgemeines Symbol.
6. Funktionsgeber: Die Ausgangsgröße ist eine bestimmte Funktion der Eingangsgröße. Die Funktion kann fest verdrahtet oder variabel einstellbar sein.

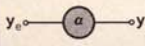
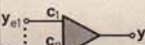
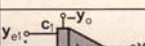



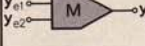
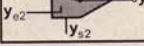
Symbol	Benennung	Operation
	Potentiometer	$y_a = \alpha y_e$ $0 \leq \alpha \leq 1$
	Summierer (Summierverstärker)	$y_a = - \sum_{i=1}^n c_i y_{ei}$
	Integrierer (Summierender Integrierverstärker)	$y_a = -k_c \int_0^t \left(\sum_{i=1}^n c_i y_{ei} \right) dt + y_c$
	Rechenverstärker Operationsverstärker	$y_a = -V y_e$ $V \gg 1$
	Nichtlineares Rechenelement, allgemein	
	Funktionsgeber	$y_a = f(y_e)$
	Multiplizierer	$y_a = y_{e1} \cdot y_{e2}$
	Komparator (Vergleicher)	$y_a = y_{e1}$ für $y_{s1} + y_{s2} > 0$ $y_a = y_{e2}$ für $y_{s1} + y_{s2} < 0$

Bild 6 Symbole

7. Multiplizierer: Zur Multiplikation zweier zeitveränderlicher Größen.
8. Komparator: Zum Amplitudenvergleich zweier Eingangsgrößen und zur Ableitung logischer Entscheidungen.

Das Bild zeigt das Prinzip des Rechenverstärkers. Man versteht darunter einen speziellen Gleichspannungsverstärker, der u. a. folgende Anforderungen erfüllen muß:

1. Der Betrag der Verstärkung soll theoretisch unendlich groß sein.
2. Der Phasenwinkel zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung soll für alle Frequenzen genau 180° betragen.
3. Im Verstärker dürfen keine unkontrollierten Spannungsschwankungen und Störspannungen (z. B. Rauschen und Drift) auftreten.

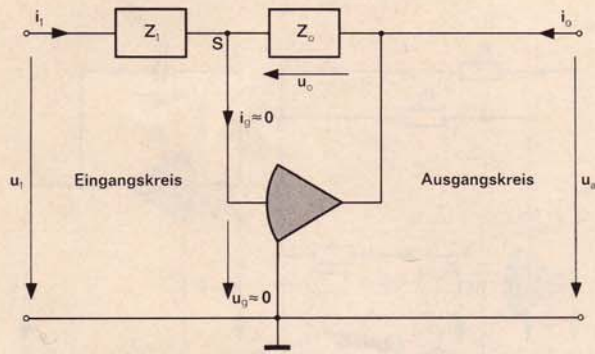


Bild 7 Rechenverstärker mit Impedanzen

Da die Beziehung $u_g = -\frac{u_a}{V}$ gilt und bei starker Rückkopplung $u_g \rightarrow 0$ für $V \rightarrow \infty$ muß auch gelten $i_g = 0$, d. h. der Strom am Verstärkereingang muß Null sein.

Der Rechenverstärker ist stets wesentlicher Bestandteil der Rechenelemente Summierer, Integrierer und Funktionsgeber. Zu diesem Zweck ist er im Eingang und der Rückführung mit Netzwerken beschaltet. Vom Charakter dieser Netzwerke, im vorliegenden Fall der Impedanzen Z_0 und Z_1 , hängt es ab, welche Rechenoperation durchführbar ist.

Die Aufgabe des Rechenverstärkers besteht darin, eine Rückwirkung der Ausgangsgröße auf die Eingangsgröße zu verhindern. Die Entkopplung von Eingangskreis und Ausgangskreis wird dabei durch die Tatsache bewirkt, daß infolge der hohen Verstärkung und der Rückführung der Ausgangsgröße auf den Verstärkereingang der Punkt S auf Nullpotential liegt. Die Kopplung besteht nur darin, daß nach der Kirchhoffschen Maschenregel für $u_g = 0$, $u_a = u_0$ ist und wegen $i_g = 0$ entsprechend $i_0 = -i_1$, Eingangskreis und Ausgangskreis vom gleichen Strom durchflossen werden.

Für eine der Impedanzen wählt man im allgemeinen einen linearen ohmschen Widerstand, so daß im betreffenden Kreis Strom und Spannung proportional sind.

Die zweite Impedanz wird entsprechend der gewünschten mathematischen Beziehung zwischen Eingangskreis und Ausgangskreis gewählt.

Bild 8 Prinzipschaltung des Summierers

Das Bild zeigt die Schaltung des Rechenverstärkers als Summierer. Alle Impedanzen sind durch Ohmsche Widerstände ersetzt. Da am Punkt S (Bild 7) Nullpotential liegt, läßt sich auf S die Kirchhoffsche Knotenregel anwenden

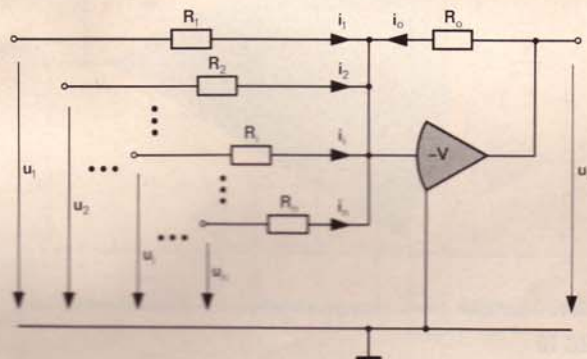
$$i_1 + i_2 \dots + i_n = -i_0$$

Nach dem Ohmschen Gesetz gilt für diese Ströme (da $u_g = 0$ gesetzt)

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_n}{R_n} = -\frac{u_a}{R_0}$$

und hieraus

$$u_a = -\left(\frac{R_0}{R_1} u_1 + \frac{R_0}{R_2} u_2 + \dots + \frac{R_0}{R_n} u_n\right)$$

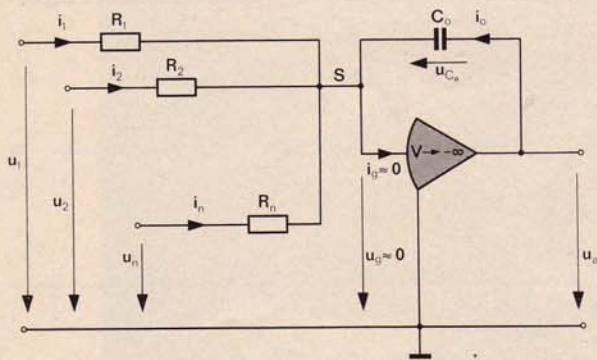


Prinzipschaltung des Summierers

Bild 8

Die Schaltung multipliziert also die verschiedenen Eingangsspannungen u_i mit festen Faktoren $c_i = R_0/R_i$ und bildet anschließend die Summe.

In der Praxis gibt man jedem Summierer einige Eingänge 1, d. h. Eingangswiderstand = Rückführungswiderstand, und einige Eingänge 10, d. h. Eingangswiderstand = $1/10$ Rückführungswiderstand.



