



Tisch - Analogrechner

Beschreibung und Bedienungsanleitung

MV 2 460568

BROWN, BOVERI & CIE

Aktiengesellschaft

MANNHEIM

1. Grundsätzliche Wirkungsweise elektronischer Analogrechner.

1.1 Anwendungsbereich

Elektronische Analogrechner dienen zur Lösung von Differentialgleichungen oder Systemen von Differentialgleichungen, wobei die unabhängige Veränderliche im allgemeinen die Zeit ist.

Wie der Name Analogrechner besagt, werden die abhängigen Veränderlichen der Differentialgleichungen durch analoge Größen nachgebildet, beim elektronischen Analogrechner beispielsweise durch analoge elektrische Gleichspannungen. Eine auf dem Rechner hergestellte Rechenschaltung für ein bestimmtes Problem ist also nichts anderes als ein elektrisches Modell des untersuchten Systems, wobei die elektrischen Größen (Spannungen) des Modells den gleichen Gesetzmäßigkeiten (ausgedrückt durch Differentialgleichungen) gehorchen wie die Größen des untersuchten Systems.

Die Darstellung der Lösung erfolgt durch Spannungsmesser, Kathodenstrahloszillographen oder Schreibgeräte in Abhängigkeit von der Zeit. Besonders die beiden letzteren vermitteln dem Anwender einen sehr guten Einblick in die physikalischen Zusammenhänge, denen das System gehorcht. Hierin liegt einer der Hauptvorteile des Analogrechners gegenüber dem Digitalrechner, bei dem infolge der umfangreichen und komplizierten Programmierung und der Ausgabe der Ergebnisse in Zahlenwerten oft der unmittelbare Zusammenhang mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten verlorengeht.

Ein weiterer Vorteil des Analogrechners ist die schnelle und leichte Veränderbarkeit der Rechenkoeffizienten durch Verdrehen von Potentiometerknöpfen. Ist ein in seinen Grundzügen gegebenes System (beispielsweise das Federungssystem eines Kraftwagens) optimal zu dimensionieren, so kann der Entwickler das Problem zunächst mit grob geschätzten Parametern auf dem Analogrechner programmieren und das Verhalten der interessierenden Größen (Auslenkung, Geschwindigkeit, Beschleunigung usw.) unter dem Einfluß verschiedener Störgrößen (Stöße infolge Unebenheit der Straße) am Oszillographen oder Schreiber studieren. Er kann dann in einfacher Weise die Parameter des Systems (Federkonstanten, Dämpfung usw.) variieren bis das angestrebte optimale Verhalten erreicht ist, wobei er immer das Verhalten der Systemgrößen auf dem Sichtgerät beobachten kann.

Auch das Einführen nichtlinearer Zusammenhänge (progressive Federung) wird durch sogenannte Funktionsgeneratoren in einfacher Weise möglich.

Durch die Wahl eines geeigneten Zeitmaßstabes können in Wirklichkeit sehr langsam verlaufende Vorgänge (z.B. Regelvorgänge in der Verfahrenstechnik) auf dem Analogrechner schneller bzw. sehr schnell verlaufende Vorgänge (beispielsweise elektronische Regelvorgänge) langsamer dargestellt werden. Damit kann bei der Untersuchung sehr langsamer Vorgänge sehr viel Zeit gespart werden, während sehr schnell verlaufende Vorgänge so langsam dargestellt werden können, daß sie bequem auf dem Sichtgerät beobachtet werden können.

Mit diesen Eigenschaften ist der Analogrechner ein ideales Hilfsmittel für Forschung, Projektierung und Ausbildung.

1.2 Grundoperationen

1.21 Rechenverstärker

Das wichtigste Element eines elektronischen Analogrechners ist der Rechenverstärker oder Operationsverstärker. Es ist dies ein Gleichstromverstärker, der am Ausgang eine zwischen einem negativen und einem positiven Höchstwert kontinuierlich veränderliche Gleichspannung, die sogenannte Rechenspannung, liefert, wenn im Eingang ein Gleichstrom der jeweils entgegengesetzten Polarität zugeführt wird. Bild 1 zeigt die Steuerkennlinie und das Ersatzschaltbild des Verstärkers.

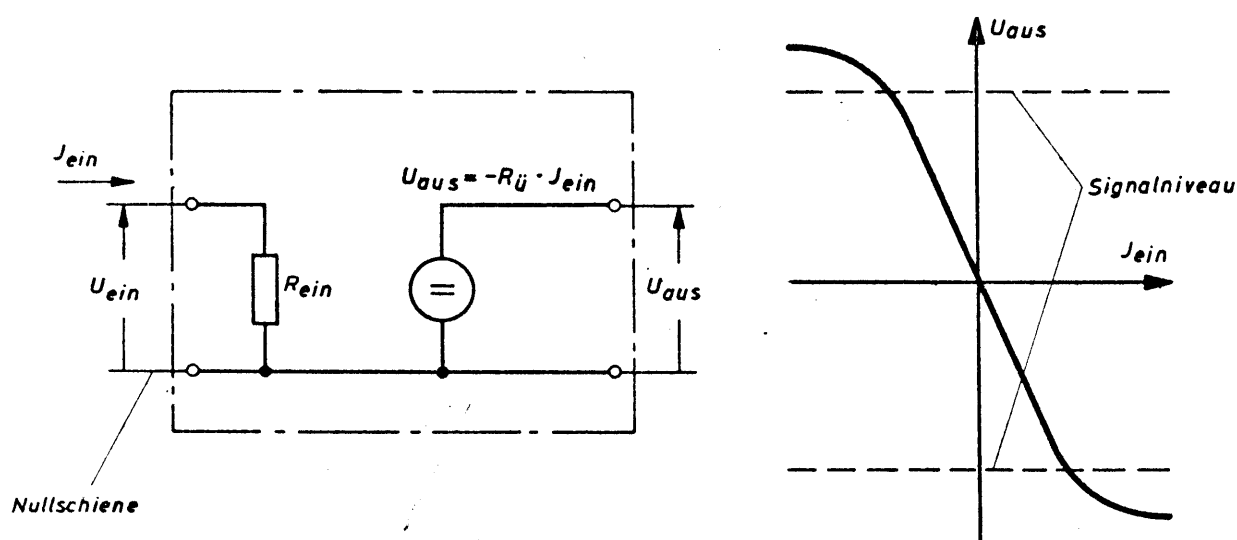


Bild 1: Ersatzschaltbild und Steuerkennlinie
eines Rechenverstärkers.

Die Verstärkung, ausgedrückt durch den Übertragungswiderstand

$$R_0 = - \frac{U_{\text{aus}}}{I_{\text{ein}}} \quad (1)$$

ist bei einem solchen Rechenverstärker sehr groß. Das bedeutet, daß bereits ein winziger Eingangsstrom genügt, um den Verstärker von Null bis zu seiner vollen Ausgangsspannung auszusteuern. Der Eingangswiderstand R_{ein} des Verstärkers ist ebenfalls klein, so daß der zur Aussteuerung erforderliche Eingangsstrom nur einen gegenüber der vollen Ausgangsspannung verschwindend kleinen Spannungsabfall verursacht. Die Eingangsspannung U_{ein} des Verstärkers ist also in jedem Fall annähernd Null. Jeder Rechenverstärker hat eine durchgehende Nullschiene, auf die Eingangs- und Ausgangsspannung bezogen sind. In einem Analogrechner sind die Nullschienen aller Rechenelemente zu einer gemeinsamen Nullschiene verbunden, gegen die alle Spannungen gemessen werden.

Der Ausgangswiderstand eines Rechenverstärkers ist gering und daher im Ersatzschaltbild nicht eingezeichnet.

Der höchste von der Ausgangsspannung des Verstärkers mit Sicherheit in beiden Richtungen erreichbare Wert wird mit Signalniveau oder 100 % Rechenspannung bezeichnet. Bei Röhrenverstärkern liegt dieses Niveau im allgemeinen bei ± 100 V, während bei Transistorverstärkern Werte von ± 10 V oder ± 15 V üblich sind.

Wie man aus der Kennlinie in Bild 1 erkennt, ist die Ausgangsspannung in ihrer Polarität dem Eingangsstrom entgegengerichtet, d.h. bei positivem Eingangsstrom stellt sich eine negative Ausgangsspannung ein. Diese Vorzeichenumkehr ist für die folgenden Rechenschaltungen von besonderer Wichtigkeit.

Durch äußere Beschaltung mit Widerständen und Kondensatoren kann man nun mit Hilfe eines solchen Verstärkers die verschiedensten Rechenoperationen durchführen.

1.22 Summation

Bild 2 zeigt einen Rechenverstärker, der durch Beschaltung mit ohmschen Widerständen in der Lage ist, eine Addition bzw. Subtraktion verschiedener Rechenspannungen durchzuführen. Der Rechenverstärker wird üblicherweise durch ein Dreieck dargestellt, dessen Spitze in Richtung der Verstärkung, d.h. zum Ausgang hin zeigt. Wie schon erwähnt, haben sämtliche Rechenelemente eine gemeinsame Nullschiene als Bezugspunkt für alle Rechenspannungen. Es ist daher nicht erforderlich und auch nicht üblich, diese Nullschiene mitzuzeichnen, wenn man allgemein festlegt, daß alle Spannungen, in Bild 2 also $U_1 \dots U_5$ und U_{aus} , gegen die Nullschiene zu messen sind.

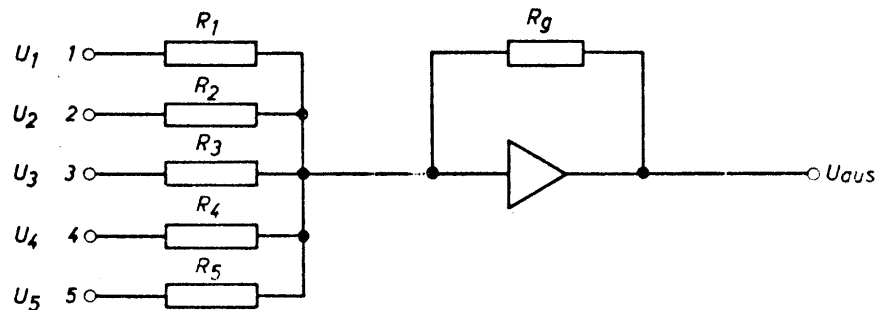


Bild 2: Addition und Subtraktion mit einem Rechenverstärker.

Legt man beispielsweise an den Eingang 1 eine positive Spannung U_1 , so fließt über den Widerstand R_1 ein Strom, der bewirkt, daß der Verstärker in negativer Richtung angesteuert wird. Die negative Ausgangsspannung U_{aus} treibt über den Gegenkopplungswiderstand R_g sofort einen entgegengesetzten Strom, der bemüht ist, den Verstärker in umgekehrter Richtung auszusteuern. Setzt man voraus, daß der erforderliche Eingangsstrom des Verstärkers verschwindend klein gegen die über R_1 bzw. R_g fließenden Ströme und daß die Eingangsspannung direkt am Verstärker ebenfalls sehr klein ist, so stellt sich ein Gleichgewichtszustand entsprechend Formel (2) ein.

$$\frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_{aus}}{R_g} \quad (2)$$

Ist $R_1 = R_g$, so ist $U_{aus} = -U_1$, d.h. wir haben einen Umkehrverstärker mit der Verstärkung 1 vor uns.

Macht man R_g zehnmal so groß wie R_1 , so ist $-U_{\text{aus}} = 10 \cdot U_1$; wir erhalten also einen Umkehrverstärker mit der Verstärkung 10, können also eine Rechenspannung mit dem konstanten Faktor 10 multiplizieren. Legt man nun an einen oder mehrere der restlichen Eingänge 2 ... 5 ebenfalls Gleichspannungen $U_2 \dots U_5$, so ergibt sich aus der Forderung, daß der in den Verstärker fließende Strom annähernd Null ist.

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_5}{R_5} = - \frac{U_{aus}}{R_g} \quad (3)$$

Für den Fall, daß alle Widerstände gleich sind ($R_1 = R_2 = \dots = R_5 = R_g$), so gilt

$$-U_{\text{aus}} = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 \quad (4)$$

Die Ausgangsspannung ist also gleich der Summe aller Eingangsspannungen; wir haben also eine Summationsschaltung vor uns:

Eine Subtraktion lässt sich in einfacher Weise erreichen, indem man die zu subtrahierende Rechenspannung dem Eingang mit umgekehrtem Vorzeichen zuführt.

Wählt man die Werte für R_4 und R_5 um den Faktor 10 kleiner als für R_1 , R_2 , R_3 und R_C , so erhält man zwei Eingänge, die gleichzeitig eine Multiplikation der beiden Rechenspannungen U_4 und U_5 mit dem konstanten Faktor 10 erlauben. Es gilt:

$$-U_{\text{aus}} = U_1 + U_2 + U_3 + 10 \cdot U_4 + 10 \cdot U_5 \quad (5)$$

Bild 3 zeigt die gebräuchliche vereinfachte Darstellung der in Bild 2 gezeigten Summations-schaltung.

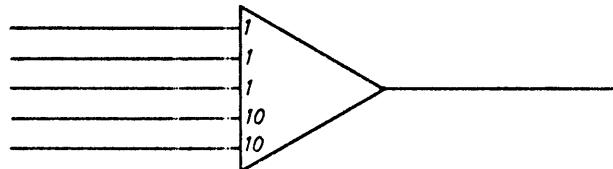


Bild 3: Kurzzeichen für einen Summierverstärker

Das Verstärkersymbol wurde beibehalten, während die einzelnen Widerstände nicht mehr gezeichnet werden. Die den einzelnen Eingängen zugeordneten Zahlen geben den Verstärkungsfaktor des betreffenden Eingangs an. Das in Bild 3 dargestellte Kurzzeichen entspricht also einem Verstärker, der die in Formel (5) angegebene Rechenoperation ausführt.

1.23 Integration

Bild 4 zeigt einen Rechenverstärker, der durch Beschaltung mit ohmschen Eingangswiderständen und einem Kondensator als Gegenkopplung in der Lage ist, eine Integration der Eingangsspannungen durchzuführen.

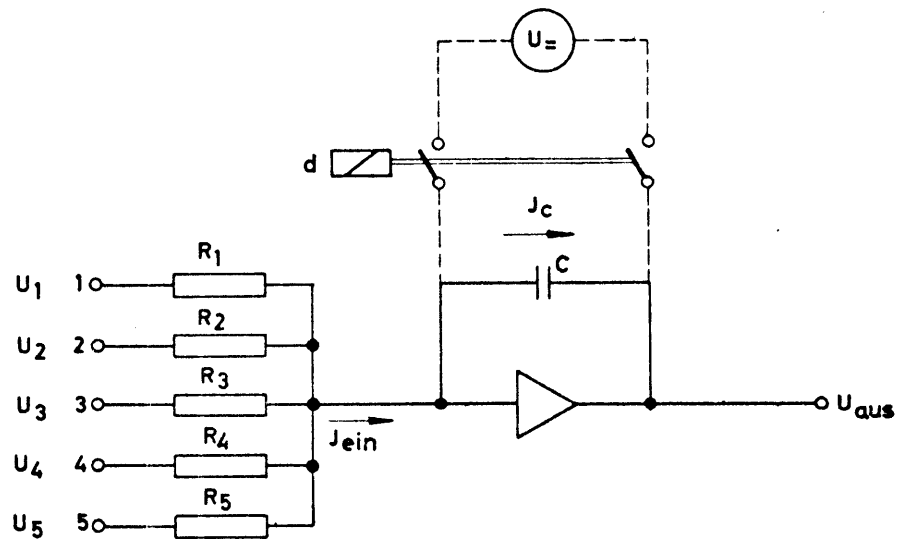


Bild 4: Integration mit einem Rechenverstärker.

Legt man an den Eingang 1 schlagartig eine positive Spannung U_1 , so fließt über den Widerstand R_1 ein Strom, der den Verstärker in negativer Richtung auszusteuern sucht. Eine schlagartige Erhöhung der Ausgangsspannung ist aber nicht möglich, da sonst ein sehr hoher Strom über den Kondensator C fließen würde, der den Verstärker in entgegengesetzter Richtung aussteuern würde. Es stellt sich vielmehr ein Gleichgewichtszustand ein, der sich aus der Forderung ergibt, daß Eingangsstrom und Kondensatorstrom gleich sein müssen.

Es gilt:

$$I_{\text{ein}} = I_C \quad (6)$$

$$I_{\text{ein}} = \frac{U_1}{R_1} \quad (7)$$

$$I_C = -C \cdot \frac{d U_{\text{aus}}}{dt} \quad (8)$$

also

$$- \frac{d U_{\text{aus}}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{U_1}{R_1} \quad (9)$$

Durch Integration beider Seiten erhält man

$$- U_{\text{aus}} = \frac{1}{C \cdot R_1} \int U_1 \cdot dt + K \quad (10)$$

Die Ausgangsspannung des Verstärkers stellt also das zeitliche Integral der Eingangsspannung dar. Der Faktor $C \cdot R_1$ ist die Integrierzeit. Sie gibt an, in welcher Zeit die Ausgangsspannung den Wert der Eingangsspannung erreicht, nachdem diese sprungartig zugeschaltet wurde (siehe Bild 5).