Prinzipschaltung des Integrierers

Bild 9

Bild 9

Prinzipschaltung des Integrierers.

Wir erhalten anstelle eines Summierers einen Integrierer, wenn der Widerstand R_0 in der Rückführung durch einen Kondensator C_0 ersetzt wird. Während alle Gleichungen für den Eingangskreis weitergelten, gilt für i_0 jetzt das Ladungsgesetz

$$i_0 = C_0 \frac{du_c}{dt}$$

(d. h. die gespeicherte Ladungsmenge im Kondensator ist gleich dem Integral des Zuflusses).

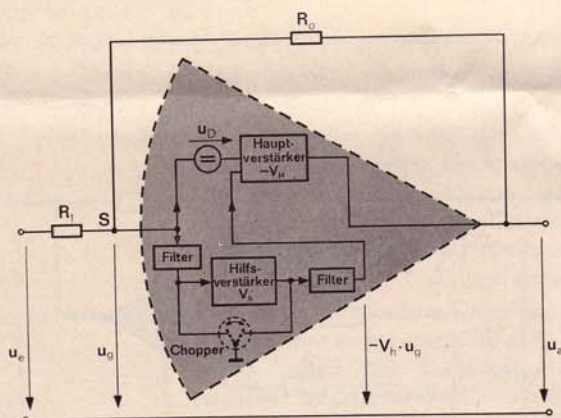
Da in S wieder $i_1 + i_2 + \dots + i_n = -i_0$ angenommen werden kann, erhalten wir

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_n}{R_n} = -C_0 \frac{du_c}{dt^*}$$

Wegen $u_a = u_c$ kann man schreiben

$$u_a(t^*) = u_{a0} - \left[\frac{1}{R_1 C_0} \int u_1 dt^* + \frac{1}{R_2 C_0} \int u_2 dt^* + \dots + \frac{1}{R_n C_0} \int u_n dt^* + \right]$$

Der Integrierer bildet also das zeitliche Integral der Eingangsspannungen und gleichzeitig ihre Summe. u_{a0} ist die Ausgangsspannung zum Zeitpunkt $t^* = 0$, d. h. eine Anfangsladung des Kondensators C_0 bei Rechenbeginn. Die Faktoren $\frac{1}{R_i C_0} = k_i$ stellen eine Konstante dar (Dimension sec^{-1}), welche die Geschwindigkeit der Integration angibt.



Blockschaltbild eines chopperstabilisierten Rechenverstärkers

Bild 10

Bild 10 Blockschaltbild eines chopperstabilisierten Rechenverstärkers.

Das Prinzip der sog. Chopperstabilisierung ermöglicht bis zu einer gewissen Grenze die Einhaltung der Forderung nach Vermeidung unkontrollierter Spannungsschwankungen und Störspannungen im Rechenverstärker.

Wie bei jedem Gleichspannungsverstärker wirken sich Schwankungen der Umgebungstemperatur und der Versorgungsspannungen unmittelbar auf die Ausgangsspannung aus.

Die Störspannungen machen sich besonders unangenehm beim Integrierer bemerkbar, da sie dort über der Zeit aufintegriert werden und die sog. Drift (d. h. Wanderung des Nullpunktes) verursachen.

Im Ersatzbild verlegt man die Störungen in eine Störspannungsquelle u_D am Verstärkereingang. Ein chopperstabilisierter Rechenverstärker besteht aus einem Hauptverstärker (Gleichspannungsverstärker, $V_H \approx 10^5$) und einem Hilfsverstärker (Wechselspannungsverstärker, $V_h \approx 10^3$). Ein Chopperrelais, d. h. ein mechanischer Zerkhacker, erzeugt aus der Gitterspannung u_g eine Wechselspannung, die im Hilfsverstärker verstärkt und anschließend u. U. durch dasselbe Chopperrelais wieder gleichgerichtet wird, wobei das Vorzeichen wechselt.

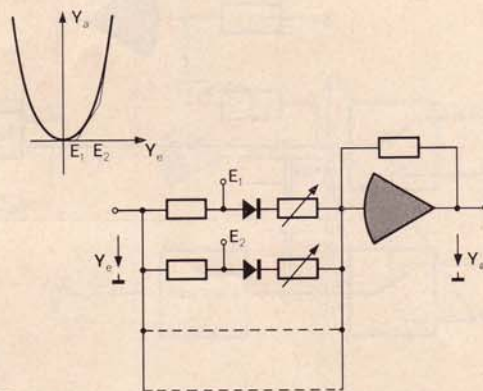
Der Hauptverstärker verstärkt in einer Differenzstufe die Differenz der Eingangsspannungen ($u_g - u_D$) und ($-V_h u_g$). Dadurch wird die Nullpunktfehlerspannung auf den Wert $\frac{u_D}{1 + V_h}$ herabgesetzt. Gleichzeitig multiplizieren sich die Verstärkungsfaktoren der Gesamtanordnung, so daß die Gleichspannungsverstärkung um V_h höher liegt, als bei nichtstabilisierten Verstärkern.

Nach außen hin wirkt die Anordnung aus Haupt- und Hilfsverstärker bzw. Chopperrelais wie ein Verstärker und wird auch in einem Verstärkersymbol dargestellt.

Bild 11

Nichtlineares Netzwerk

Zur Erzeugung nichtlinearer stetiger und unstetiger Funktionen verwendet man ein Approximationsprinzip, bei dem die Funktion stückweise durch einen Polygonzug angenähert wird. Hierfür bieten sich Dioden an, bei denen bekanntlich der Durchlaßeinsatzpunkt (bzw. Knickpunkt der Kennlinie) durch eine geeignete Vorspannung verschoben und die Kennliniensteigung mittels eines Vorwiderstandes verändert werden kann. Auf diese Weise lassen sich die Einzel-Kennlinien eines Dioden-Netzwerkes zu einer resultierenden Gesamtkennlinie aneinanderreihen, wobei die Genauigkeit der Approximation durch die Anzahl der verwendeten Dioden bestimmt wird. Das Bild zeigt die Schaltung eines Diodennetzwerkes am Eingang eines Verstärkers, mit dem die näherungsweise Darstellung eines Parabelastes erreicht wird. In diesem Fall sind E_1 und E_2 negative Vorspannungen. An den Trimpotentiometern werden die Kennliniensteigungen eingestellt.



Nichtlineares Netzwerk

Bild 11

Bild 12 Prinzipschaltung Parabel-Multiplizierer

Bild 12 zeigt die Prinzipschaltung eines sog. Parabel-Multiplizierers. Da es in der Physik direkt keine für Analogrechner bezüglich Aufwand und Genauigkeit realisierbaren Multiplikationsprinzipien gibt, erreicht man die Multiplikation auf 3 verschiedenen Arten durch die Ausnutzung von Hilfsbeziehungen bzw. Kunstschaltungen.

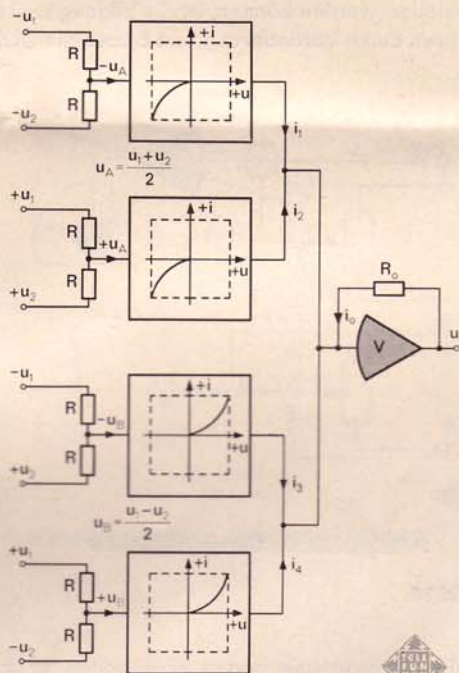
Der Parabel-Multiplizierer arbeitet nach dem Zwei-Parabel-Verfahren, dem die algebraische Beziehung

$$y_1 y_2 = \left(\frac{y_1 + y_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{y_1 - y_2}{2} \right)^2$$

zugrunde liegt.

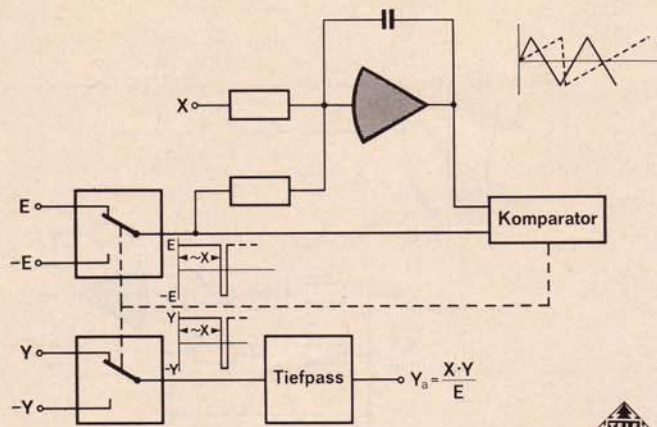
Dadurch wird die Multiplikation auf eine Summen- und Differenzbildung sowie eine anschließende Quadrierung zurückgeführt. Die Quadrierung läßt sich dabei über eine quadratische Stromspannungskennlinie (also eine Parabel) realisieren, die man nach dem in Bild 11 beschriebenen Verfahren als Polygonzug mittels vorgespannter Dioden erzeugt.

Dem Parabel-Multiplizierer müssen die beiden Eingangsgrößen (d. h. die Eingangsspannungen u_1 und u_2) jeweils mit beiden Polaritäten eingegeben werden. Ein Widerstandsnetzwerk sorgt für die Summen- und Differenzbildung, die Quadratbildung erfolgt über die Parabeläste. Die Ausgangsspannung $u_a = R_0 i_0 = -R_0 (i_1 + i_2 + i_3 + i_4)$ des die Teilspannungen aufsummierenden Rechenverstärkers erfüllt danach die Beziehung $U_a = U_1 U_2$. Die Genauigkeit der Multiplikation hängt sehr stark von der Genauigkeit der Parabelapproximation, d. h. dem technischen Aufwand ab, erreicht jedoch natürliche Grenzen durch die Schwankungen der hier ausgenutzten Dioden-Eigenschaften.



Prinzipschaltung Parabel-Multiplizierer

Bild 12



Prinzipanschaltung Time-Division-Multiplizierer

Bild 13

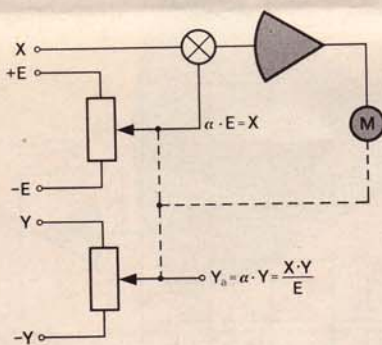
zugehörigen Komparator am Integrierausgang die Umschaltspannung erreicht wird, dieser umklappt und über seinen Relaiskontakt die am Integrierer anliegende Spannung umpolt. Es entsteht also eine symmetrische Dreiecksspannung am Integrierausgang bzw. eine symmetrische Rechteckspannung am Eingang. Wird x von Null verschieden, so steigt die Integrierausgangsspannung in einer Polarität schneller an als in der anderen, es entsteht eine unsymmetrische Dreiecksspannung, die eine entsprechende Modulation der Rechteckspannung zur Folge hat, deren Impulsbreite stets der Amplitude der Eingangsvariablen x proportional ist. Der Mittelwert der Impulsfolge entspricht damit dem Wert der Eingangsspannung x . Den Modulations-Multiplizierer erhält man dadurch, daß der Komparator zumindest einen weiteren Schalter antreibt, an dessen Klemmen die zweite Variable y mit beiden Polaritäten liegt. Während also die Umschaltung entsprechend dem Amplitudenverhalten von x erfolgt, wird die Impulshöhe durch die Variable y bestimmt. Durch eine Mittelwertbildung hinter diesem Schalter erhält man direkt das Produkt $y_a = \frac{x \cdot y}{E}$. Da von einem Komparator weitere Schalter angesteuert werden können, ist die Bildung weiterer Produkte mit der Variablen x möglich. Ebenso läßt dieses Verfahren durch Veränderung von E auch die Division zu.

Bild 13 Prinzipschaltung Time-Division-Multiplizierer

Ein anderes Multiplikationsverfahren wird im Falle des Modulations- oder Time-Division-Multiplizierers angewandt. Es handelt sich um eine sog. Pulshöhen-Pulsbreiten-Modulation, bei der die Impulshöhe der einen und die Impulsbreite der anderen Variablen proportional ist. Die Impulsfläche ist dann ein Maß für das Produkt beider Variablen.

Das Ausführungsprinzip zeigt unser Bild.

Die Impulsbreite wird in Abhängigkeit von der Eingangsgröße x erzeugt. Solange $x = 0$ ist, wird je nach Stellung eines Komparatorschalters die Maschineneinheit $+E$ oder $-E$ durch den Integrierer linear aufintegriert, bis für den



Prinzipanschaltung Servomultiplizierer

Bild 14

Differenzspannung gegen Null gehen zu lassen, was den Stillstand des Motors bedeutet. Im Stillstand gilt

$$x - \alpha E = 0 \quad \text{d. h.} \quad \alpha = \frac{x}{E}$$

Bei langsamen Änderungen von x führt der Motor den Schleifer des Potentiometers stets so nach, daß diese Bedingung erhalten bleibt.

Läßt man jetzt durch den Motor die Schleifer weiterer Potentiometer antreiben (in Praxis sitzen diese mit auf der Motorwelle) und legt an deren Anschlüsse Spannungen $y(t)$, so entsteht am Schleifer jeweils eine Spannung $y_a = \alpha y = \frac{x \cdot y}{E}$, die dem Produkt beider Eingangsvariablen entspricht. Die Multiplikation ist ebenfalls in allen 4 Quadranten möglich.