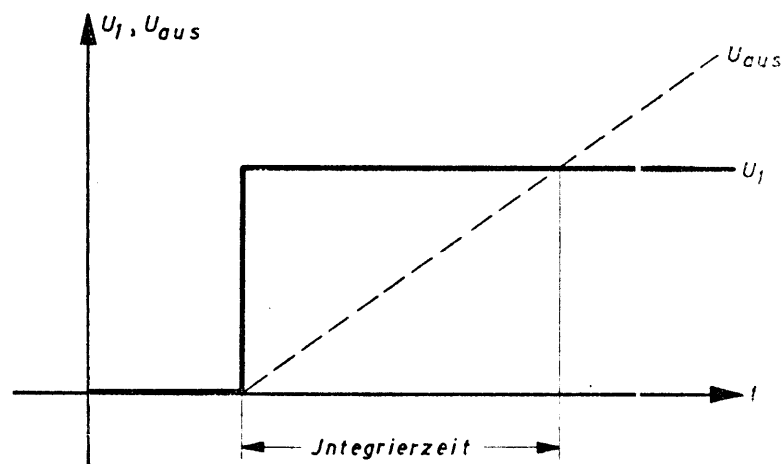


Bild 5: Verlauf von Eingangs- und Ausgangsspannung eines Integrators, Integrierzeit

Die Eingänge haben auch hier wieder verschiedene Verstärkungsfaktoren. Der Faktor 10 gibt an, daß bei sprungartigem Einschalten der Eingangsspannung die Ausgangsspannung nach einer Sekunde den zehnfachen Wert der Eingangsspannung hat und entspricht damit einer Integrirzeit von 0,1 s.

nur zum persönlichen Gebrauch anvertraut. Ohne unsere schriftliche Genehmigung dürfen Sie nicht kopieren, reproduzieren, weitergeben oder anderweitig öffentlich oder geschäftlich verwenden. Jegliche Verletzung dieser Nutzungsbedingungen kann zu rechtlichen Konsequenzen für Sie führen. Wir bitten Sie, diese Nutzungsbedingungen zu lesen und zu verstehen, bevor Sie diese Kopie in Anspruch nehmen. Vielen Dank für Ihr Interesse an unseren Produkten und Dienstleistungen. Wir freuen uns, Sie zu unterstützen.

Die Ausgangsspannung des Integrators muß bei Beginn des Rechenvorgangs einer bestimmten Anfangsbedingung entsprechen, die in der Gleichung (10), (11) und (12) durch die Konstante K bestimmt ist. Dieses wird durch eine in Bild 4 gestrichelt eingezeichnete Hilfseinrichtung gewährleistet, die aus einer einstellbaren niederohmigen Spannungsquelle $U_{\text{=}}$ und einem Relais d besteht. Vor Beginn des Rechenvorgangs sind die Kontakte geschlossen und der Kondensator lädt sich auf die Spannung $U_{\text{=}}$ auf. Da der Eingangspunkt des Verstärkers kein Potential gegen die Nullschiene hat, ist damit die Ausgangsspannung gleich der Spannung $U_{\text{=}}$. Bei Beginn der Rechnung öffnen die Kontakte und die Integration beginnt vom Anfangswert $U_{\text{=}}$ aus.

Bild 6 zeigt das übliche Symbol für einen summierenden Integrator. Es unterscheidet sich vom Symbol des Summierverstärkers durch ein angesetztes Rechteck, in dem die Verstärkungsfaktoren der verschiedenen Eingänge enthalten sind. Der Kreis symbolisiert die Hilfseinrichtung zur Herstellung der Anfangsbedingung, die im allgemeinen aus einer

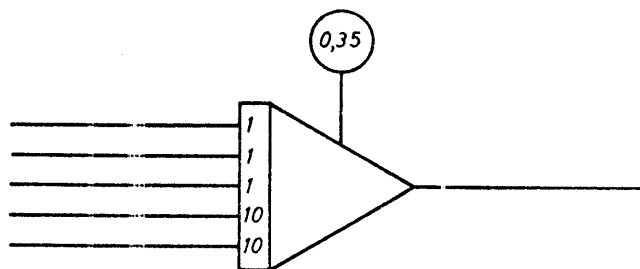


Bild 6: Kurzzeichen für einen summierenden Integrator.

konstanten Gleichspannungsquelle und einem Potentiometer zum Einstellen des gewünschten Wertes besteht. Die Zahl im Kreis gibt das Verhältnis vom Anfangswert der Ausgangsspannung zu 100 % Rechenspannung an. Bei einem Signalniveau von 15 V hat also die Ausgangsspannung in diesem Fall einen Anfangswert von 5,25 V.

1.24 Koeffizientenpotentiometer

Mit Hilfe von Koeffizientenpotentiometern lassen sich die folgenden drei Rechenoperationen durchführen:

- a) Multiplikation einer Rechenspannung mit einem konstanten Faktor, wobei der Faktor von Null bis 1 variiert werden kann.
- b) Einführung einer konstanten, zwischen Null und 100 % einstellbaren Spannung.
- c) Mit den erdfreien Potentiometern (P_{10} , P_{11} , P_{12}) können einstellbare Begrenzungen nach Bild 31 ausgeführt werden. Wird die schwarze Buchse geerdet, sind diese auch für Operationen nach a) und b) geeignet.

Im ersten Fall wird das Potentiometer mit einem Ende an die betreffende Rechenspannung, beispielsweise die Ausgangsspannung eines Rechenverstärkers, gelegt, während das andere Ende fest mit der Nullschiene verbunden ist. (Siehe Bild 7).

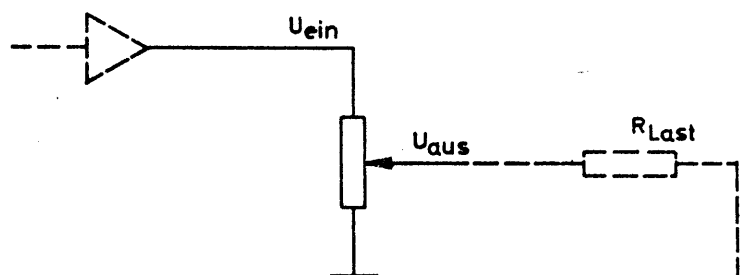


Bild 7: Koeffizientenpotentiometer zur Multiplikation mit einem konstanten Faktor.

Die Ausgangsspannung U_{aus} am Schleifer des Potentiometers steht dann in einem bestimmten Verhältnis zur Eingangsspannung U_{ein}

$$U_{\text{aus}} = k \cdot U_{\text{ein}} \quad (13)$$

wobei der Faktor k von Null bis 1 durch Verdrehen des Schleifers stufenlos verstellt werden kann. Es ist zu berücksichtigen, daß der Faktor k nur dann dem Drehwinkel des Schleifers proportional ist, wenn die Belastung des Potentiometers gering ist, d.h. wenn der gestrichelt eingezeichnete Belastungswiderstand R_{Last} (z.B. der Eingangswiderstand eines nachgeschalteten Verstärkers) genügend hochohmig gegenüber dem Innenwiderstand des Potentiometers ist. Dieser Umstand verhindert in vielen Fällen das Anbringen einer geeichten Skala, da der Belastungswiderstand von Rechenschaltung zu Rechenschaltung stark variieren kann. Man geht daher so vor, daß man den Eingang des Potentiometers an eine feste Referenzspannung legt, die gleich 100% der Rechenspannung ist. Gleichzeitig wird ein hochohmiger Spannungsmesser an den Schleifer gelegt, der bei 100% Rechenspannung 1 bzw. 100 anzeigt.

Das Potentiometer wird nun mit seiner jeweiligen Belastung nach dem Meßgerät abgeglichen, das direkt das Teilverhältnis k anzeigt.

Ist die Rechenspannung mit einem Faktor zu multiplizieren, der größer als 1 ist, so kann ein Rechenverstärker mit der Verstärkung 10 vor oder hinter dem Potentiometer angeschlossen werden. Auf diese Weise lassen sich alle Rechenkoeffizienten zwischen 1 und 10 stufenlos einstellen.

In Fall b) wird der Eingang des Potentiometers an eine feste Referenzspannung von Signale-niveau gelegt, so daß am Schleifer eine konstante, zwischen Null und 100% stufenlos einstellbare Spannung abgenommen werden kann. Die Einstellung erfolgt wie im Fall a) mit einem Spannungsmesser unter der jeweiligen Belastung.

Bild 8 zeigt das Kurzzeichen für ein Koeffizientenpotentiometer. Die Zahl im Kreis gibt das Teilverhältnis k an.



Bild 8: Kurzzeichen für ein Koeffizienten-
potentiometer.

1.3 Multiplikation und Division zweier veränderlicher Spannungen.

Während die Multiplikation einer Rechenspannung mit einem konstanten Faktor in einfacher Weise mit einem Potentiometer erreicht werden kann, erfordert die Multiplikation zweier veränderlicher Rechenspannungen einen erheblich größeren Aufwand. Von den verschiedenen bekannten Verfahren soll hier nur das Zwei-parabelverfahren beschrieben werden, nach dem der im BBC-Tisch-Analogrechner enthaltene Multiplikator arbeitet.

Dem Verfahren liegt die Beziehung

$$(a + b)^2 - (a - b)^2 = 4ab \quad (14)$$

zugrunde.

a und b sind die zu multiplizierenden Rechengrößen. Ein nach diesem Prinzip arbeitender Multiplikator muß demnach folgende Einzeloperationen durchführen (vgl. Bild 9).

1. Bildung der Summe $a + b$
2. Quadrieren der Summe $a + b$
3. Bildung der Differenz $a - b$
4. Quadrieren der Differenz $a - b$
5. Bildung der Differenz $(a + b)^2 - (a - b)^2$
6. Multiplikation der Ergebnisse mit dem konstanten Faktor 0,25

Die Rechenschaltungen zur Addition, Subtraktion und Multiplikation mit einem konstanten Faktor wurden bereits unter 1.2 beschrieben. Zur Quadrierung der Größen $a + b$ und $a - b$ werden sogenannte Funktionsgeneratoren FG eingesetzt, die unter 1.4 näher beschrieben sind.

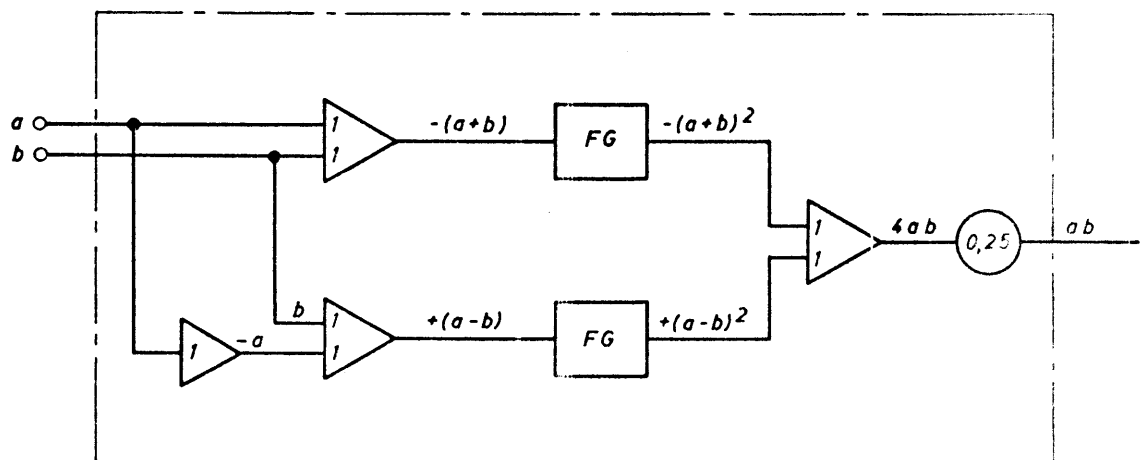


Bild 9: Prinzipschaltung eines Multiplikators nach dem Zweiparabelverfahren.

An dieser Stelle sei nur erwähnt, daß der quadratische Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung des Funktionsgenerators durch nichtlineare Widerstände erreicht wird, die durch vorgespannte Dioden realisiert werden.

Bild 10 zeigt das Kurzzeichen für einen Multiplikator.

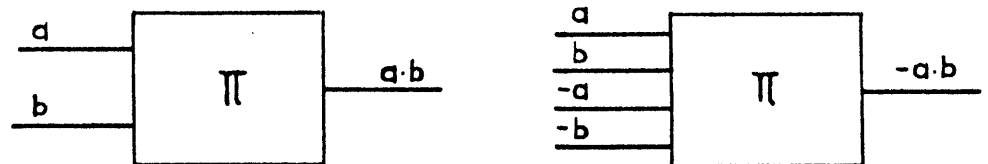


Bild 10: Kurzzeichen eines Multiplikators.

Der Multiplikator des hier beschriebenen Tisch-Analogrechners benötigt im Eingang die zu multiplizierenden Rechengrößen a und b in beiden Polaritäten und liefert im Ausgang das Produkt $a \cdot b$ mit negativem Vorzeichen (vgl. Bild 10 b).

Zur Division einer veränderlichen Rechengröße a durch eine zweite veränderliche Rechengröße b wird außer einem Multiplikator noch ein Rechenverstärker mit sehr hoher Verstärkung (d. h. ohne Gegenkopplung) benötigt. In Bild 11 ist eine solche Schaltung dargestellt.

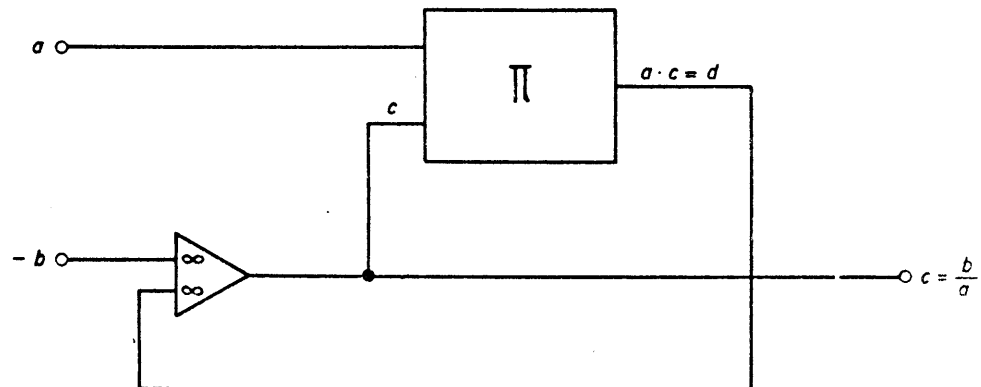


Bild 11: Prinzipschaltung zur Division zweier veränderlicher Größen.

Den Eingängen des Multiplikators werden die Größen a und c zugeführt, wobei c die Ausgangsspannung eines nicht gegengekoppelten Verstärkers ist. Die ∞ Zeichen im Eingang dieses Verstärkers sollen andeuten, daß der Verstärkungsfaktor sehr hoch ist. Die Ausgangsspannung d des Multiplikators wird dem einen Eingang des Verstärkers zugeführt, während am anderen Eingang die Größe $-b$ liegt. Der Verstärker ist nun bestrebt, seine Ausgangsspannung c immer so einzustellen, daß

$$d - b = 0 \quad (15)$$

ist, denn schon geringe Abweichungen würden infolge der hohen Verstärkung eine starke Änderung von c ergeben. Die Größe c würde über den Multiplikator die Größe d so beeinflussen, daß $d = b$ ist. Wir haben also einen geschlossenen Regelkreis mit dem Verstärker als Regler, b als Sollwert, d als Istwert und c als Stellgröße vor uns.

Da

$$d = a \cdot c \quad (16)$$

ergibt sich aus (15) und (16)

$$c = \frac{b}{a} \quad (17)$$

Zu beachten ist die Frage des Spannungsbereiches, in dem die Schaltung einwandfrei arbeitet. Um eine Übersteuerung des Verstärkers zu vermeiden, muß sichergestellt sein, daß

$$c \leq 1 \text{ bzw. } 100\% \quad (18)$$

oder

$$b \leq a \tag{19}$$

ist.

Es ist also anzustreben (vgl. 3.3, Forderung 2), die Größe a möglichst nahe 1 zu machen, während die Größe b nur wenig kleiner als a sein sollte. In diesem Falle ist dann auch die Hilfsgröße d nahezu 1, so daß der Multiplikator gut ausgenutzt ist.

1.4 Bildung nichtlinearer Zusammenhänge

Zur Bildung nichtlinearer Zusammenhänge werden sogenannte Funktionsgeneratoren benutzt. Diese bestehen, wie bereits unter 1.3 erwähnt, im wesentlichen aus nichtlinearen Widerständen, die durch vorgespannte Dioden realisiert werden, und liefern einen Ausgangsstrom, der den gewünschten nichtlinearen Zusammenhang mit der Eingangsspannung besitzt.

Ein nachgeschalteter Rechenverstärker wandelt den Ausgangsstrom in eine Rechenspannung $U_{\text{aus}} = -k \cdot I_{\text{aus}}$ um, die dann die gleiche nichtlineare Abhängigkeit von der Eingangsspannung hat.

$$U_{\text{aus}} = -k \cdot I_{\text{aus}} = f(U_{\text{ein}}) \quad (20)$$

Bild 12 zeigt die grundsätzliche Schaltung eines solchen Funktionsgenerators.

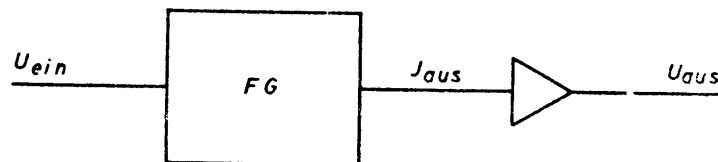


Bild 12: Prinzipschaltung zur Erzeugung nichtlinearer Zusammenhänge.

In Bild 13 ist die Realisierung eines nichtlinearen Widerstandes durch vorgespannte Dioden dargestellt.

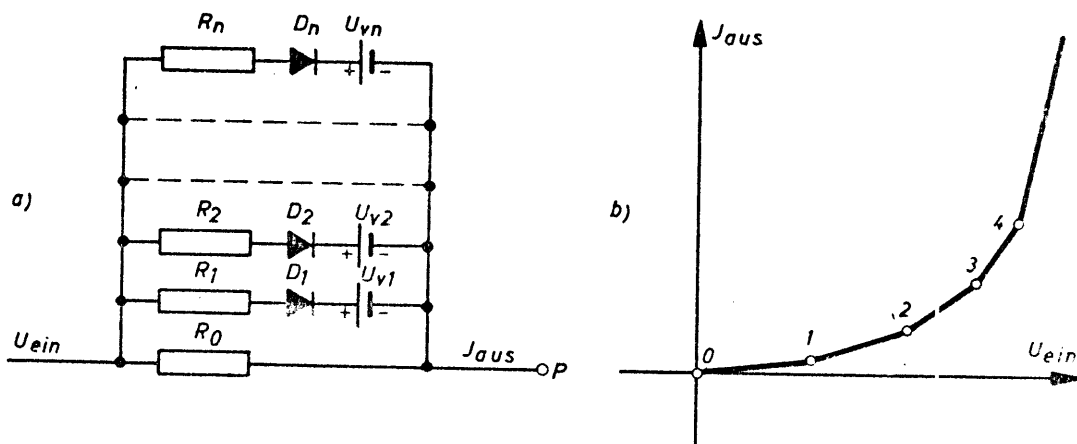


Bild 13: Schaltung und Kennlinie eines Funktionsgenerators.