Bild 14 Prinzipschaltung Servomultiplizierer

Das dritte Multiplizier-Verfahren kann mit Hilfe eines sog. Servo-Multiplizierers durchgeführt werden. Dabei wird von der Tatsache ausgegangen, daß man mit Hilfe eines Potentiometers eine zeitveränderliche Spannung mit einer Konstanten multiplizieren kann, bei einer Potentiometerverstellung entsprechend einem vorgegebenen Funktionsverlauf auch eine Produktbildung $u_a(t) = \alpha(t) \cdot u_e(t)$ möglich ist. Beim Servo-Multiplizierer geschieht die Potentiometerverstellung automatisch über eine Nachlaufregelung, bei der die Differenz der Eingangsspannung x und einer Spannung $\alpha \cdot E$ gebildet, in einem Verstärker verstärkt und zum Antrieb eines Motors verwendet wird. Da der Motor das sog. Nachlaufpotentiometer antreibt, wird der Vorgang stets in der Richtung wirken, die

Bild 15

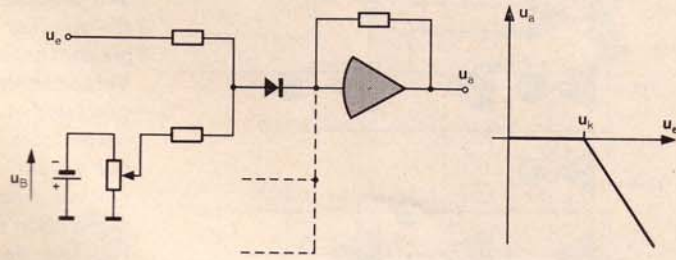
Erzeugung einer Knickkennlinie

Funktionsgeber sollen die Approximation vorgegebener Kurven ermöglichen und damit die Nachbildung beliebiger Funktionen der abhängigen Variablen (d. h. der Rechenspannungen) gestatten. Am meisten verbreitet ist der Diodenfunktionsgeber, bei dem eine gegebene Funktion durch einen Polygonzug aus etwa 10 ÷ 20 Geradensegmenten angenähert wird.

Dafür werden Netzwerke aus vorgespannten Dioden verwendet, wie sie schon beim Parabel-Multiplizierer beschrieben wurden.

Dabei gibt es die Möglichkeit, die Abszissen der Knickpunkte durch feste Vorspannungen festzulegen und durch veränderbare Vorwiderstände den Dioden-Durchlaßwiderstand und damit die Steigung der Kennlinien in gewissen Grenzen zu variieren. Zusätzlich kann man auch die Vorspannungen variabel machen und damit eine Verschiebung der Knickpunkte erreichen, wie unser Bild als Beispiel zeigt.

Bei transistorisierten Geräten, bei denen meist 20 Geradensegmente zur Approximation verfügbar sind, verzichtet man häufig auf die Verschiebbarkeit der Knickpunkte.



Erzeugung einer Knickkennlinie

Bild 15

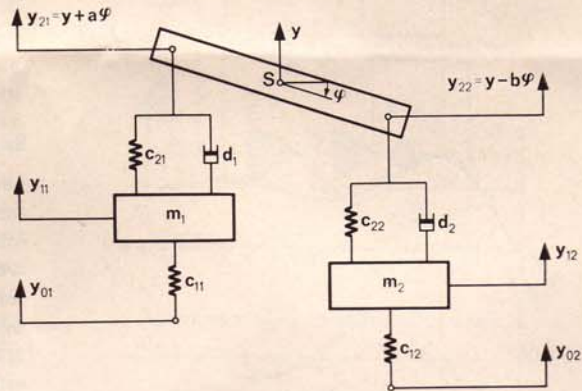
Bild 16

Vereinfachtes Modell einer Automobil-Federung

Das Bild stellt das einfachste Modell der Federung eines zweiachsigen Fahrzeuges dar (System mit 2 Freiheitsgraden).

Darin bedeuten m_1 und m_2 die Massen von Vorder- und Hinterachse einschließlich der Räder und die x_{ij} Schwingwege, welche von den beteiligten Massen aufgrund des dynamischen Verhaltens der koppelnden Federn und Dämpfer bei einer Anregung zurückgelegt werden. Vorder- und Hinterachse sind über die Luftreifen, welche durch eine Feder mit Federkonstante c_{11}/c_{12} nachgebildet sind, mit den Angriffspunkten der resultierenden äußeren Kräfte (d. h. dem Boden) verbunden. Gegen den Wagenaufbau (mit

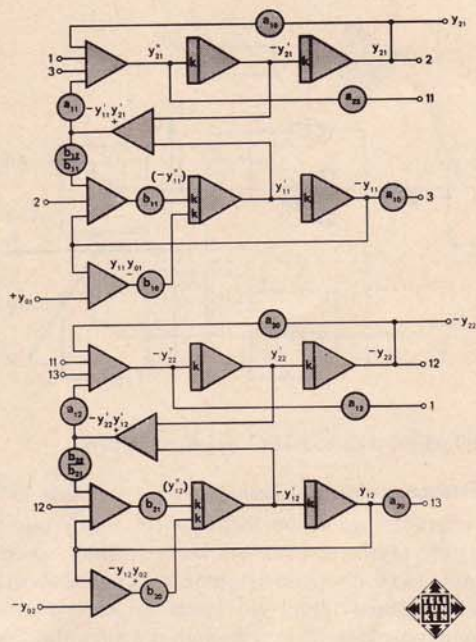
Schwerpunkt S) stützen sie sich durch Federn (Federkonstante c_{21}/c_{22}) und parallele Stoßdämpfer (Dämpferkonstante d_1/d_2) ab. Der Wagenaufbau erfährt bei Einführung einer Störgröße y_{01} bzw. y_{02} eine resultierende Bewegung, die durch den Aufbauhub y_{21} bzw. y_{22} und den Nickwinkel φ beschrieben wird. Die Störgrößen sind in diesem Fall Straßenunebenheiten, die als einmalig auftretende Störung (z. B. durch eine Sprungfunktion), oder als Nachbildung eines Straßenoberflächenprofils auf einem Funktionsgeber (bzw. durch Eingabe eines über geeignete Meßmittel auf Magnetband aufgenommenen Störungsverlaufes der Straße oder durch rein statistische Anregung aus einem sog. Rauschgenerator) in die Rechenschaltung eingeführt werden.



Vereinfachtes Modell einer Automobil-Federung



Bild 16



Rechenschaltung für eine Automobil-Federung

Bild 17

Stoßdämpfer) repräsentieren, wird sofort in einer Veränderung der Lösungskurven Ausdruck finden. Es läßt sich also in kürzester Zeit sowohl qualitativ als auch quantitativ das Verhalten eines Systems überblicken, wodurch praktische Konstruktionsdaten gewonnen werden können, ohne kostspielige, zeitraubende und u. U. auch gefährliche Experimente oder Modellversuche durchführen zu müssen.

Rechenschaltung für eine Automobil-Federung

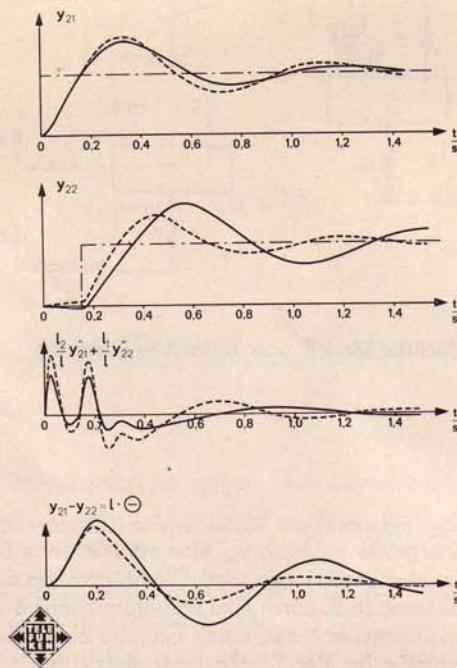
Bild 17 zeigt die Rechenschaltung eines solchen mechanischen Schwingers mit 2 Freiheitsgraden der Bewegung. Wir erkennen die bisher beschriebenen Rechenelemente, die zu einer Lösungsschaltung für genau das Differentialgleichungssystem verbunden sind, welches das dynamische Verhalten des Modells aus Bild 16 beschreibt. Die Störungen werden an den Punkten y_{01} und y_{02} in das System eingeführt. Den Bewegungsverlauf der Punkte y_{ij} , also der der Vorder- und Hinterachsen sowie ihrer Angriffspunkte am Wagenaufbau können als in Abhängigkeit von den Störgrößen variierende Gleichspannungen an bestimmten Punkten der Rechenschaltung abgenommen und auf einem Oszillographen oder Schreiber sichtbar gemacht werden. Durch eine geringe Schaltungserweiterung läßt sich auch eine dem Nickwinkel φ proportionale Gleichspannung gewinnen. Falls genügend Rechenelemente zur Verfügung stehen, kann die Schaltung durch Einführung weiterer federnder und dämpfender Modellelemente sowie u. U. auch durch Aufteilung des Systems auf vier Räder beliebig genau dem Originalfall angenähert werden.

Bei Betrachtung der Rechenschaltung wird der grundlegende Vorteil des Analogrechners bei der Behandlung von Ingenieurproblemen sichtbar. Eine Veränderung der Einstellung der Koeffizientenpotentiometer, die bestimmte Material- und Konstruktionskonstanten der beteiligten Modellelemente (hier Automobilfedern und

Bild 18 Einschwingverhalten eines Personenwagens

Unser Bild zeigt Lösungskurven für das betrachtete Automobil-Federungssystem, wie sie auch in der Praxis als Entwicklungs- und Konstruktionsgrundlage verwendet werden. Entsprechende Gleichspannungen, an bestimmten Stellen der Rechenschaltung abgenommen und auf einem Schreiber aufgezeichnet, geben direkt das Einschwingverhalten eines Kraftfahrzeuges wieder, das auf eine Schwelle auffährt (strichpunktierte Linie) und mit einer Person besetzt ist. Als Störung wirkt dabei eine Sprungfunktion zur Zeit $t_0 = 0$ auf die Vorderräder und verzögert zur Zeit $t_1 = 0,15$ s auf die Hinterräder. y_{21} zeigt das Einschwingverhalten des Wagenvorderteils; y_{22} das des Wagenhinterteils jeweils über den Achsen. Die gestrichelte Kurve zeigt das Verhalten bei Belastung mit 4 Personen. Die Kurven darunter zeigen die auftretenden Beschleunigungen des Aufbau-Schwerpunktes sowie den Nickwinkel, geben also Aussagen, die für die Beurteilung des Fahrempfindens außerordentlich wichtig sind.

Die Kurven sagen alles Wesentliche über die Federungseigenschaften des betrachteten Personenwagens aus. Die Untersuchung der Einflüsse von Parameteränderungen (Änderung der Feder- und Dämpferkennlinien, der Beladung, der äußeren Störungen) ist jetzt außerordentlich einfach.

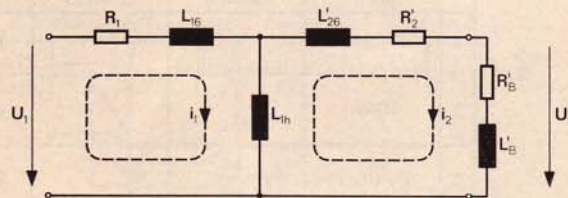


Einschwingverhalten eines Personenwagens

Bild 18

Bild 19 Differentialgleichungen eines Transformators

Eine Anwendung aus der Elektrotechnik wird anhand der Berechnung eines Transformators demonstriert, dessen Ersatzschaltbild dem Dia zu entnehmen ist. Darunter sind die Differentialgleichungen aufgestellt, die den zeitlichen Verlauf des Primär- und des Sekundärstromes (im vorliegenden Fall bei ohmisch-induktiver Last) beschreiben. Darin sind R_1 und R_2 die Wicklungswiderstände $L_{1\sigma}$ und $L'_{2\sigma}$ die Streuinduktivitäten und L_{1h} die Hauptinduktivität.



$$R_1 i_1 + (L_{1\sigma} + L_{1h}) \frac{di_1}{dt} - L_{1h} \frac{di_2}{dt} = U_1 \sin \omega_0$$

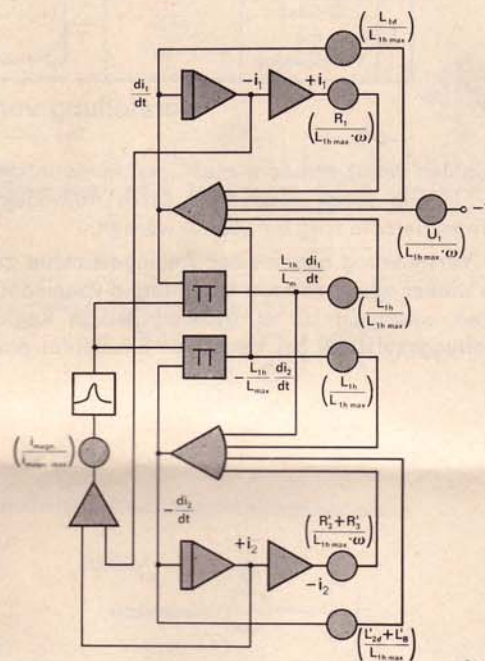
$$(R_2' + R_B') i_2 + (L_{2\sigma}' + L_{1h} + L_{2h}') \frac{di_2}{dt} - L_{1h} \frac{di_1}{dt} = 0$$

Differentialgleichungen eines Transformators

Bild 19

Bild 20 Rechenschaltung eines Transformators

Das Bild zeigt die zugehörige Rechenschaltung, aus der man den Lösungsaufbau für die beiden Differentialgleichungen und ihre Verkopplung entnehmen kann. Bei der Aufstellung der Rechenschaltung ist der Eisenkern des Transformators durch Einführung der Magnetisierungskennlinie des Eisen $L = f(i_{\text{mag.n.}})$ berücksichtigt, die aufgrund praktisch vorliegender Meßwerte an einem Funktionsgeber eingestellt wird. An den Potentiometern stehen die jeweils einstellbaren Koeffizienten, wodurch wiederum klar wird, daß sich die verschiedensten Transformatordimensionierungen durch eine einfache Änderung der Potentiometereinstellungen simulieren lassen. Auf diese Weise sind beliebige Parametervariationen in kürzester Zeit durchführbar und ihr Einfluß auf das Verhalten der Primär- und Sekundärströme bei verschiedenen Belastungen kann beobachtet bzw. registriert werden. Entsprechende Differentialgleichungen sind auch für die Betrachtung der Spannungen aufstellbar. Aus der Schreibung der Koeffizienten ist im übrigen das Prinzip der sog. Amplituden-Normierung ersichtlich. Dabei werden alle Größen auf ihren angenommenen Maximalwert bezogen, wodurch ihr Absolutwert ≤ 1 wird und es zu keiner Übersteuerung der Rechenverstärker durch Rechenspannungen $> |10 \text{ V}|$ (Maschineneinheit) kommen kann. Zusammen mit einer Zeitnormierung (Echtzeit, Zeitraffung, Zeitdehnung) bildet diese, auf dem Papier zu leistende Vorarbeit, neben der Aufstellung der eigentlichen Problemgleichungen die Hauptaufgabe des Programmierers.