Legt man an die dargestellte Schaltung eine positive Gleichspannung U_{ein} und vergrößert man diese Spannung stetig vom Wert Null aus, so fließt zunächst nur über den Widerstand R_0 ein Strom I_{aus} , da die Dioden $D_1 \dots D_n$ durch die Vorspannungen $U_{v1} \dots U_{vn}$ gesperrt sind. Der Strom I_{aus} steigt also gemäß dem Streckenabschnitt 0 - 1 in Bild 13 linear mit der Eingangsspannung U_{ein} an. Der Punkt P hat dabei das Potential der Nullschiene, da er gleichzeitig Eingangspunkt des nachgeschalteten Rechenverstärkers ist. Erreicht nun die Eingangsspannung U_{ein} den Wert der Vorspannung U_{v1} , so beginnt die Diode D_1 zu leiten und bei weiterer Erhöhung von U_1 kann nun auch über Widerstand R_1 Strom fließen. Die Strom-Spannungskennlinie in Bild 13 nimmt also von 1 an einen steileren Verlauf. Erreicht U_{ein} den Wert der Vorspannung U_{v2} , so beginnt Diode D_2 zu leiten und Widerstand R_2 beteiligt sich an der Stromführung, so daß von 2 ab die Kurve noch steiler verläuft. Das gleiche gilt mit steigender Eingangsspannung für die restlichen Dioden und Widerstände. Die Strom-Spannungskurve richtet sich also mit steigender Eingangsspannung immer weiter auf.

Der Verlauf der Kurve wird durch die Höhe der Vorspannungen $U_{v1} \dots U_{vn}$ und die Größe der Widerstände $R_0 \dots R_n$ bestimmt. Während die Vorspannungen U_v die Höhe der Knickpunkte 1, 2, 3, 4 usw. bestimmen, läßt sich mit den Widerständen $R_0 \dots R_n$ die Steigung der Kennlinie zwischen den Knickpunkten einstellen. Mit dieser Anordnung lassen sich also beliebige Kurven mit zunehmender Steigung durch eine Reihe von Geradenabschnitten annähern. Die Genauigkeit der Annäherung wird durch die Zahl der zur Verfügung stehenden Stromwege (R_1, R_2 und D_2, R_3 und D_3 usw.) bestimmt.

Durch geeignete Kombination linearer und nichtlinearer Glieder lassen sich beliebige Kurvenformen nachbilden. Unter 2.26 sind diese Möglichkeiten näher beschrieben. An dieser Stelle sei nur noch erwähnt, wie eine Kurve mit abnehmender Steigung dargestellt werden kann. In Bild 14 ist eine Schaltungsmöglichkeit für diesen Fall angegeben.

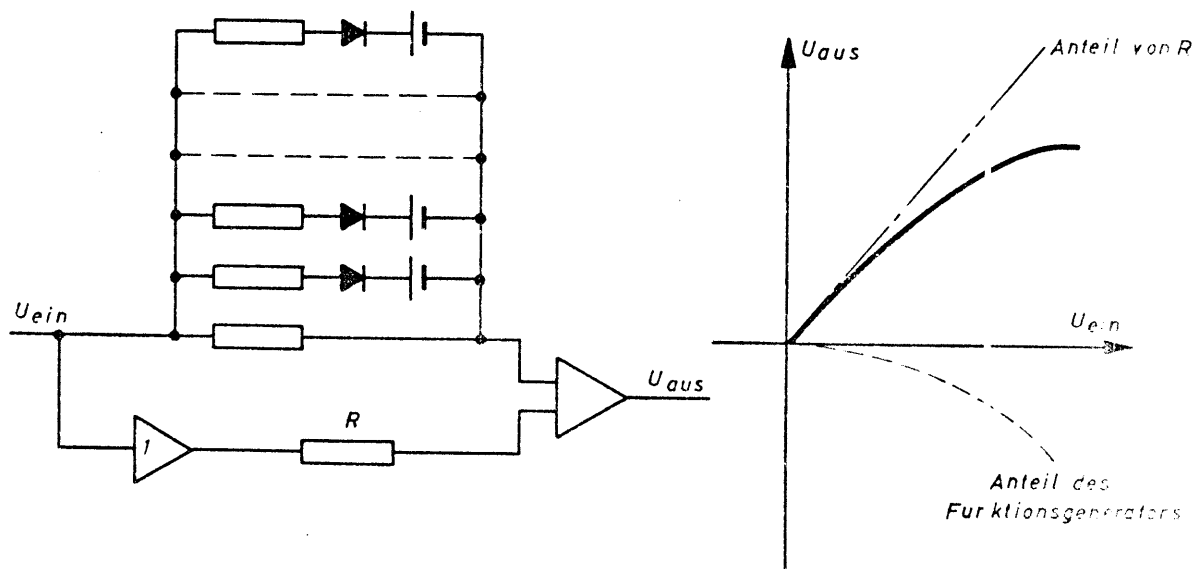


Bild 14: Schaltung zur Darstellung einer Kurve mit abnehmender Steigung.

Die gewünschte Kurve wird hier als Differenz zwischen einer Geraden und einer sich aufrichtenden Kurve gebildet. Widerstand R liefert den in Bild 14 B dargestellten strichpunktierten Anteil. Vor dem Widerstand R ist ein Umkehrverstärker angeordnet, der bewirkt, daß der strichpunktierte lineare Anteil positiv ist, während der nichtlineare Anteil des Funktionsgenerators ein negatives Vorzeichen hat.

Der Anteil des Funktionsgenerators ist gestrichelt eingezeichnet. Die Ausgangsspannung des anschließenden Verstärkers entspricht der Differenz beider Anteile und damit der gewünschten Kurve mit abnehmender Steigung.

Der Anteil des Funktionsgenerators ist gestrichelt eingezeichnet. Die Ausgangsspannung des anschließenden Verstärkers entspricht der Differenz beider Anteile und damit der gewünschten Kurve mit abnehmender Steigung.

2. Beschreibung des BBC-Tisch-Analogrechners.

2.1 Gesamtaufbau

Der BBC-Tisch-Analogrechner ist in einem Gehäuse mit Pultvorsprung untergebracht. Auf der Vorderseite befinden sich auf einer ausschwenkbaren Frontplatte die Anschlußbuchsen und Bedienungsknöpfe für die Rechenelemente. Auf dem Pultvorsprung ist die Bedienungstafel untergebracht, die sämtliche für die Steuerung und Überwachung der Rechenoperationen erforderlichen Bedienungselemente und Meßeinrichtungen sowie die Netzschalter und die Sicherung enthält. Die Rückseite der Bedienungstafel ist nach Abnehmen einer Grundplatte auf der Unterseite des Rechners zugänglich.

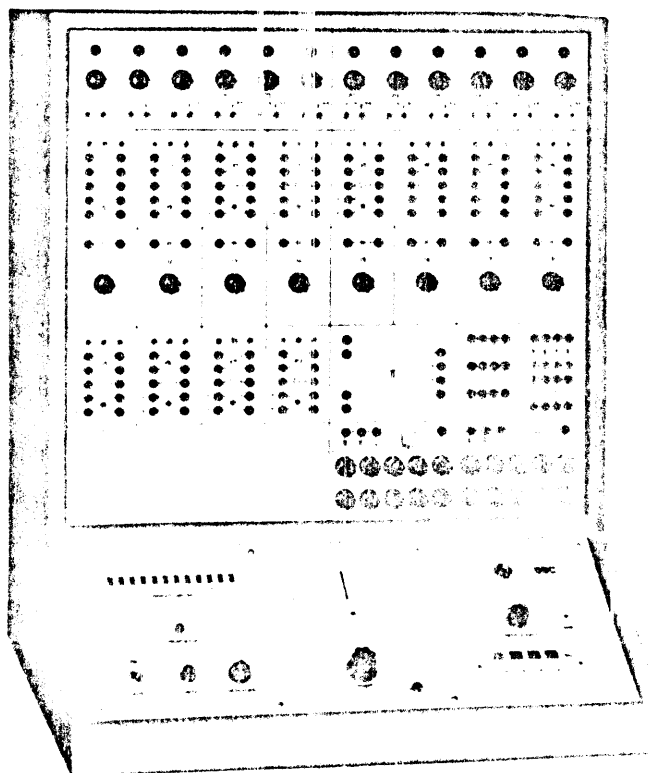


Bild 15: Vorderseite des BBC-Tisch-Analogrechners.

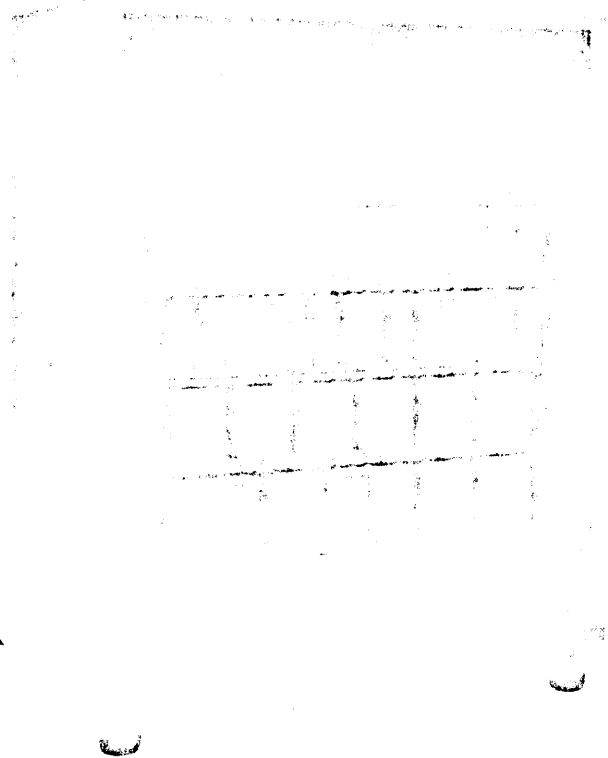


Bild 16: Rückansicht des BBC-Tisch-Analogrechners.

Die Rechenelemente, Hilfsgeräte und stabilisierten Netzgeräte sind in Metallkonstruktionen untergebracht, die Etagen genannt werden.

Die Rechengeräte und Hilfsgeräte sind als steckbare Einheiten, sogenannte "Prints" ausgeführt. Sie bestehen aus einer Leiterplatte mit gedruckter Schaltung, auf deren Vorderseite die Bauelemente (Transistoren, Widerstände, Dioden usw.) angeordnet sind. Die Leiterplatte ist mit einem Metallrahmen eingefasst, der die Führung in den Etagen sicherstellt. Zum Schutz gegen mechanische und atmosphärische Einflüsse ist die fertig bestückte und geprüfte Leiterplatte mit einem beidseitigen Gießharzüberzug versehen und auf der Rückseite mit einer Resopalplatte

abgedeckt. Als Beispiel für ein solches Print ist in Bild 17 ein Rechenverstärker dargestellt.

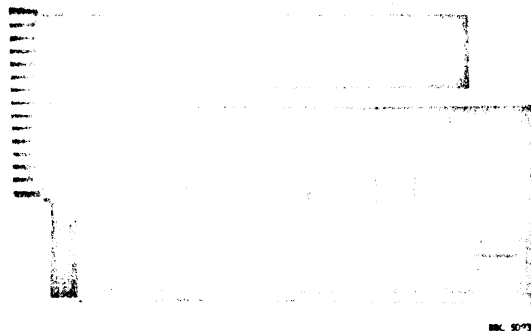


Bild 17: Rechenverstärker in "Printausführung"

An einer Schmalseite des Prints befindet sich ein mit hartvergoldeten Kontakten versehener Kontaktapparat, mit dem das Print in eine ebenfalls mit vergoldeten Kontakten ausgerüstete Steckerleiste auf der Rückseite der Etage eingeschoben wird. Die Prints können im Störfalle nach Abnehmen der Gehäuserückwand leicht herausgezogen und ausgetauscht werden.

Die Netzgeräte sind als sogenannte "Parts" ausgeführt und fest in die Etagen eingebaut.

Der Rechner enthält insgesamt sechs Etagen, davon zwei mit 134 mm Höhe (Größe 3) und vier mit 89 mm Höhe (Größe 2).

2.2 Elektrische Daten

2.21 Anschlußwerte

Netzspannung:	220 VE $\pm$ 10 %
Netzfrequenz:	50 Hz (45 ... 65 Hz)
Leistungsaufnahme:	ca. 80 W
Netzsicherung:	Schmelzeinsatz 0,8 A mittelträge 5 x 20 mm

2.22 Grundbestückung

12 Koeffizientenpotentiometer

Kohleschichtpotentiometer zur Einstellung der Rechenkoeffizienten. Die Potentiometer sind mit Feineinstellgetrieben mit einer Untersetzung von 6 : 1 versehen.

12 Rechenverstärker

dreistufige Gleichstromgegentaktverstärker

Verstärkung: $> 10^4$

Übertragungswiderstand: $> 1600 \text{ MOhm}$

wahlweise als Summierverstärker, summierende Integratoren oder ohne Gegenkopplung mit voller Verstärkung verwendbar.

Jeder Verstärker besitzt fünf Eingänge, davon drei für eine Verstärkung von 1 (bzw. eine Integrierzeit von 1 s) und zwei für eine Verstärkung von 10 (bzw. eine Integrierzeit von 0,1 s).

fünf Ausgänge

sowie ein Trimpotentiometer zum gelegentlichen Nullpunktgleich.

8 Integriereinheiten

mit je einem Präzisionskondensator zur Beschaltung der Rechenverstärker als integrierende Verstärker. Jede Einheit enthält außerdem eine stabilisierte Spannungsquelle mit Kohleschichtpotentiometer mit Feineinstellgetriebe und ein Relais zum Aufschalten der Anfangsbedingungen.

1 Multiplikator

(Arbeitsweise: Zweiparabelverfahren)

Der Multiplikator dient zur vorzeichenrichtigen Multiplikation zweier variabler Größen bzw. bei geeigneter Kombination mit einem Rechenverstärker zur Division einer variablen Größe durch eine zweite.

1 Funktionsgenerator

zur Darstellung nichtlinearer Zusammenhänge. Das Gerät enthält zwei Diodenprogramme, eins für positive und eins für negative Polarität mit je 10 logarithmischen Einstellpotentiometern. Die gewünschte Kurve kann durch 2 x 10 Geraden angenähert werden, deren Steigung mit den Potentiometern einstellbar ist, während die Höhe der Knickpunkte fest vorgegeben ist.

1 Referenzspannungseinheit

Die Einheit stellt hochkonstante Referenzspannungen von ± 15 VG zur Verfügung und ist mit maximal sechs Koeffizientenpotentiometern belastbar.

mit vier getrennt an Buchsen geführten Dioden zur Darstellung einfacher nicht-linearer Zusammenhänge sowie vier Kondensatoren zur Stabilisierung der Rechenverstärker in bestimmten Rechenschaltungen.

Skala 100 ... 0 ... 100

zum Aufschalten des Meßinstrumentes auf die 12 Rechenverstärker, den Multiplikator bzw. eine Meßbuchse.

"Repetieren" (Rep)

zur Einstellung der Repetierzeit mit Buchse zur Abnahme eines Synchronisierimpulses

als Übersteuerungsanzeige für die 12 Re-

1 Netzschalter
zum Ein- und Ausschalten der Netzspannung.

1 Netzkontrolllampe

1 Gerätesicherungslampe
mit Schmelzeinsatz 0,8 A mittelträge
5 x 20 mm. Bei durchgebrannter Sicherung
leuchtet die eingebaute Lampe auf.

1 Vielfachsteckdose
zum eventuellen Anschluß eines zweiten
Rechners.

2 Netzgeräte
elektronisch stabilisiert, zur Speisung
der Rechenelemente.

1 Netzgerät
unstabilisiert zur Speisung der Relais,
Signallampen und Spannungsindikatorröhren.

Zur Grundbestückung gehören ferner:

1 Netzschnur
2 m lang mit Schukostecker und Kaltgeräte-
steckdose.

100 Verbindungsschnüre
davon

50 Stück 0,2 m

25 Stück 0,4 m

25 Stück 0,8 m

1 Bedienungsanleitung

2.23 Signalniveau

Das Signalniveau des BBC-Tisch-Analogrechners ist ± 15 VG.

2.3 Mechanische Daten

Abmessungen:	Höhe	740 mm
	Breite	575 mm
	Tiefe	500 mm
Gewicht:		67 kg

Transportvorschrift:

Der Versand des Rechners erfolgt in einem stabilen Behälter, der zur Dämpfung von Stößen mit Schaumgummi ausgefüllt ist.

Bei späteren Transporten sollten mit Rücksicht auf das Meßinstrument starke Erschütterungen vermieden werden.

2.4 Rechenelemente

2.41 Rechenverstärker

Die Rechenverstärker sind volltransistorisierte Gleichstromgegenaktverstärker, die nach dem Differenzverstärkerprinzip arbeiten. Die charakteristischen Daten eines Verstärkers sind:

Spannungsverstärkung:	$> 10^4$
Übertragungswiderstand:	$> 1600 \text{ M}\Omega$
Belastbarkeit:	$\geq 5 \text{ k}\Omega$
Grenzfrequenz:	

Amplitudenfehler 1 %:	400 Hz
-----------------------	--------

Grenzfrequenz für

Vollaussteuerung:	1000 Hz
-------------------	---------

Alle Werte für Vollaussteuerung 30 V Spitze - Spitze.

Die Verstärker sind wie alle anderen Rechenelemente kurzschlußsicher.

Bild 18 zeigt Schaltung und Frontplattenabschnitt eines Rechenverstärkers.