Rechenschaltung eines Transformators

Bild 20

Bild 21 Darstellung von Regelungselementen

Einer der praktischen Ausgangspunkte der Analogrechentechnik ist die Regelungstechnik. Der Grund liegt darin, daß das Übertragungsverhalten der in der Praxis vorkommenden Reglertypen direkt dem Übertragungsverhalten einzelner Analog-Rechenelemente oder einer Kombination derselben entspricht.

Das Bild zeigt jeweils einen Reglertyp, die zugehörige Übertragungsfunktion, die Übergangsfunktion sowie deren Realisierung einmal durch normale Rechenelemente, zum anderen durch mit bestimmten Netzwerken beschaltete Verstärker.

Bei der Verwendung normaler, d. h. im Analogrechner für allgemeine Anwendungszwecke enthaltener Rechenelemente, läßt sich z. B. das PI-Verhalten durch Zusammenschaltung je eines Elementes mit P- bzw. I-Regelverhalten erreichen. Ein Verzögerungsglied entsteht durch einen rückgeführten Integrierer.

Ein anderes Prinzip liegt der Nachbildung eines D-Gliedes zugrunde, das sich in der Praxis nur durch Differentiation einer gemessenen Regelgröße gewinnen läßt. Da in einer Analogrechenschaltung meist nicht nur die

Nr.	Regelkreisglied	Übertragungsfunktion	Übergangsfunktion	Schaltung mit normalen Rechenelementen	Schaltung mit passiven Netzwerken
1	P-Glied	V			
2	I-Glied	$\frac{1}{pT_n}$			
3	PI-Glied	$V + \frac{1}{pT_n}$			
4a	Verzögerungsglied	$\frac{1}{1+pT}$			
4b					
5	Verzögerungsglied mit Vorhalt	$\frac{1+apT}{1+pT}$ $a < 1$			
6	D-Glied	pT_v			
7	D-Glied mit Verzögerung	$\frac{pT_v}{1+pT}$			

Darstellung von Regelungselementen

Bild 21

Variablen selbst, sondern auch ihre Ableitungen zur Verfügung stehen, läßt sich der D-Anteil in diesen Fällen am Eingang eines Integrierers durch Aufaddieren der Eingangsgrößen bilden. U. U. muß eine spezielle Differenzierschaltung aufgebaut werden.

Die Verwendung allgemeiner Analogelemente zur Nachbildung von Regelkreisgliedern hat den Vorteil, daß sich wieder alle Parameter unabhängig voneinander ändern lassen, so daß sowohl Regelstrecken in ihrem Verhalten untersucht als auch zweckmäßige Reglerdimensionierungen gefunden werden können. Geringeren Schaltungsaufwand bei Verlust an Flexibilität ermöglichen mit Netzwerken beschaltete Rechenverstärker.

Bild 22

Frischdampftemperaturregelung

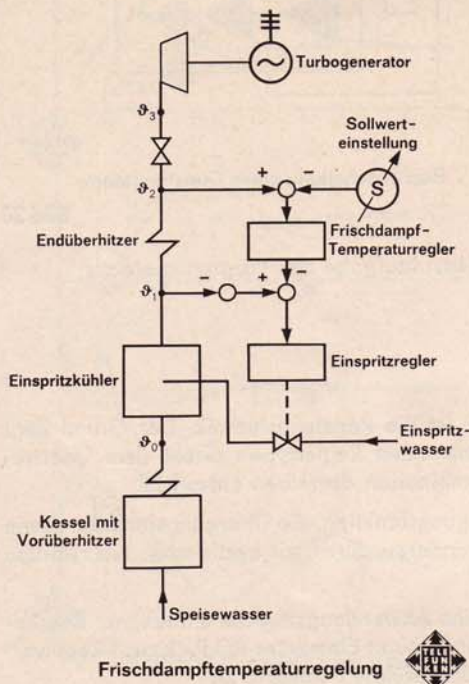
Eine Rechenschaltung läßt sich in vielen Fällen ohne Aufstellung von Differentialgleichungen und unter Umgehung der programmierten Grundoperationen Addition, Multiplikation, Integration direkt aus einem Blockschaltbild des zu untersuchenden Systems gewinnen. Offensichtlich bietet sich diese Möglichkeit in der Regelungstechnik an, wo Regelstrecken durch eine Folge von Funktionsblöcken und die Funktionsblöcke in ihren Eigenschaften durch analoge Rechenelemente beschreibbar sind.

Moderne Dampfturbinen werden zumeist mit hohen Frischdampftemperaturen gefahren. Ein wesentliches Überschreiten der von vornherein sehr hohen Sollwerttemperatur würde sehr schnell zur Beschädigung des Hochdruckteils der Turbine führen.

Die Kesselregelung ist i. a. zu träge, um bei Drosselung der Dampftemperatur die Wärmezufuhr schnell genug zu verringern. Man setzt daher zusätzlich einen Dampfkühler ein, der im Bedarfsfall die zu hohe Dampftemperatur heruntersetzt. Als Kühler hat sich der Einspritzkühler wegen seines schnellen Ansprechens besonders bewährt. Die erforderliche Temperaturregelung für ϑ_2 erfolgt durch Wassereinspritzung in den Einspritzkühler vor dem Endüberhitzer.

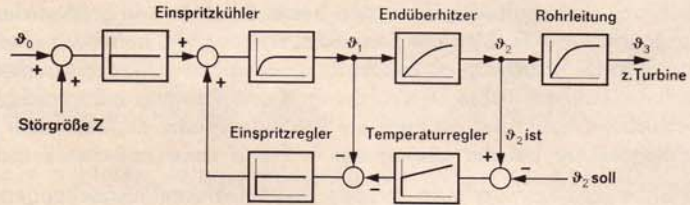
Für die Regelung der Temperatur wird bei diesem Beispiel eine Kaskadenregelung verwendet die aus Frischdampf-Temperaturregler und Einspritzregler besteht.

Aus dem Vergleich von $\vartheta_{2,ist}$ und $\vartheta_{2,soll}$ am Temperaturregler wird dabei die Eingabegröße für den Sollwert-Einsteller des von $-\vartheta_1$ gesteuerten Einspritzreglers abgeleitet.