Auf der linken Seite befinden sich fünf rote Eingangsbuchsen, die über Präzisionswiderstände mit dem Eingang des Verstärkers verbunden sind.

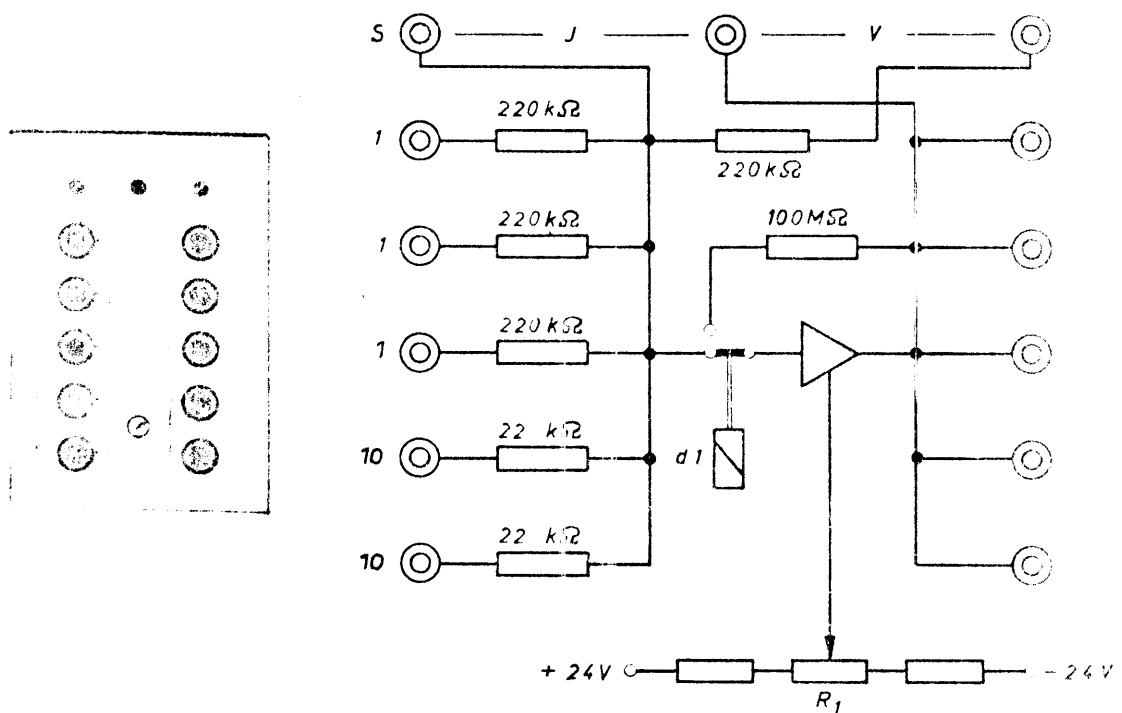


Bild 18: Schaltung und Frontplattenabschnitt eines Rechenverstärkers.

Der vom Eingang des Verstärkers zur rechten oberen (gelben) Buchse führende 220 kΩ-Widerstand dient als Gegenkopplung. Will man den Verstärker als Summierverstärker benutzen, so sind die beiderseits des V-Zeichens liegenden gelben Buchsen mit einer Verbindungsschraube kurzzuschließen. Damit ist der Gegenkopplungswiderstand zwischen Ausgang und Eingang des Verstärkers eingeschaltet. Die drei oberen

roten Eingangsbuchsen ergeben mit ihren 220 kOhm-Widerständen eine Verstärkung von 1, während die Verstärkung bei Benutzung der beiden unteren Eingangsbuchsen mit ihren 22 kOhm-Widerständen 10 ist.

Soll der Verstärker als summierender Integrator betrieben werden, so werden die beiden Buchsen einer Integriereinheit mit den beiderseits des I-Zeichens liegenden gelben Buchsen des Rechenverstärkers verbunden. Damit wird zwischen Ausgang und Eingang des Verstärkers ein Präzisionskondensator von 4,54 μ F geschaltet. Die drei oberen mit 1 bezeichneten Eingangsbuchsen ergeben eine Integrierzeit von einer Sekunde, während bei Benutzung der unteren mit 10 bezeichneten Buchsen eine Integrierzeit von 0,1 Sekunde erreicht wird.

Das unterhalb des Verstärkersymbols befindliche von vorn zugängliche Triampotentiometer R_1 ermöglicht ein gelegentliches Abgleichen des Verstärkers auf Ausgangsspannung Null bei Eingangsspannung Null. Dieser Abgleich sollte von Zeit zu Zeit vor Beginn einer Rechnung ausgeführt werden, da sich der Nullpunkt infolge der Temperaturabhängigkeit der Transistoren verschieben kann. Man bezeichnet diese Erscheinung mit "Drift". Zu diesem Zweck wird auf der Bedienungstafel die Taste "V" (Verstärkerabgleich) gedrückt und mit dem Wahlschalter der betreffende Verstärkerausgang auf das Meßinstrument geschaltet. Relais $\delta 1$ zieht an, trennt den Eingang des Verstärkers von den Eingangswiderständen und dem 220 kOhm-Gegenkopplungswiderstand ab und legt dafür einen sehr hochohmigen Gegenkopplungswiderstand (100 MOhm)

an den Eingang. Mit dem Trimpotentiometer R_1 kann nun die auf dem Meßinstrument angezeigte Ausgangsspannung des Verstärkers exakt auf Null eingestellt werden. Anschließend kann die Taste "R" (Rechnen) oder "Rep" (Repetieren) gedrückt werden, die beide die Taste "V" auslösen und damit Relais d 1 wieder zum Abkühlen bringen. Der Rechenvorgang geht dann sofort weiter.

Läßt man die drei oberen gelben Buchsen unbeschaltet, so wird der Verstärker ohne Gegenkopplung betrieben und hat demnach eine sehr hohe Verstärkung. Er kann in dieser Weise beispielsweise als Regelverstärker in einer Divisionsschaltung eingesetzt werden (vgl. Bild 11).

Die Rechenverstärker sind so ausgelegt, daß jeder einzelne Verstärker bei beliebiger Gegenkopplung (ohmscher Widerstand oder Kondensator) stabil arbeitet. Eine in sich geschlossene Kette von Verstärkern mit ohmscher Gegenkopplung (Summierverstärker) neigt dagegen zu Schwingungen mit hoher Frequenz.

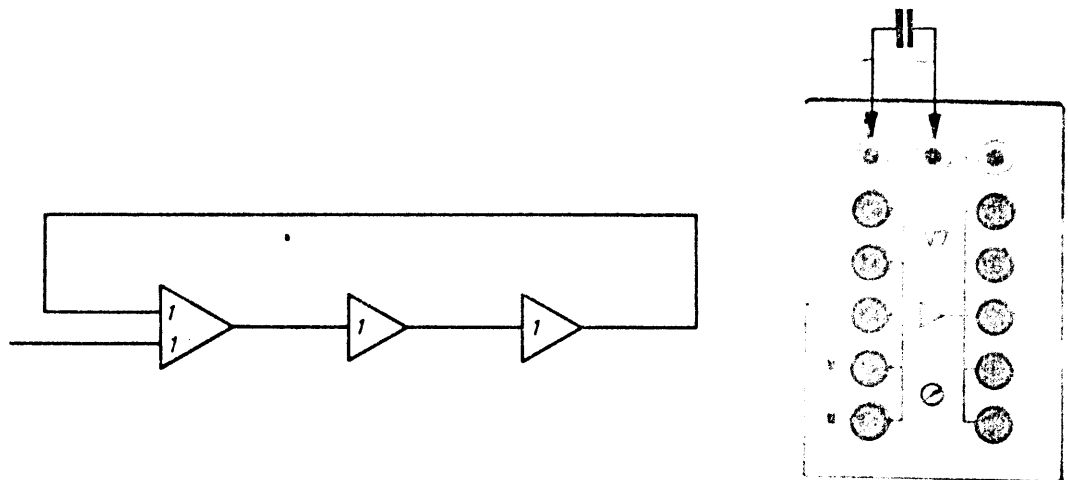


Bild 19: Beseitigung der Schwingneigung bei einer geschlossenen Kette von Summierverstärkern.

Läßt sich eine solche in sich geschlossene Kette in einer Rechenschaltung nicht vermeiden, so sind an einem oder mehreren Verstärkern dieser Kette die gelben I-Buchsen mit kleinen Stabilisierungskondensatoren von 10 nF zu beschalten. Die Rechenverstärker werden auf diese Art zu Integrierverstärkern, die diese Schwingneigung nicht mehr besitzen. Die Zeitkonstante ist dabei so klein, daß der Rechenvorgang praktisch nicht beeinflusst wird.

Die gleiche Stabilisierungsmaßnahme ist bei der in Bild 11 angegebenen Divisionsschaltung erforderlich. In diesem Fall ist der nicht gegengekoppelte Regelverstärker mit einem 10 nF-kondensator zu beschalten.

Auf der Diodeneinheit stehen vier solcher Kondensatoren von 10 nF zur Verfügung ($K_1 \dots K_4$).

Die Verstärker sind maximal mit 5 kOhm belastbar, d. h. mit

2 Koeffizientenpotentiometern (≈ 10 kOhm)
oder 4 10er Eingängen von Rechenverstärkern
(≈ 22 kOhm)
oder 40 1er Eingängen von Rechenverstärkern
(≈ 220 kOhm)
oder 1 Multiplikator + 10er Eingang eines
Rechenverstärkers.

2.42 Koeffizientenpotentiometer

Die Koeffizientenpotentiometer sind lineare Kohle-schichtpotentiometer mit einem Widerstand von 10 kOhm und werden zur Erleichterung der Einstellung von einem Feineinstellgetriebe mit einer Übersetzung von 6 : 1 angetrieben. Über jedem Drehknopf befindet sich ein Drucktaster zum Abgleich des betreffenden Potentiometers. Die rechten Anschlüsse der Potentiometer P 1 ... P 9 sind fest mit der Nullschiene des Rechners verbunden. Bei den Potentiometern P 10 ... P 12 ist der rechte Anschluß nicht fest geerdet, sondern an die schwarze Buchse geführt.

Bild 20 zeigt die Schaltung und Frontplatte dreier geerdeter Potentiometer.

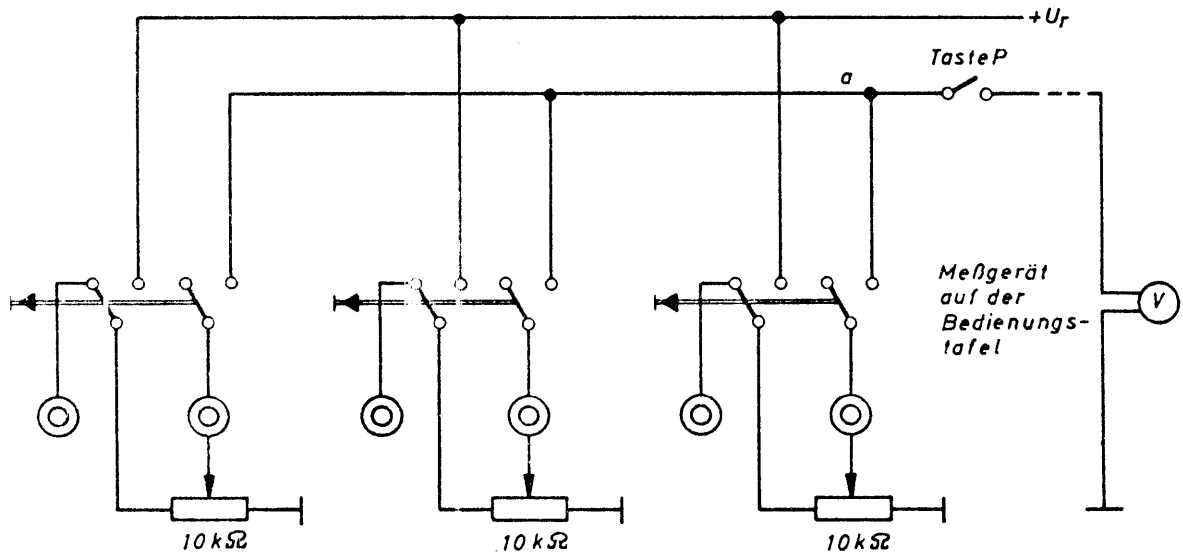
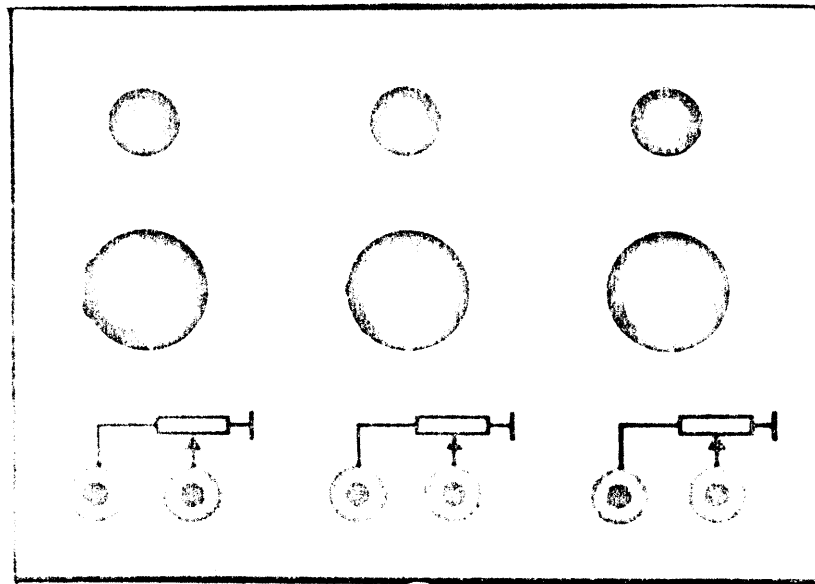


Bild 20: Schaltung und Frontplatte dreier Koeffizientenpotentiometer.

Der Abgleichvorgang geht wie folgt vonstatten:

1. Taste "P" (Potentiometerabgleich) drücken. Damit wird das Meßgerät von dem gerade gewählten Rechenverstärker abgeschaltet und auf die gemeinsame Leitung a der Potentiometereinheiten geschaltet.

2. Abgleichtaste des betreffenden Potentiometers drücken.

Ein Umschaltkontakt schaltet das freie Ende des Potentiometers von der Buchse auf die positive Referenzspannung $+ U_r$ um. Ein zweiter Kontakt verbindet den Schleifer des Potentiometers mit der gemeinsamen Leitung a und damit mit dem Meßgerät. Die am Schleifer liegende Buchse wird dabei nicht abgeschaltet, so daß die Belastung des Potentiometers wirksam bleibt. Mit Hilfe des Drehkopfes kann jetzt das Potentiometer so eingestellt werden, daß das gewünschte Teilerverhältnis erreicht wird. Da die Referenzspannung mit 15 VG dem Signalniveau, also 100 % Ausschlag des Meßgerätes entspricht, kann das Teilerverhältnis direkt in Prozent am Meßgerät abgelesen werden. Nach beendeter Einstellung wird die Abgleichtaste wieder losgelassen und nach Drücken der Taste "R" (Rechnen) bzw. "Rep" (Repetieren) geht der Rechenvorgang sofort weiter.

3. Um den Abgleich der Potentiometer P 10 ... P 12 nach Punkt 1 und 2 durchführen zu können, muß die schwarze Buchse des betreffenden Potentiometers geerdet werden.

2.43 Integriereinheiten

Jede Integriereinheit enthält einen Präzisionskondensator von $4,54 \mu\text{F}$ zur Beschaltung eines Rechenverstärkers als Integrator. Außerdem besitzt jede Integriereinheit eine galvanisch von der Nullschiene des Rechners getrennte stabilisierte Gleichspannungsquelle, die durch ein Relais mit dem Kondensator verbunden werden kann. Mit einem ebenfalls auf der Integriereinheit befindlichen Potentiometer von $1 \text{ k}\Omega$ Widerstand läßt sich die als Anfangsbedingung auf den Kondensator geschaltete Spannung zwischen 0 und 15 VG einstellen. Das Potentiometer ist ebenfalls mit einem Feineinstellgetriebe versehen.

Bild 21 zeigt Schaltung und Frontplatte einer Integriereinheit.

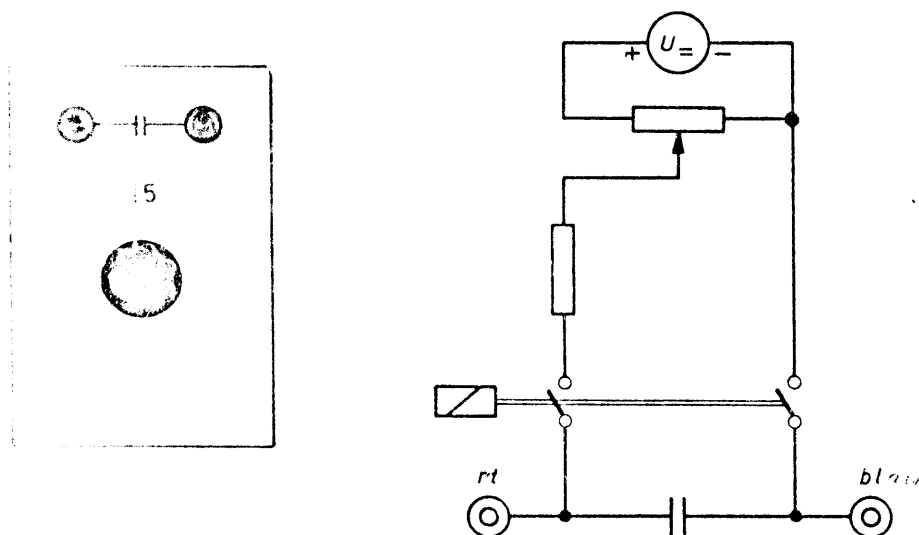
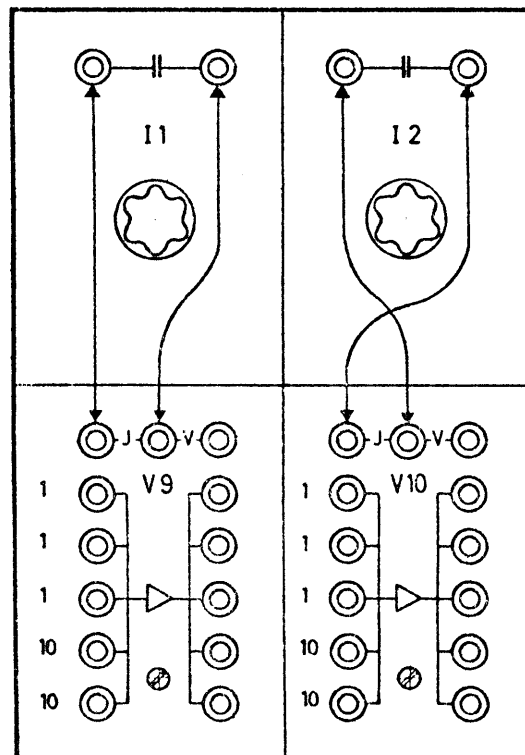


Bild 21: Schaltung und Frontplatte einer Integriereinheit.

Zum Einstellen der Anfangsbedingung wird die Taste "AB" (Anfangsbedingung) auf der Bedienungstafel gedrückt, die die Relais der Integratoreinheiten zum Anziehen bringt. Damit wird der Kondensator innerhalb von etwa 100 Millisekunden auf die mit dem Potentiometer eingestellte Spannung aufgeladen. Da der Summationspunkt des mit dem Kondensator beschalteten Rechenverstärkers genau auf dem Potential der Nullschiene liegt, ist die Ausgangsspannung des Verstärkers gleich der Kondensatorspannung. Die Anfangsbedingung läßt sich also mit dem Meßgerät auf der Bedienungstafel genau einstellen, nachdem man den Verstärkerwahlschalter auf der Bedienungstafel in die entsprechende Stellung gebracht hat. Die Polarität der Ausgangsspannung wird durch entsprechende Polung der Verbindungsschnüre zwischen dem Rechenverstärker und der Integratoreinheit festgelegt. Die rote Buchse der Integratoreinheit ist mit dem positiven Pol und die blaue Buchse mit dem negativen Pol der eingebauten Spannungsquelle verbunden. Verbindet man die rechts neben dem I-Zeichen auf dem Rechenverstärker befindliche gelbe Buchse (die mit dem Verstärkerausgang identisch ist) mit der roten Buchse einer Integratoreinheit, so erhält man eine positive Ausgangsspannung. Umgekehrt bedeutet eine Verbindung der rechts neben dem I-Zeichen liegenden Buchse mit der blauen Buchse der Integratoreinheit eine negative Ausgangsspannung (vgl. Bild 22).



negative Ausgangs-
spannung

positive Ausgangs-
spannung

Bild 22: Anschluß der Integriereinheiten an die Rechenverstärker.

Drückt man anschließend die Taste "R" (Rechnen), so wird Taste "AB" ausgelöst und die Relais auf den Integriereinheiten fallen ab. Die Ausgangsspannung der Rechenverstärker ist jetzt wieder frei und entspricht vom vorgegebenen Anfangswert aus dem zeitlichen Integral der Eingangsspannungen.

2.44 Referenzspannungseinheit

Die Referenzspannungseinheit liefert zwei stabilisierte Referenzspannungen von + 15 V bzw. - 15 V entsprechend + 100 % bzw. - 100 % Signalniveau. Diese Spannungen dienen zur Speisung von Koeffizientenpotentiometern, wenn in einer Rechenschaltung konstante Koeffizienten benötigt werden. Zu diesem Zweck wird die obere Buchse des betreffenden Potentiometers mit den Buchsen + 15 V bzw. - 15 V der Referenzspannungseinheit durch eine Verbindungsschnur verbunden. Am Schleifer kann dann eine zwischen Null und + 15 V bzw. - 15 V veränderliche Spannung abgenommen werden. Der Abgleich der Potentiometer erfolgt genau wie unter 2.42 beschrieben. Jede der beiden Referenzspannungen kann mit maximal 1,6 kOhm belastet werden, d. h. mit

6 Koeffizientenpotentiometern (≈ 10 kOhm) oder 12 10er Eingängen von Rechenverstärkern (≈ 22 kOhm) oder 120 1er Eingängen von Rechenverstärkern (≈ 220 kOhm).

Eine Überlastung ist unschädlich, jedoch ist die Genauigkeit der Referenzspannungen dann nicht mehr garantiert. Die mit 0 bezeichneten Buchsen der Referenzspannungseinheit sind mit der Nullschiene verbunden und dienen zum Anschluß externer Sichtgeräte (Kathodenstrahl-oszillograph, Schreiber etc.).

Bild 23 zeigt Schaltung und Frontplatte der Referenzspannungseinheit.

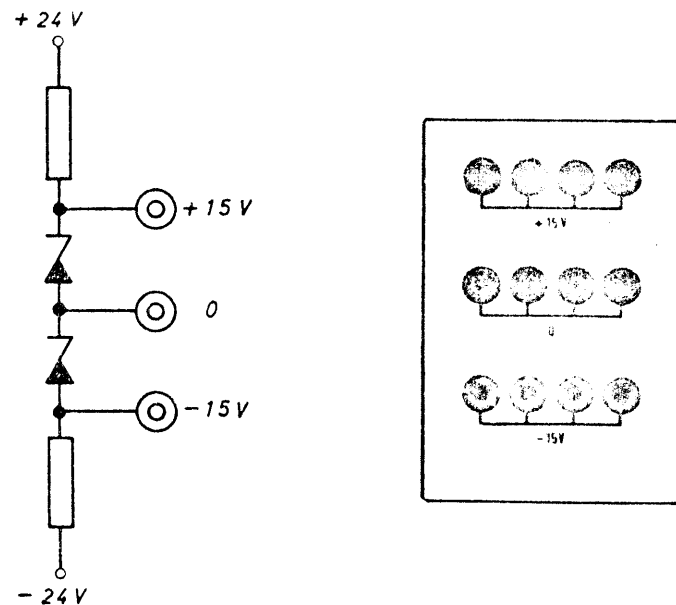


Bild 23: Schaltung und Frontplatte der Referenzspannungseinheit.

2.45 Multiplikator

Der Multiplikator arbeitet nach dem bereits beschriebenen Zweiparabelverfahren (vgl. 1.3) und ermöglicht die trägheitslose, vorzeichenrichtige Multiplikation zweier veränderlicher Rechenspannungen. Bild 24 zeigt seine Prinzipschaltung und die Frontplatte. Das Netzwerk mit Dioden und Widerständen zwischen Eingangsbuchsen und den beiden Funktionsbildnern dient zur vorzeichenrichtigen Bildung der Summe $a + b$ und der Differenz $a - b$.

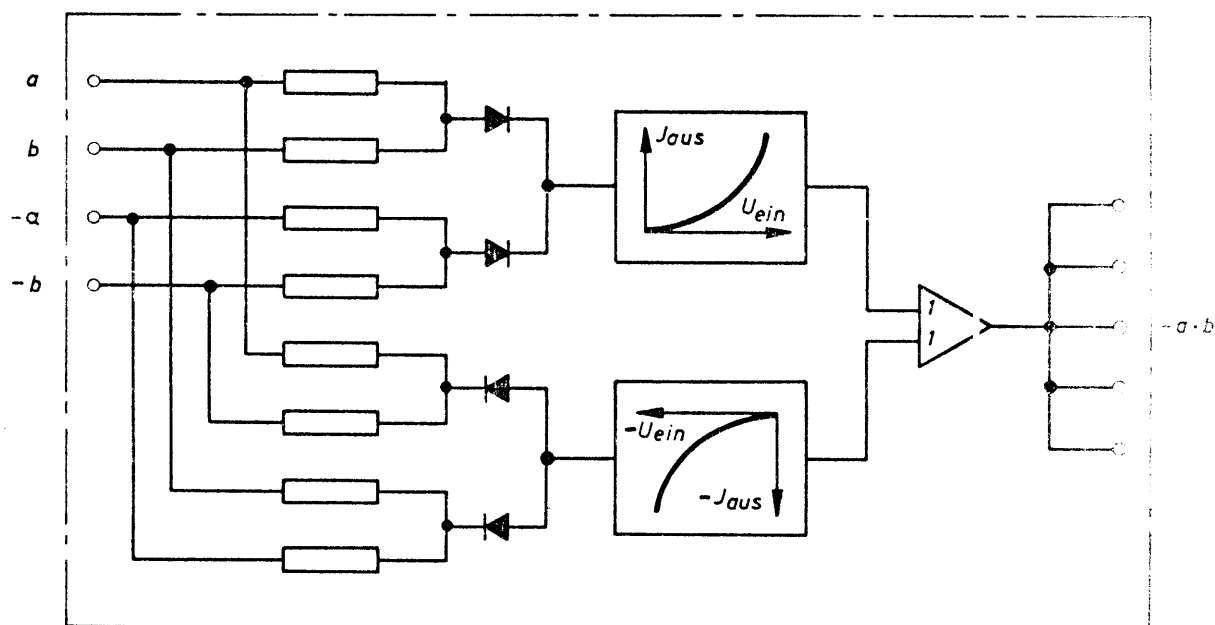
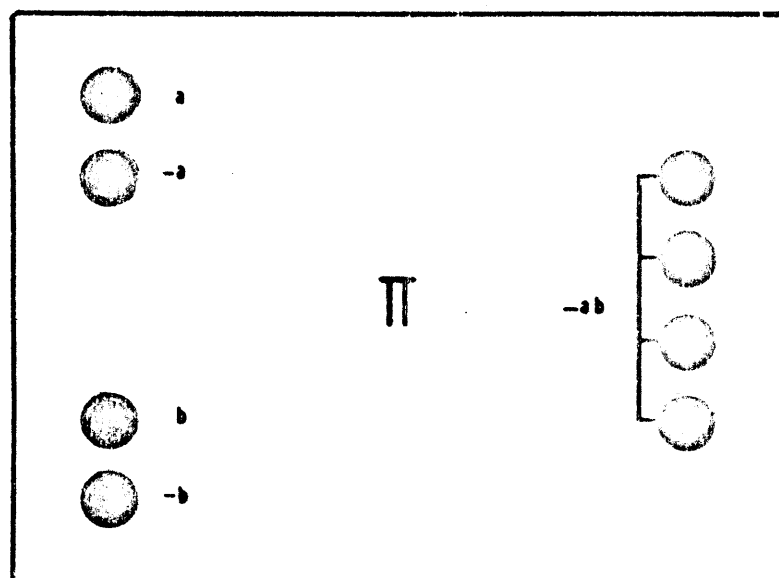


Bild 24: Schaltung und Frontplatte des Multiplikators.

Diese Größen werden zwei Funktionsgeneratoren zugeführt, die nach dem unter 1.4 beschriebenen Prinzip der vorgeschalteten Dioden arbeiten. Die Ausgangsströme der Funktionsgeneratoren sind dem Quadrat der Größen $a + b$ bzw. $-(a - b)$ proportional. Beide Ströme fließen in den Eingang eines nachgeschalteten Summierverstärkers, der über einen ohmschen Widerstand so gegengekoppelt ist, daß seine Ausgangsspannung dem Produkt $- a \cdot b$ entspricht. Das Minuszeichen berücksichtigt die Tatsache, daß die Ausgangsspannung eines Rechenverstärkers immer das entgegengesetzte Vorzeichen des Eingangsstromes hat. Legt man also beispielsweise an die Buchsen a und b positive Spannungen (und entsprechend an $-a$ und $-b$ negative Spannungen), so ist die Spannung am Ausgang negativ.

Dem Multiplikator müssen im Eingang die zu multiplizierenden Rechengrößen in beiden Polaritäten zugeführt werden. Oft sind in einer Rechenschaltung bereits Umkehrverstärker vorhanden, so daß die beiden Polaritäten zur Verfügung stehen. Ist das nicht der Fall, so müssen vor dem Multiplikator besondere Umkehrverstärker geschaltet werden wie in Bild 25 dargestellt.

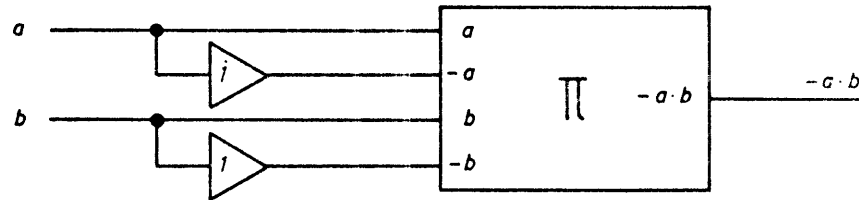


Bild 25: Schaltung eines Multiplikators
mit Umkehrverstärkern im Eingang.

Wird die Ausgangsspannung des Multiplikators in entgegengesetzter Polarität benötigt, so genügt es, die Polaritäten einer Eingangsgröße umzukehren, wie dies in Bild 26 für die Eingangsgröße a durchgeführt ist.

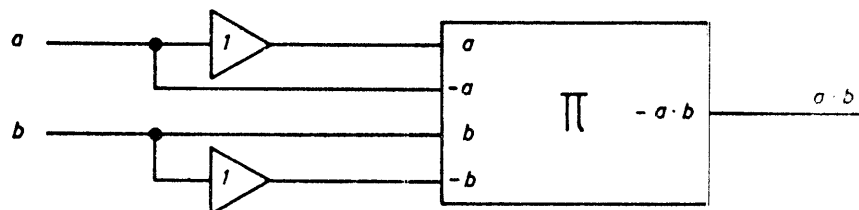


Bild 26: Schaltung eines Multiplikators ohne
Vorzeichenumkehr.

Der Multiplikator kann grundsätzlich auch zur Quadrierung einer Rechengröße eingesetzt werden. In diesem Fall werden die Eingänge a und b und - a und - b verbunden.

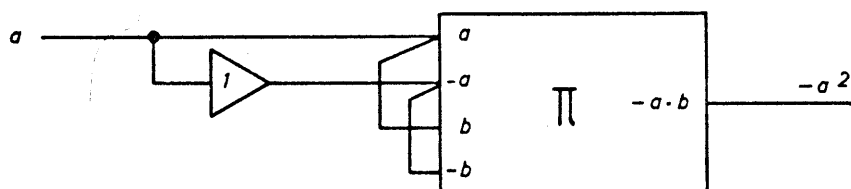


Bild 27: Quadrieren mit einem Multiplikator.

Der Multiplikator kann, wie unter 1.3 beschrieben, auch zur Division zweier veränderlicher Rechengrößen verwendet werden. Bild 28 zeigt die vollständige Schaltung.

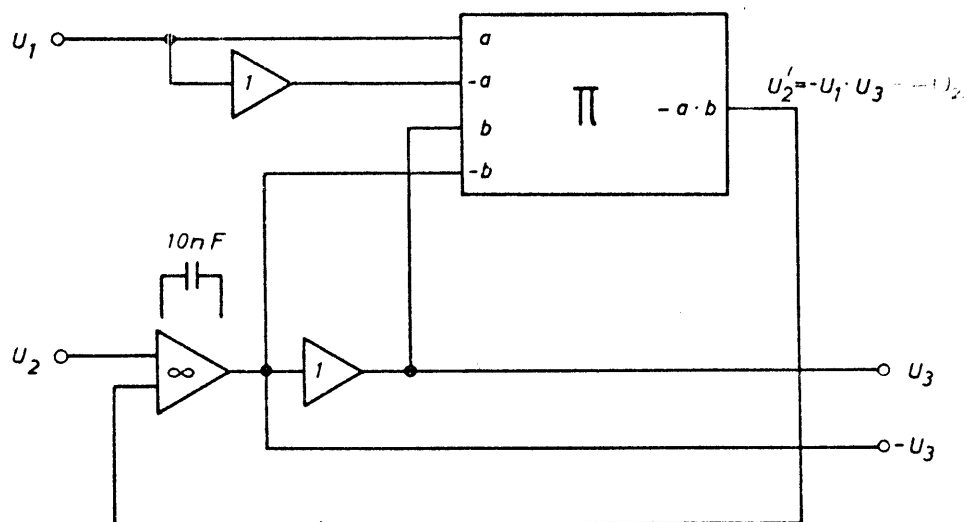


Bild 28: Schaltung zur Division zweier Größen.

$$U_3 = \frac{U_2}{U_1}$$

Zu beachten ist, daß die in Bild 28 angegebene Divisionschaltung nur dann einwandfrei arbeitet, wenn die Eingangsspannung U_1 positiv ist. Wie unter 1.3 ausgeführt, stellt die Schaltung einen Regelkreis dar, in dem der mit einem $\odot$ -Zeichen versehene Verstärker als Regler wirkt. Nimmt nun die Spannung U_1 negative Werte an, so wird durch den Multiplikator der Regelsinn des Regelkreises umgekehrt und es tritt Instabilität auf. Sollte in einer Rechenschaltung die Spannung U_1 nur mit negativem Vorzeichen zur Verfügung stehen, so wird der Regelsinn wieder richtig, wenn die Buchsen b und - b vertauscht werden. Die Schaltung arbeitet aber dann nicht mehr für positive Werte von U_1 .

2.46 Funktionsgenerator

Der Funktionsgenerator arbeitet nach dem unter 1.4 beschriebenen Prinzip mit vorgespannten Dioden. Er enthält zwei getrennte Diodenprogramme mit je 10 Geradenabschnitten.

Das auf der Frontplatte links liegende Diodenprogramm liefert bei positiver Eingangsspannung einen positiven Ausgangsstrom, während das rechte Diodenprogramm bei negativer Eingangsspannung einen negativen Ausgangsstrom liefert. Bild 29 zeigt die Frontplatte des Funktionsgenerators.