Blockschaltbild Frischdampf-temperaturregelung

Das Blockschaltbild von Regelstrecke und Regler zeigt die Abbildung. Da die Übergangsfunktionen der beteiligten Elemente bekannt sind (durch Messung), läßt sich auch sofort eine Rechenschaltung angeben, welche das Verhalten der einzelnen Glieder der Regelstrecke beschreibt und eine Veränderung des Einspritzreglers gestattet, so daß sich Stabilitätsuntersuchungen am Modell vornehmen lassen.



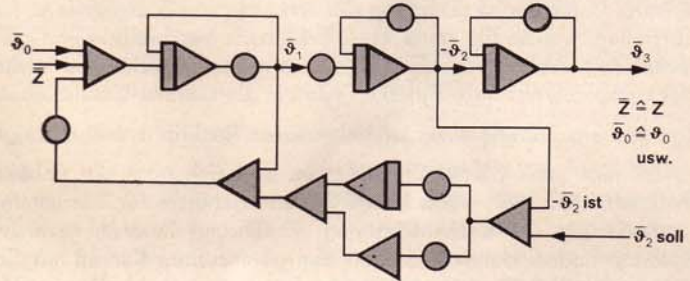
Blockschaltbild Frischdampf-temperaturregelung

Bild 23

Rechenschaltung Frischdampf-temperaturregelung

Diese vereinfachte Rechenschaltung zeigt das Bild. Wir erkennen die einzelnen Rechenschaltungen für PI-Regelung und Verzögerungsglieder, die zu einem Simulationsmodell verbunden sind.

Im Beispiel wird nochmals anschaulich deutlich, wie derartige Simulationen auf dem Analogrechner in der Praxis die Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines Systems und das Durchspielen aller Parameteränderungen vielfach überhaupt erst möglich machen und welcher relativ geringer Geräte-Aufwand erforderlich ist. Dabei lassen sich Ergebnisse gewinnen, die man auf andere Weise keinesfalls erhalten kann.



Rechenschaltung Frischdampf-temperaturregelung

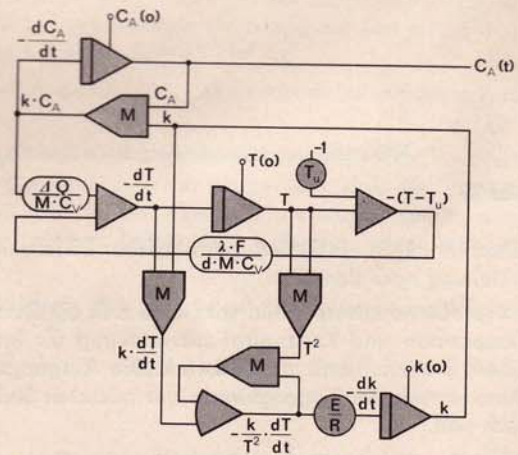
Bild 24

Rechenschaltung für eine unimolekulare Reaktion

Die chemische Verfahrenstechnik ist ein weiteres Gebiet, auf dem der Analogrechner sich mit Erfolg einsetzen läßt.

Einmal ist es die direkte Steuerung verfahrenstechnischer Herstellungsprozesse, bei der ein Analogrechner durch Verarbeitung anfallender Meßdaten unmittelbar die notwendigen Änderungen bestimmter Einflußgrößen errechnen und auch die erforderlichen Steuersignale zur Verfügung stellen kann. Das setzt voraus, daß man den Prozessmechanismus kennt und dieser in mathematischer Form beschreibbar ist.

In den meisten Fällen werden diese Kenntnisse jedoch nicht vorhanden



Rechenschaltung für eine unimolekulare Reaktion

Bild 25

sein. Um darüber hinaus verfahrenstechnische Prozesse überhaupt optimieren zu können, d. h. sie im Hinblick auf wirtschaftliche Ziele wie beste Qualität und größte Menge des Endprodukts, geringste Mengen der Ausgangsprodukte, kürzeste Prozeßdauer, geringste aufzuwendende Energien usw. vorher zu planen, war bislang ihre Untersuchung im Laboratoriums- und Technikumsversuch erforderlich. In neuerer Zeit ist immer mehr auch die mathematische Untersuchung in den Vordergrund gerückt, da sowohl das physikalische Verhalten der technischen Apparatur als auch die Reaktionskinetik mathematisch beschreibbar sind. Hier hilft ebenfalls ein Analogrechner bei der Lösung der in Praxis meist außerordentlich komplizierten Gleichungssysteme.

Zeitliche Reaktionsverläufe werden durch Differentialgleichungen für die Reaktionsgeschwindigkeit dC/dt beschrieben, wobei C die Konzentration eines an der Reaktion beteiligten Stoffes andeutet. Bei einer unimolekularen Reaktion ist diese Reaktionsgeschwindigkeit proportional der Stoffkonzentration

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A$$

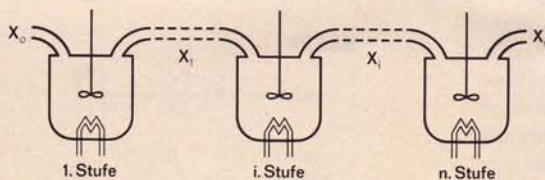
wobei das Minuszeichen auf eine Konzentrationsabnahme hinweist. Bei bimolekularen Reaktionen ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Konzentrationsänderung eines der beteiligten Stoffe proportional dem Produkt der Konzentrationen der beiden beteiligten Stoffe:

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A C_B$$

Die Konstante k ist ihrerseits nur unter völlig stationären Bedingungen eine Konstante und i. a. stark von Druck und Temperatur abhängig, also den Größen, die abgesehen von Einflüssen von Katalysatoren, die wesentlichen Parameter einer Prozeßbeeinflussung darstellen. Für die Temperaturabhängigkeit wird gewöhnlich die sog. Arrhenius-Gleichung angegeben, für die Druckabhängigkeit bringt man das Potenzgesetz in Ansatz. Unter Berücksichtigung der Massen- und Energiebilanz lassen sich also Differentialgleichungssysteme aufstellen, welche die reine Reaktionskinetik beschreiben und gleichzeitig alle Variablen enthalten, die beim technischen Prozeß variierbar sind. Das regelungstechnische Verhalten der technischen Apparatur läßt sich in der vorher bereits beschriebenen Form in die Gesamt-Simulation einbeziehen.

Die Rechenschaltung eines unimolekularen Reaktionsverlaufs zeigt unser Bild.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß sich auch die unbekannte Reaktionskinetik chemischer Prozesse u. U. ermitteln läßt, wenn lediglich Meßergebnisse für bestimmte Endzustände zur Verfügung stehen. Durch Veränderung der Rechenschaltung (Einführung innerer, reversiv verlaufender Reaktionen usw.) lassen sich Systeme finden, deren Lösungen den gemessenen Kurven möglichst genau entsprechen. Damit ist zwar nicht die direkte Übereinstimmung gesichert bewiesen, wohl aber das Vorhandensein eines entsprechenden Modells.



$$\frac{dX_i}{dt} = a_{11}k(T_i)X_i + a_{12}X_{i-1}$$

$$\frac{dT_i}{dt} = b_{11}k(T_i)X_i + b_{12}T_{i-1} + b_{13}(T_i - T_u)$$



Näherungsweise Berechnung eines Reaktionsverlaufs

Bild 26

Überführung in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen durch einen Differenzansatz für die partielle Ableitung nach dem Ort.