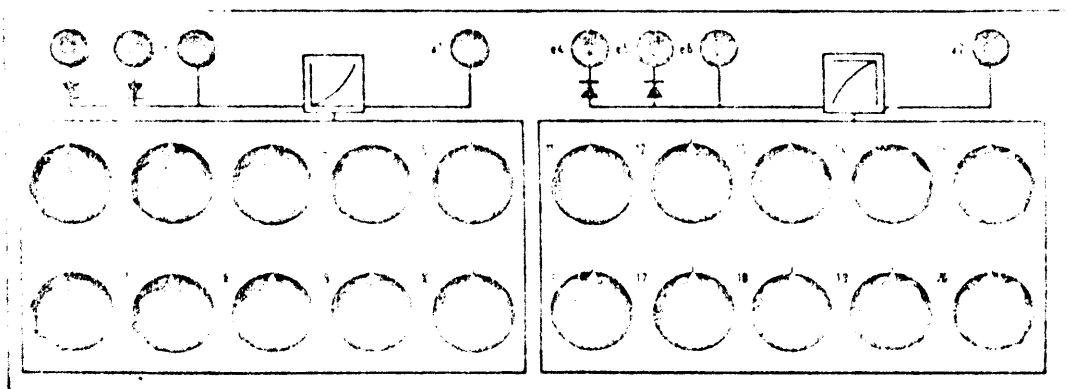


Bild 29: Frontplatte des Funktionsgenerators.

Dem Funktionsgenerator ist grundsätzlich ein Rechenverstärker nachzuschalten, der den nicht-linearen Ausgangsstrom in eine Ausgangsspannung umformt.

In Bild 30 ist die Prinzipschaltung des linken Diodenprogramms dargestellt. Das rechte Diodenprogramm ist ähnlich aufgebaut, nur sind sämtliche Dioden entgegengesetzt gepolt.

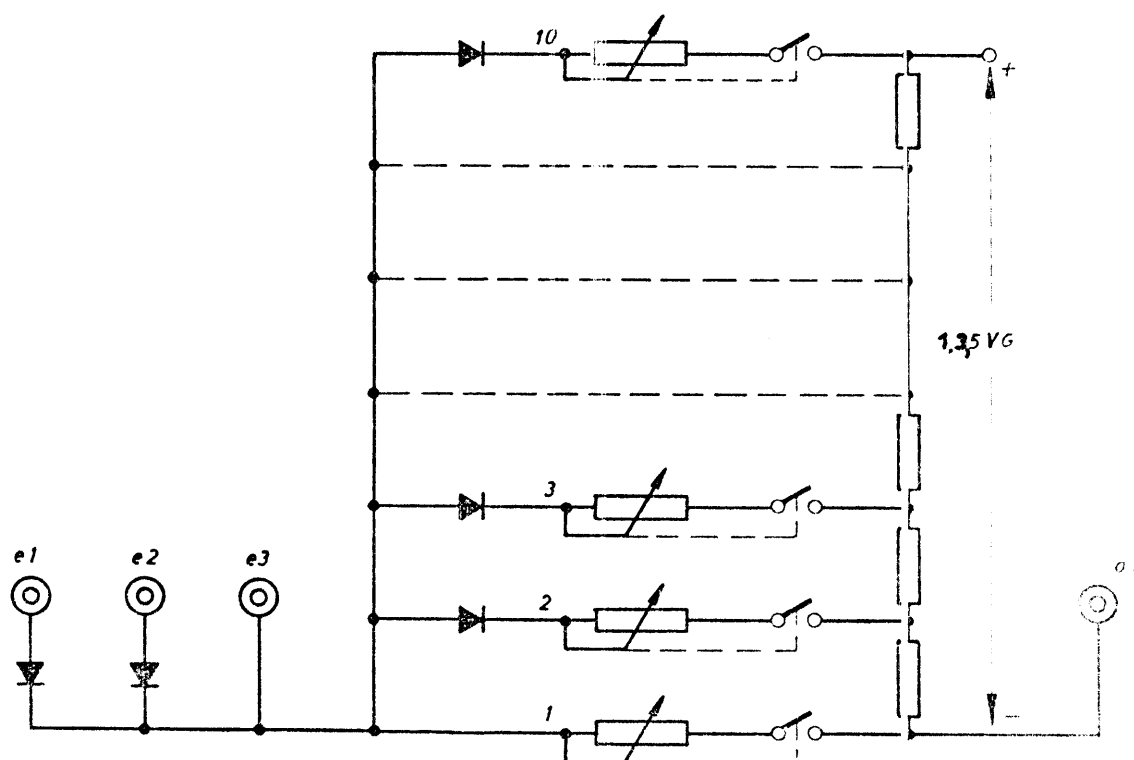


Bild 30: Prinzipschaltung des linken Diodeprogramms.

Die gewünschte Kurve kann durch zehn Geradenabschnitte angenähert werden, deren Steigung mit den Potentiometern 1...10, bzw. 11...20 eingestellt werden kann. Die Knickpunkte sind durch einen Spannungsteiler festgelegt und lassen sich nicht verstellen. Die Potentiometer sind so nummeriert, daß mit wachsender Ziffer die Höhe der Knickpunkte steigt. Potentiometer 1 bzw. 11 wird also bereits bei kleiner Eingangsspannung wirksam, während Potentiometer 10 bzw. 20 erst bei sehr hoher Eingangsspannung eingeschaltet wird. Die Potentiometer haben eine negativ logarithmische Kennlinie, um eine bequeme Einstellung in einem großen Variationsbereich zu ermöglichen. Am linken Anschlag hat jedes Potentiometer seinen maximalen Wert. Dreht man den betreffenden Drehknopf weiter nach links, so schaltet ein mit

dem Potentiometer gekoppelter Schalter das Potentiometer vollkommen ab.

Die Einstellung der gewünschten Kurve auf dem Funktionsgenerator kann nach zwei Verfahren erfolgen.

1. Einstellung mit Kathodenstrahloszillographen.

Man gibt auf den Eingang des Funktionsgenerators eine sich periodisch zwischen +15 V und -15 V ($\pm 100\%$) ändernde Spannung, die man beispielsweise mit der in Bild 35 dargestellten Schaltung auf dem Rechner selbst erzeugen kann. Diese Eingangsspannung gibt man gleichzeitig auf den x-Eingang (Eingang des Horizontalverstärkers) des Kathodenstrahloszillographen.

Die Ausgangsspannung des dem Funktionsgenerator nachgeschalteten Rechenverstärkers wird mit dem y-Eingang (Eingang des Vertikalverstärkers) des Kathodenstrahloszillographen verbunden.

Wird die Frequenz der periodischen Eingangsspannung genügend hoch gewählt ($\sim 10 \text{ s}^{-1}$), so erscheint die Kurve als stehendes Bild auf dem Schirm. Man kann nun durch Verdrehen der Potentiometer den gewünschten Verlauf einstellen.

2. Einstellung nach Instrument

Für höhere Ansprüche an die Genauigkeit ist es zweckmäßig, die als Diagramm oder in Tabellenform vorgegebene Kurve Punkt für Punkt mit einem Spannungsmesser für die Eingangsspannung und einen Spannungsmesser für die Ausgangsspannung aufzunehmen. In diesem Fall wird die Eingangsspannung mit einem Koeffizientenpotentiometer langsam von Null bis auf ihren Höchstwert verstellt. Falls vorhanden, kann auch ein mechanischer xy-Schreiber gut verwendet werden.

In Bild 31 sind für eine Anzahl verschiedener Kurven die Schaltungen des Funktionsgenerators angegeben.

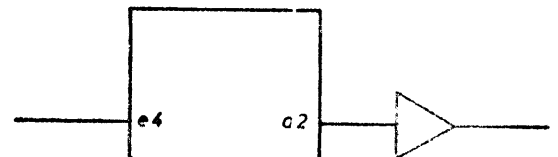
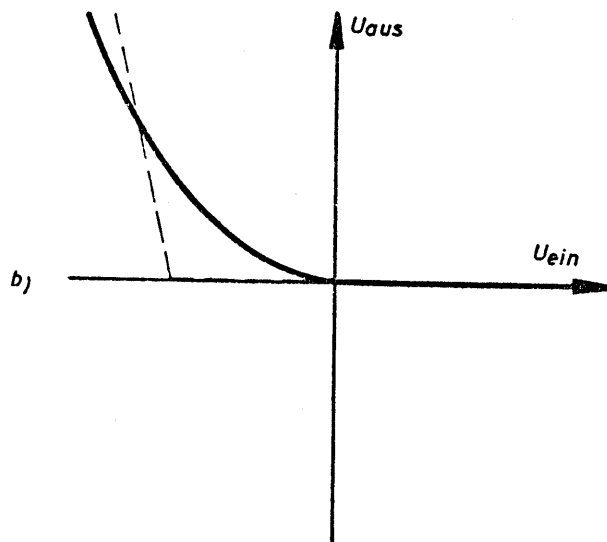
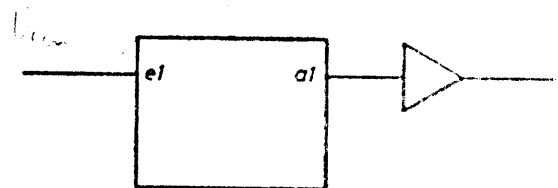
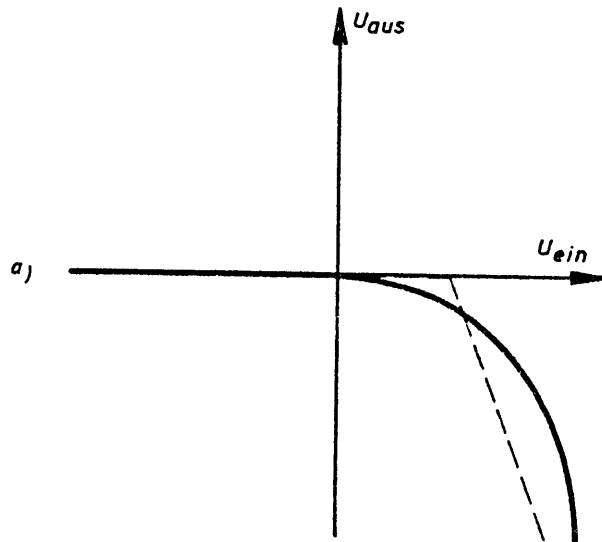


Bild 31 a, b

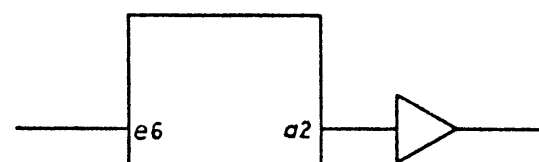
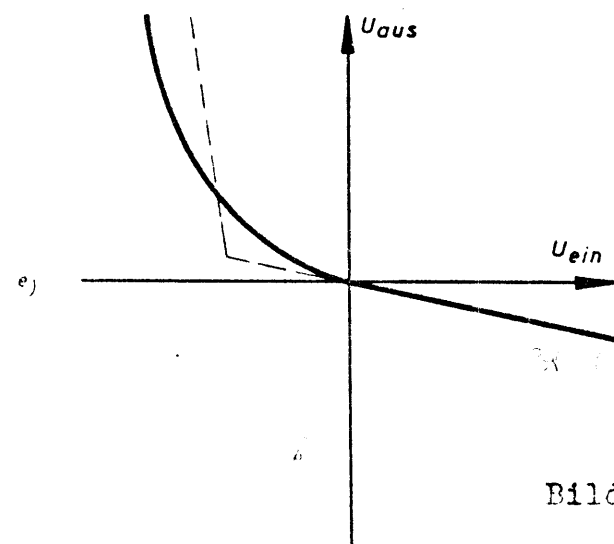
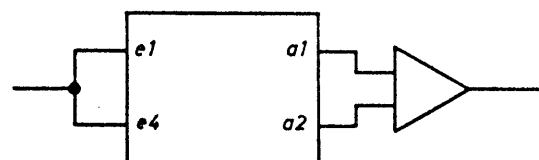
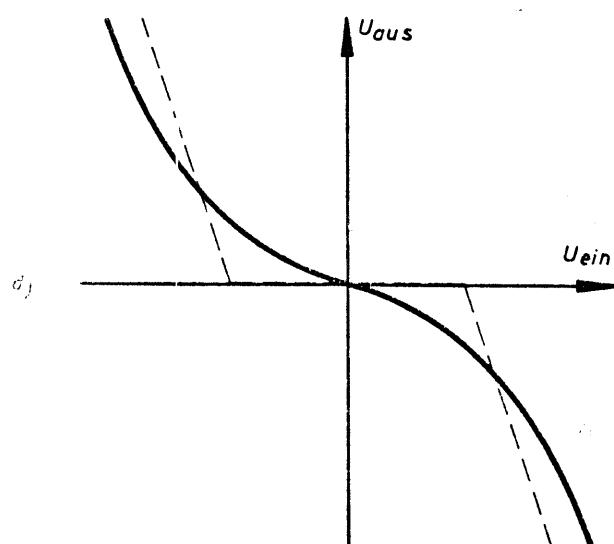
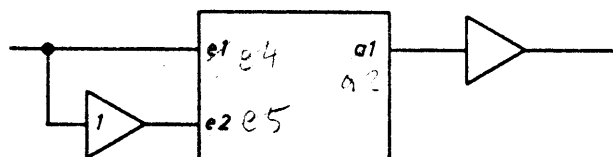
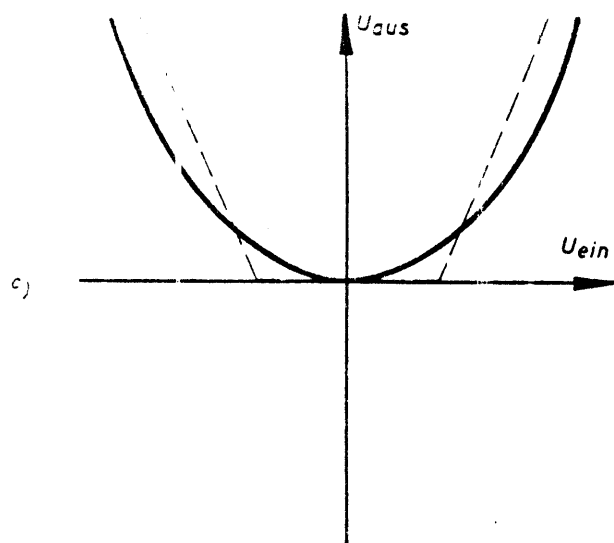


Bild 31 c, d, e

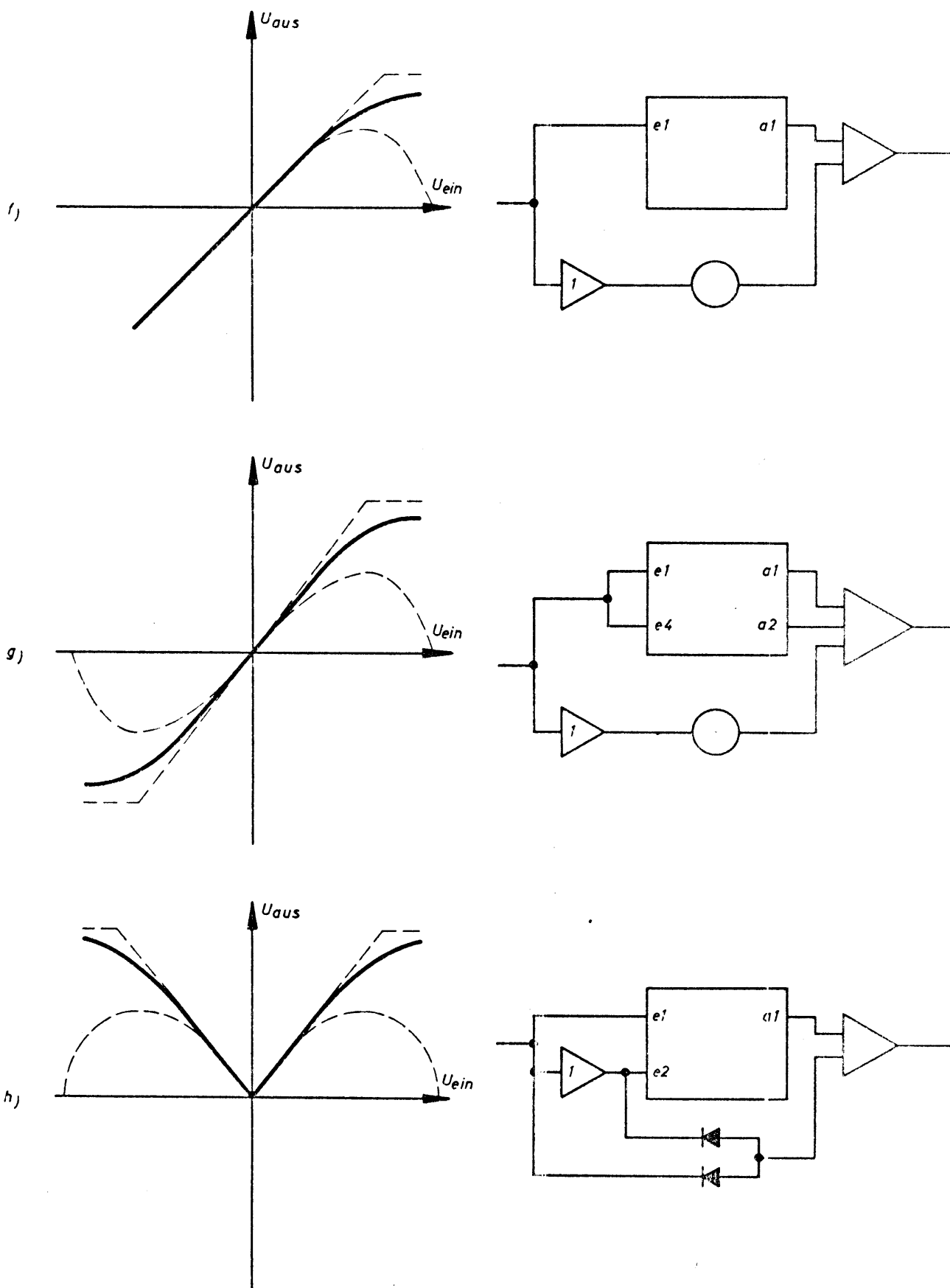


Bild 31 f, g, h.