Entsprechend unserem Bild wird also z. B. ein Durchflußreaktor in Abschnitte eingeteilt, in denen jeweils die Temperatur- und Konzentrationsverteilung als homogen angenommen wird. Jeder Abschnitt entspricht also einem Durchflußtank mit Rührwerk. Die Ausgangswerte von Konzentration und Temperatur einer Stufe sind dann jeweils die Eingangswerte der nächsten Stufe, während die Differentialgleichungen aller Stufen identisch sind.

Damit braucht das Differentialgleichungssystem nur einmal auf dem Rechner geschaltet zu werden. Die gespeicherten Ausgangsgrößen (z. B. auf Magnetband) eines Rechenablaufs dienen dann als Eingangsgrößen für den nächsten Rechenabschnitt.

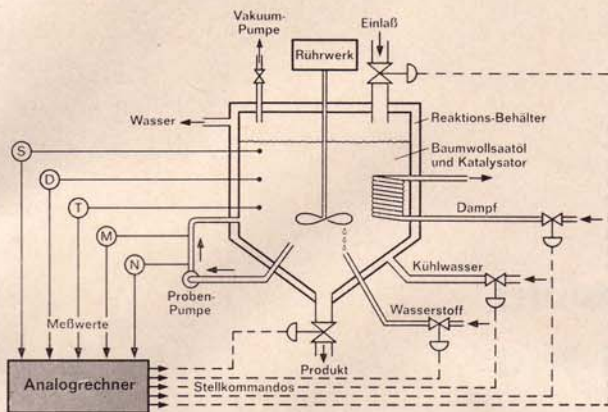
Bild 26 Näherungsweise Berechnung eines Reaktionsverlaufs

Häufig treten praktische Fälle auf, in denen der Ablauf der Reaktion nicht nur von der Zeit abhängt. So wird in einem technischen Reaktor der Reaktionsverlauf nicht nur von der Zeit, sondern auch vom Ort abhängig sein, d. h. es werden selten homogene Verhältnisse herrschen. Vorgänge, die von zwei unabhängigen Veränderlichen bestimmt werden, lassen sich jedoch nur durch partielle Differentialgleichungen beschreiben. Da der Analogrechner diese a priori nicht lösen kann, muß das gesamte System in so viele Abschnitte unterteilt werden, daß sich die Ortsabhängigkeit innerhalb der Teilsysteme wieder vernachlässigen läßt. Mathematisch gesprochen bedeutet das die

Durch das Verfahren des sog. iterativen Rechnens, bei dem innerhalb eines Rechners oder zwischen zwei Rechnern jeweils rechnende und speichernde Rechentakte nebeneinander herlaufen und durch entsprechende Steuerungen wechselweise aufeinander einwirken, lassen sich solche Gleichungssysteme auch ohne Zwischenschaltung eines externen Speichers bearbeiten.

Die Behandlung partieller Differentialgleichungen ist selbstverständlich nicht auf das Gebiet der Chemie beschränkt.

Die eingangs beschriebenen Rechner erlauben allgemein iterative Rechenabläufe, wobei das RA 800-Hybrid die notwendigen Speicher-Integrierer und Steuerungselemente von vornherein enthält. Ebenso läßt sie über eine Wechseltaktsteuerung zweier Tisch-Analogrechner zwischen Rechnen und Speichern ein abschnittsweises Rechnen durchführen.



Optimierung eines Hydrierprozesses



Bild 27

Bild 27 Optimierung eines Hydrierprozesses

Unser Bild beschreibt ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet des Einsatzes analoger Rechenelemente, die Steuerung und gleichzeitige Optimierung eines Prozesses. Dabei greift der Rechner direkt in das Prozeßgeschehen ein, wenn es sich um einen sog. on-line-Betrieb handelt, und die aus einer Meßwertverarbeitung abgeleiteten Stellwerte unmittelbar und ohne Einschaltung von Bedienungspersonal auf Regeleinrichtungen einwirken. Beim sog. off-line-Betrieb erhält der Rechner ebenfalls laufend Informationen über den Prozeßverlauf (also Angaben über Temperaturen, Drücke, Konzentrationen usw.) und verarbeitet sie nach bestimmten, programmierten Optimierungsregeln, jedoch geschieht die Prozeßsteuerung aufgrund der errechneten Daten von Hand.

In unserem Beispiel wird die Optimierung eines Prozesses zur Fetthärtung durch Hydrieren gezeigt, wie er bei der Margarineherstellung zur Anwendung kommt. Das Ausgangsprodukt Baumwollsaatöl besteht in der Hauptsache aus flüssigen Glyceriden, die durch Anlagerung von Wasserstoff in Fettsäuren mit höherem Schmelzpunkt umgewandelt werden müssen, um ein streichfähiges Fett zu erhalten.

Dazu wird Baumwollsaatöl mit Nickelpulver als Katalysator vermischt und in einem Autoklaven unter bestimmtem Druck und Temperatur der Einwirkung von Wasserstoff ausgesetzt.

Die Optimierung des Prozeßverlaufes wird im Hinblick auf eine möglichst kurze Prozeßdauer erfolgen.

Wegen der schwankenden Zusammensetzung des Ausgangsproduktes, der wechselnden Wirksamkeit des Katalysators usw. gibt es keine festen Werte für Druck und Temperatureinstellung, sondern es müssen ständig optimale Werte berechnet werden. Zu diesem Zweck programmiert man mathematische Zusammenhänge auf einem Analogrechner, gibt als Einflußgrößen die über Meßfühler gewonnenen Meßwerte ein und erhält analoge Stellkommandos, die über Umsetzer direkt in den Prozeß eingreifen.

Neben dem Vorteil einer kurzen Prozeßdauer sind gleichbleibende Qualität des Endprodukts und hohe Ausbeute die Vorteile eines automatisierten Prozeßverlaufes.

Mit den hier vorgetragenen Beispielen sind die Einsatzmöglichkeiten des Analogrechners noch bei weitem nicht erschöpfend behandelt. Zudem erschließen sich ständig neue Anwendungsgebiete, da die Vorteile des Analogrechners, die leichte Programmierung sowie das schnelle und übersichtliche Durcharbeiten aller Variationsmöglichkeiten zusammen mit dem vergleichsweise geringen technischen Aufwand immer mehr in das Bewußtsein der Praktiker eindringen.

Der Analogrechner ist auf dem besten Wege, zum Handwerkszeug des Ingenieurs und Wissenschaftlers zu werden.

Literaturangabe:

- 1) W. Giloi und R. Lauber Analogrechnen, Springer Verlag Berlin 1963
 - 2) W. Giloi Strukturbilder von Automobil-Federungssystemen und ihre Behandlung auf dem Analogrechner VDI-Zeitschrift, Heft 29, Oktober 1962
 - 3) W. Giloi Analogrechner in der chemischen Verfahrenstechnik, ETZ-A, Heft Januar 1963
- Die Bilder zu den Diapositiven 7, 8, 9, 10, 12, sind 1] mit freundlicher Genehmigung des Springer-Verlages entnommen.