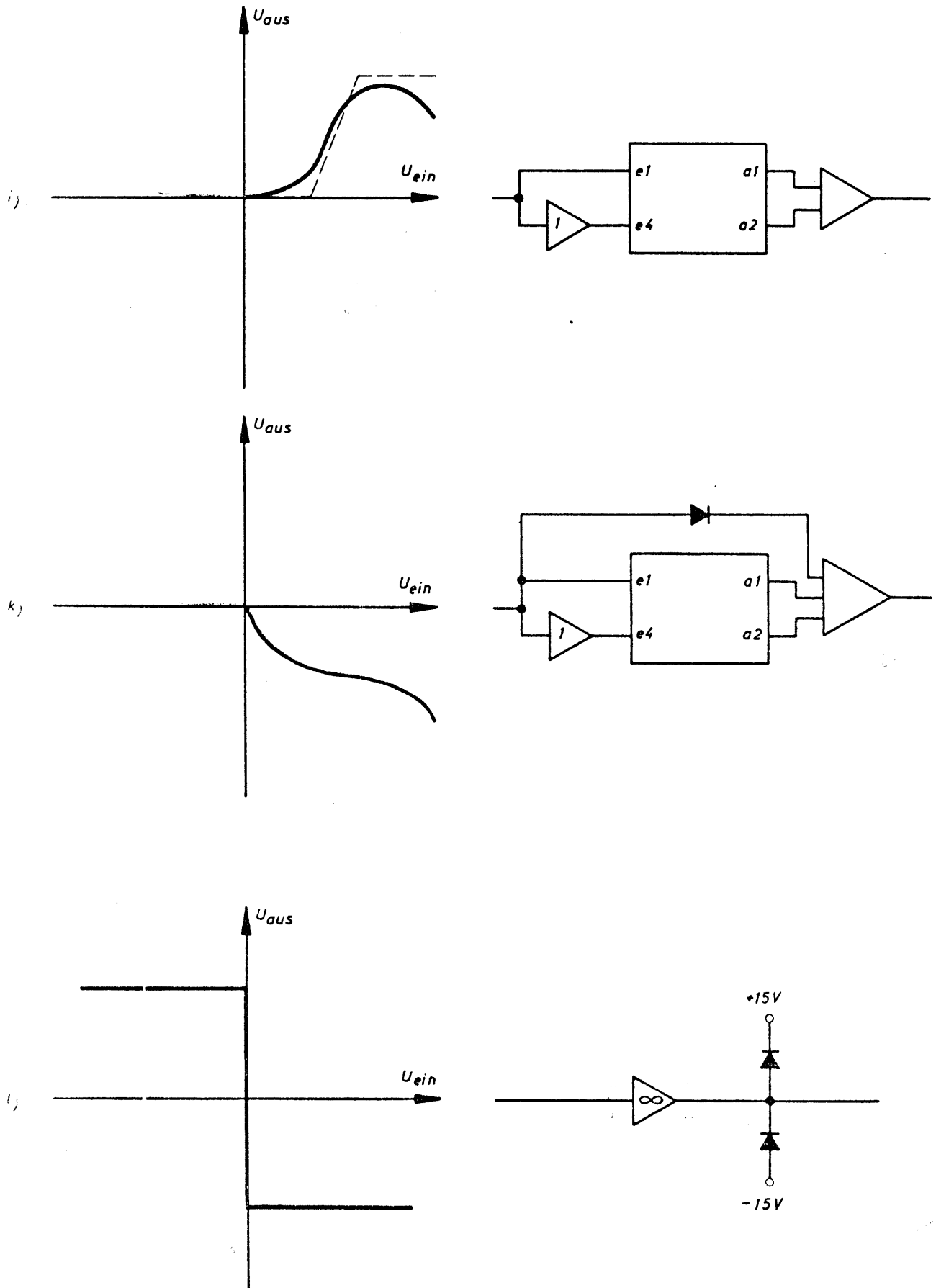


Bild 31 i, k, l

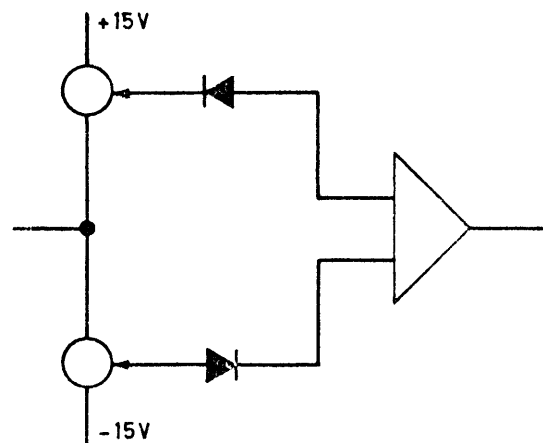
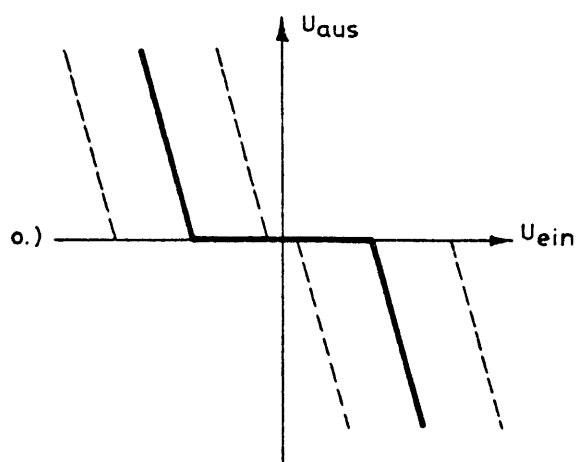
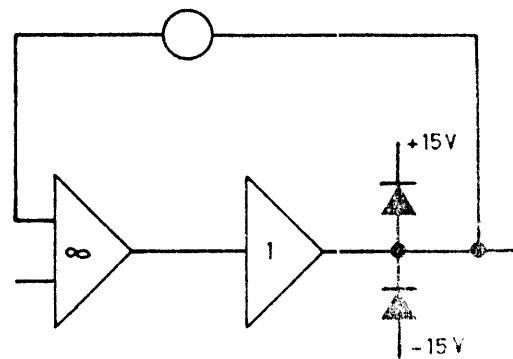
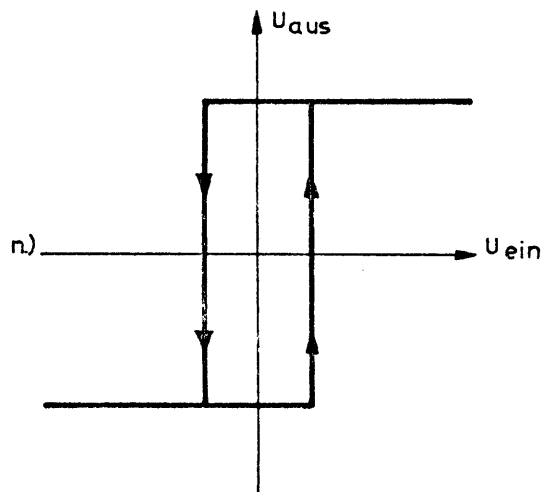
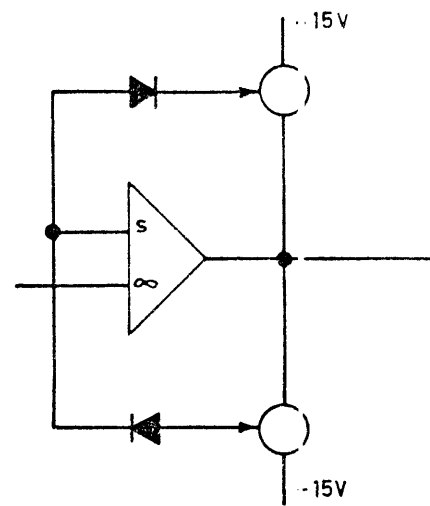
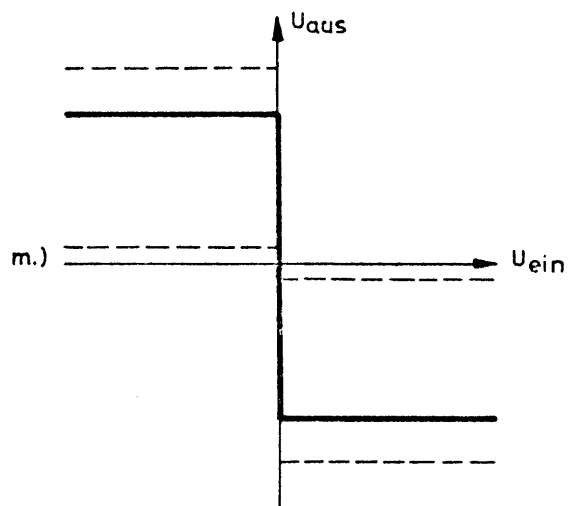


Bild 31 m, n, o: Darstellung nichtlinearer Zusammenhänge mit der Diodeneinheit.

2.47 Diodeneinheit

Die Diodeneinheit enthält 4 Halbleiterdioden, mit denen einfachenichtlineare Kurven dargestellt werden können. Außerdem enthält sie 4 Kondensatoren $K_1 \dots K_4$ von 10 n F zur Stabilisierung von in sich geschlossenen Rechenschleifen auf Summierverstärkern (vgl. 2.41, Bild 19).

In Bild 32 sind einige nichtlineare Zusammenhänge dargestellt, die sich allein mit Dioden ohne Zuhilfenahme des Funktionsbildners realisieren lassen.

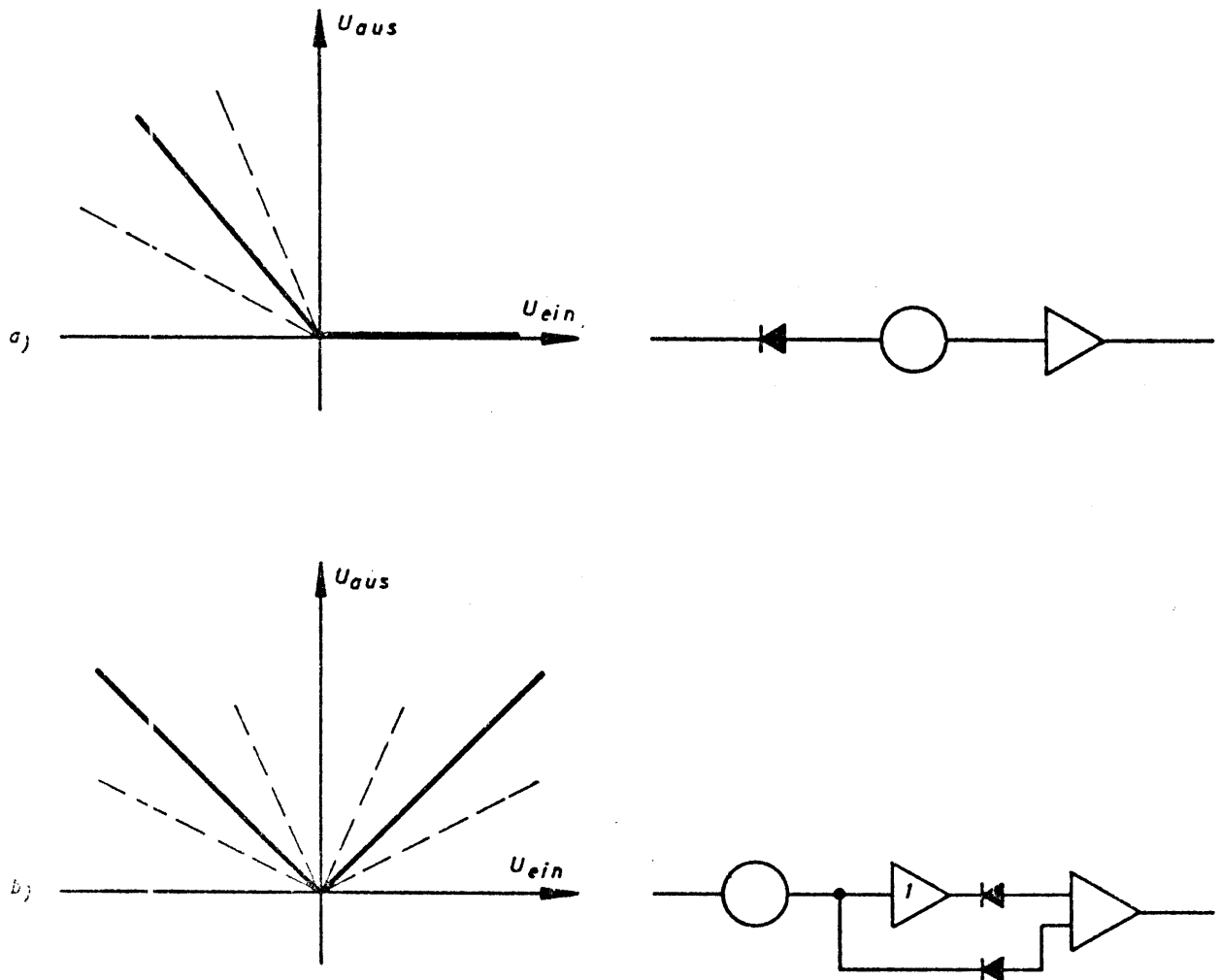


Bild 32: Realisierung nichtlinearer Zusammenhänge mit Dioden.

Der Einsatz von Diodenzur Begrenzung der Ausgangsspannung eines Verstärkers ist in Bild 31 l, m und n dargestellt.

2.48 Bedienungstafel

Die auf dem Pultvorsprung angeordnete Bedienungstafel enthält sämtliche für Bedienung und Überwachung des Analogrechners erforderlichen Elemente. (Vgl. Bild 33)

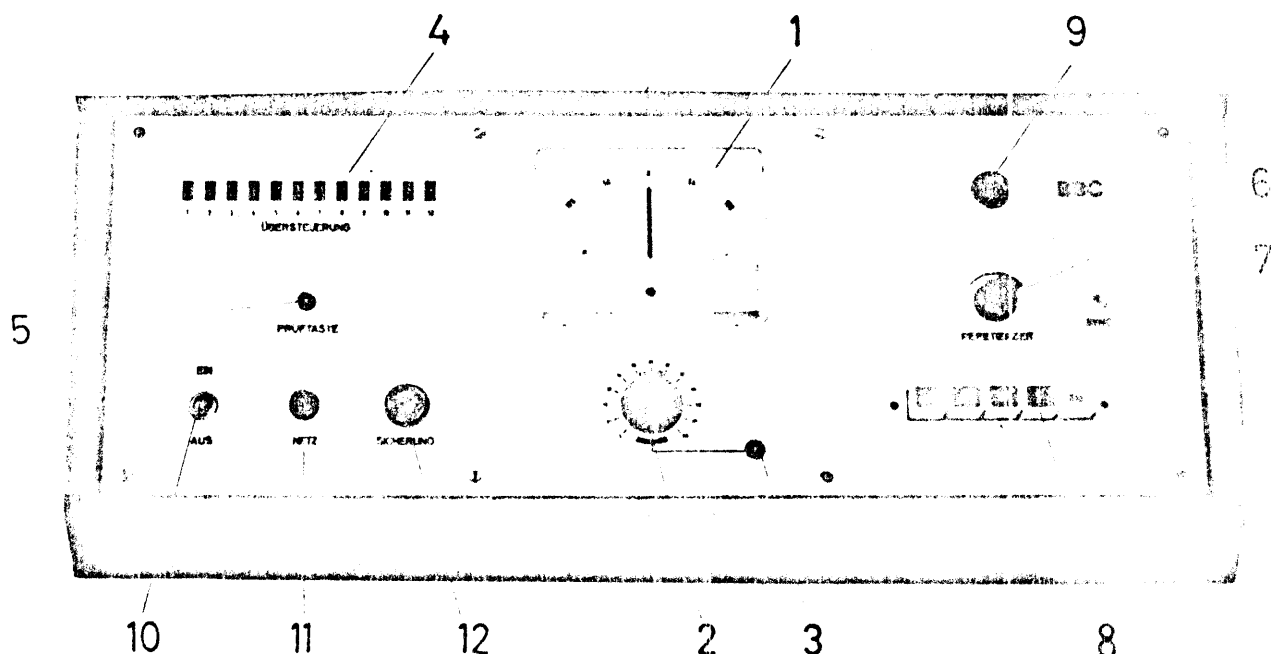


Bild 33: Bedienungstafel

2.481 Meßgerät mit Wahlschalter

Das Meßgerät "1" dient zur Messung der Rechen-Spannungen, d. h. im wesentlichen der Ausgangsspannungen der zwölf Rechenverstärker und des Multiplikators. Es ist ein Drehspulstrommesser mit einem Innenwiderstand von 300 k Ohm. Die Genauigkeit entspricht der Klasse 1. Die Skala ist in beiden Richtungen von 0 bis 100 beschriftet, wobei die Ziffer 100 einer Spannung von 15 V entspricht. Ausschlag nach rechts bedeutet positive Spannung, Ausschlag nach links negative Spannung.

Mit dem Wahlschalter "2" wird das Meßgerät mit dem betreffenden Rechenverstärker bzw. mit dem Multiplikator verbunden. In der vierzehnten Stellung wird das Gerät an eine Meßbuchse "3" gelegt, die mit Hilfe von Steckschnüren mit jeder beliebigen Buchse auf der Frontplatte verbunden werden kann.

Außer zur Messung der Rechenspannungen wird das Meßgerät auch noch zum Abgleich der Koeffizientenpotentiometer (vgl. 2.42) und zum Nullpunkt-abgleich der Rechenverstärker benutzt (vgl. 2.41)

2.482 Übersteuerungsanzeige

Links neben dem Meßgerät befinden sich 12 Spannungsindikatorröhren "4", (für jeden Rechenverstärker eine), die grün aufleuchten, wenn der betreffende Verstärker übersteuert ist, d. h. wenn seine Ausgangsspannung den Betrag von $15 \text{ V} \pm 100 \%$ überschreitet. In diesem Falle ist die Rechnung zu unterbrechen und die Ursache der Übersteuerung festzustellen.

Mit der Prüftaste "5" können die Indikatorröhren auf einwandfreies Arbeiten überprüft werden. Beim Drücken der Taste müssen sämtliche Röhren aufleuchten.

2.483 Repetiereinrichtung

Der Analogrechner ist mit einer Repetiereinrichtung ausgerüstet, die es gestattet, einen bestimmten Rechengvorgang selbsttätig beliebig oft zu wiederholen. Bei Verwendung eines nachleuchtenden Kathodenstrahloszillographen erhält man auf dem Leuchtschirm ein stehendes Bild von der Lösung der betreffenden Differentialgleichung.

Beim Drücken der Taste "Rep" (Repetieren) wird ein elektronischer Taktgeber eingeschaltet, der kurzzeitig sämtliche Relais auf den Integratoreinheiten betätigt und damit die Anfangsbedingungen auf die Integratoren schaltet und anschließend die Relais wieder abfallen läßt. Die Abfallzeit, d. h. die Rechenzeit, kann mit dem Potentiometer "6" auf der Bedienungstafel zwischen 0,7 bis 7 s stufenlos eingestellt werden, während die Rückstellzeit etwa 100 ms beträgt. An der mit "Sync." bezeichneten Buchse "7" kann ein Synchronisierungspuls für einen angeschlossenen Oszillographen entnommen werden. (Impulshöhe -24 VG, Impulsbreite ca. 100 ms, Belastbarkeit max. 1 k Ohm).

2.484 Betriebsartenwähler

Der Betriebsartenwähler "8" besteht aus einer Leuchttastenreihe mit 5 Drucktasten, mit denen die folgenden verschiedenen Betriebsarten eingestellt werden können.

Potentiometer-Abgleich (Taste P)

Wie unter 2.42 beschrieben, wird beim Niederdrücken der Taste „P“ das Meßgerät „1“ von dem gerade mit dem Wahlschalter „2“ gewählten Verstärker abgeschaltet. Zum Abgleich eines Koeffizientenpotentiometers ist der über dem Drehknopf des betreffenden Potentiometers angeordnete Drucktaster zu drücken. Dadurch wird das Potentiometer an die Referenzspannung von + 15 VG und sein Schleifer an das Meßgerät gelegt.

Verstärker-Abgleich (Taste V)

Wie unter 2.41 ausgeführt, empfiehlt es sich von Zeit zu Zeit vor Beginn einer Rechnung die Verstärker auf Ausgangsspannung Null abzugleichen. Zu diesem Zweck wird die Taste V niedergedrückt, der Wahlschalter „2“ nacheinander auf die verschiedenen Verstärker gestellt und mit dem Trimpotentiometer auf den Verstärkerfrontplatten der Nullabgleich ausgeführt.

Anfangsbedingungen (Taste AB)

Beim Niederdrücken der Taste AB werden auf sämtliche Integriereinheiten einstellbare Spannungen geschaltet (vgl. 2.43). Die Höhe dieser den Anfangsbedingungen entsprechenden Spannungen kann gemessen werden, indem man mit dem Wahlschalter „2“ das Meßgerät „1“ auf den Verstärker schaltet, mit dem die betreffende Integriereinheit verbunden ist.

Rechnen (Taste R)

Beim Niederdrücken der Taste R werden die Integriereinheiten freigegeben und der Rechenvorgang beginnt. Er dauert solange an, wie die Taste R gedrückt bleibt. Will man den Rechenvorgang von neuem beginnen, so ist kurzzeitig die Taste AB und anschließend wieder die Taste R zu drücken.

Repetieren (Taste Rep)

Bei dieser Betriebsart werden automatisch nach einer bestimmten mit Potentiometer "6" einstellbaren Rechenzeit kurzzeitig die Anfangsbedingungen aufgeschaltet und der Rechenvorgang wieder freigegeben (Vgl. 2.483)

2.485 Kuppelsteckdose

Mit Hilfe der Kuppelsteckdose "9" kann ein Zusatzgerät (das beispielsweise einige zusätzliche Rechenelemente enthalten kann) an den Rechner angeschlossen werden. Die Bedienung beider Geräte kann dann von der Bedienungstafel des Grundgerätes aus erfolgen.

2.486 Netzversorgung

Auf der Bedienungstafel unten links befinden sich der Netzschalter "10", die Netzkontrolllampe "11" und die Sicherung mit Kontrolllampe "12". Bei eingeschaltetem Gerät und intakter Sicherung brennt die Netzkontrolllampe "11". Bei eingeschaltetem Gerät zeigt die Kontrolllampe "12" eine defekte Sicherung an.

3. Programmierung des Analogrechners

3.1 Allgemeines

Analogrechner dienen, wie bereits ausgeführt, zur Lösung von Problemen, bei denen sich eine oder mehrere Größen, die sogenannten abhängigen Veränderlichen in Abhängigkeit von einer unabhängigen Veränderlichen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten ändern. Die unabhängige Veränderliche ist beim Analogrechner die Zeit, während die abhängigen Veränderlichen durch elektrische Spannungen dargestellt werden, die gegen die gemeinsame Nullschiene gemessen werden. Die Gesetzmäßigkeiten, denen die abhängigen Veränderlichen gehorchen, werden durch eine Differentialgleichung oder ein System von Differentialgleichungen beschrieben.

Die Programmierung des Analogrechners mit einem bestimmten Rechenproblem erfolgt zweckmäßigerweise in drei Schritten.

1. Aufstellung des Koppelplanes

d. h. Entwurf einer elektrischen Schaltung mit den vorhandenen Rechenelementen, die die vorgegebene Differentialgleichung des zu lösenden Problems qualitativ erfüllt.

2. Festlegung der Amplitudenmaßstäbe

d. h. der Maßstabsfaktoren zwischen den Rechenspannungen und den von ihnen dargestellten Rechengrößen.

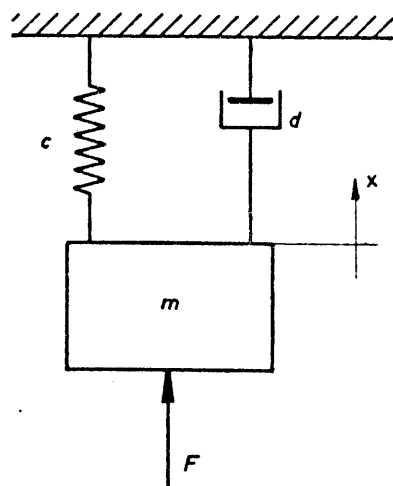
3. Festlegung des Zeitmaßstabes

d. h. des Maßstabsfaktors zwischen der Echtzeit und der Rechenzeit.

3.2 Aufstellung des Koppelplanes.

Unter dem Begriff Koppelplan versteht man eine Art Schaltplan, der die Verbindung der einzelnen Rechenelemente zu einer vollständigen Rechenschaltung aufzeigt. Die einzelnen Rechenelemente werden durch ihre Kurzzeichen dargestellt. Der Koppelplan dient als Arbeitsgrundlage, nach der die notwendigen Verbindungen zwischen den einzelnen Rechenelementen auf dem Rechner hergestellt werden. Er soll sämtliche für den Aufbau und die Kontrolle der Rechenschaltung erforderlichen Informationen enthalten. Seine Aufstellung soll an Hand eines Beispiels erläutert werden.

Gegeben sei eine lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung, die das Verhalten eines aus der Mechanik allgemein bekannten Feder-Masse-Systems mit Dämpfung darstellt, wie es in Bild 34 dargestellt ist.



c = Federkonstante

d = Dämpfung

m = Masse

F = Äußere Kraft oder "Störfunktion"

x = Auslenkung der Masse "m"

Bild 34: Schwingungsfähiges Feder-Masse-System

Die Differentialgleichung dieses Systems lautet:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + d \cdot \frac{dx}{dt} + c \cdot x = F \quad (21)$$

Zur Aufstellung des Koppelplanes formt man die Gleichung zunächst so um, daß die höchste vorkommende Ableitung auf der linken Seite und alle anderen Glieder auf der rechten Seite der Gleichung stehen.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F}{m} - \frac{d}{m} \cdot \frac{dx}{dt} - \frac{c}{m} \cdot x \quad (22)$$

Bild 35 zeigt den Aufbau des Koppelplans.

Man geht zunächst von der Voraussetzung aus, daß die links vom Gleichheitszeichen stehende zweite Ableitung $\frac{d^2x}{dt^2}$ bereits existiere und zwar am Punkt "1" in

Bild 35.

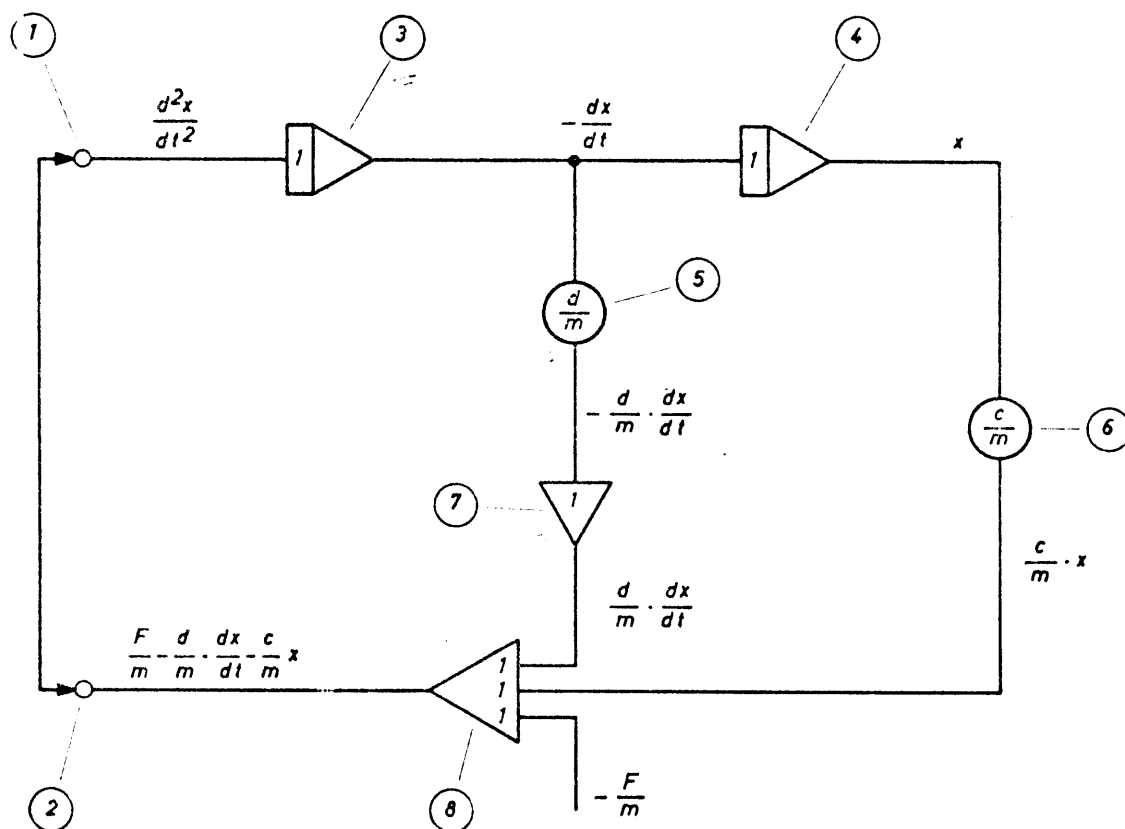


Bild 35: Koppelplan für das durch Gleichung (21) beschriebene Feder-Masse-System

Wie sie zustande kommt, soll zunächst nicht interessieren. Schaltet man die zweite Ableitung auf den Eingang eines Integrators "3", so erhält man am Ausgang dieses Integrators die erste Ableitung $\frac{dx}{dt}$ mit umgekehrtem Vorzeichen, wenn der Verstärkungsfaktor K_3 des Integrators "3" gleich eins ist. Eine weitere Integration ergibt am Ausgang des Integrators "4" die Größe x , unter der Voraussetzung, daß der Verstärkungsfaktor K_4 des Integrators "4" gleich eins ist. Die Aufgabe ist nun, die Schaltung so auszubauen, daß die Gleichung (22) erfüllt wird. Das geschieht in der Weise, daß die auf der rechten Seite der Gleichung stehende Summe zusammengestellt und, wie das Gleichheitszeichen vorschreibt, der zweiten Ableitung $\frac{d^2x}{dt^2}$ "gleichgesetzt" wird. Dieses Gleichsetzen wird durch Verbindung der Punkte "1" und "2" erreicht. Wenn die Punkte "1" und "2" direkt verbunden sind, muß die Spannung an Punkt "1", also $\frac{d^2x}{dt^2}$, zwangsläufig gleich der Spannung an Punkt "2", also gleich $\frac{F}{m} - \frac{d}{m} \cdot \frac{dx}{dt} - \frac{c}{m} \cdot x$ sein, die Schaltung erfüllt also die Gleichung.

Die Bildung der Summe auf der rechten Seite der Gleichung wird mit dem Summationsverstärker "8" vorgenommen, dessen Eingängen man die Störfunktion $-\frac{F}{m}$, sowie die Größen $\frac{d}{m} \cdot \frac{dx}{dt}$ und $\frac{c}{m} \cdot x$ zuführt. Während die Störfunktion $-\frac{F}{m}$ z. B. mit zusätzlichen Rechenelementen des Rechners erzeugt werden muß, können die beiden anderen Summanden aus der Schaltung selbst entnommen werden. Die Größe $\frac{d}{m} \cdot \frac{dx}{dt}$ wird aus der Ausgangsspannung des Integrators "3" durch Multiplikation mit dem Faktor $\frac{d}{m}$ in Potentiometer "5" und durch anschließende Vorzeichenumkehr im Verstärker "7" erhalten. Die Größe $\frac{c}{m} \cdot x$ erhält man aus der Ausgangsspannung des Inte-

grators "4" durch Multiplikation mit dem Faktor $\frac{c}{m}$ im Potentiometer "6".

In gleicher Weise wird auch bei Gleichungen niedrigeren oder höheren Grades vorgegangen. Zusammenfassend sind noch einmal die vorzunehmenden Schritte angegeben.

1. Umformung der Differentialgleichung mit dem Ziel, die höchste Ableitung isoliert auf die linke Seite der Gleichung zu bringen.
2. Annahme, diese höchste Ableitung sei bereits an einem Punkt "1" der Rechenschaltung vorhanden.
3. Bildung der auf der rechten Seite der Gleichung vorkommenden niedrigeren Ableitungen durch eine oder mehrere Integrationen.
4. Bildung der auf der rechten Seite der Gleichung stehenden Summe an einem Punkt "2" der Rechenschaltung und Gleichsetzung mit der linken Seite durch Verbindung der Punkte "1" und "2".

3.3 Festlegung der Amplitudenmaßstäbe

Die Amplitudenmaßstäbe geben das Verhältnis der im Rechner auftretenden Rechenspannungen zu den von ihnen nachgebildeten physikalischen Größen der Differentialgleichung an. Sie sind demnach dimensionsbehaftete Größen. Bezeichnet man die physikalische Größe mit x und die entsprechende Rechenspannung mit U , so gilt

$$U = a \cdot x$$

(23)

a = Amplitudenmaßstab

Soll beispielsweise in der in Bild 35 dargestellten Rechenschaltung eine Rechenspannung von $U = 15 \text{ V}$ einer Auslenkung x der Masse von 150 cm entsprechen, so ist der Amplitudenmaßstab

$$a = \frac{U}{x} = \frac{15 \text{ V}}{150 \text{ cm}} = 0,1 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

(24)

Die in diesem Dokument enthaltenen Zeichnungen sind Eigentum der Mannheimer Maschinenbau-AG. Jede Vervielfältigung oder Verbreitung ist ohne schriftliche Genehmigung der Mannheimer Maschinenbau-AG.

Da das Meßinstrument nicht in Volt, sondern in % des Vollausschlages geeicht ist, ist es zweckmäßig, die Rechenspannung ebenfalls nicht in Volt, sondern in % ihres Höchstwertes anzugeben. In diesem Fall ist dann

$$a = \frac{100 \%}{150 \text{ cm}} = 0,667 \frac{\%}{\text{cm}} \quad (25)$$

Für die Differentiale der Größe x gilt:

$$d U = a \cdot d x \quad (26)$$

$$d^2 U = a \cdot d^2 x \quad (27)$$

oder allgemein

$$d^n U = a \cdot d^n x \quad (28)$$

Bei der Festlegung der Amplitudenmaßstäbe sind zwei Gesichtspunkte zu berücksichtigen, die von größter Wichtigkeit für das Rechenergebnis sind:

1. Die Amplitudenmaßstäbe sind so zu wählen, daß unter keinen Umständen eine Übersteuerung der Rechenverstärker eintritt, d. h. die Rechenspannungen dürfen im Höchstfall den Wert $15 \text{ V} \hat{=} 100 \%$ erreichen, aber nicht überschreiten.
2. Da die Komponentengenauigkeit der Rechenelemente auf den Höchstwert der Rechenspannung, also $\pm 15 \text{ V}$ bezogen ist, sollen zur möglichst vollkommenen Ausnutzung der Genauigkeit die Rechenspannungen möglichst nahe $\pm 100 \%$ liegen.

Hat beispielsweise ein Summierverstärker eine Drift von 15 mV , so kann bei vollständiger Ausnutzung der Ausgangsspannung von $\pm 15 \text{ V}$ ein Fehler von $0,5 \%$ entstehen. Wird der Verstärker dagegen infolge schlechter Wahl des Amplitudenmaßstabes nur mit einer maximalen Ausgangsspannung von $\pm 150 \text{ mV}$ betrieben, so kann sich bereits ein Fehler von 5% einstellen.

Um die Forderungen nach möglichst hoher Aussteuerung der Verstärker bei Vermeidung einer Übersteuerung erfüllen zu können, ist es erforderlich, vor Beginn des Programmierens das Verhalten der einzelnen Rechengrößen ungefähr abzuschätzen, um zunächst einmal die geeigneten Maßstäbe festlegen zu können. Korrekturen dieser Maßstäbe können dann an Hand der Rechenergebnisse noch nachträglich ausgeführt werden.

3.4 Festlegung des Zeitmaßstabes

Der Zeitmaßstab gibt das Verhältnis zwischen der Rechenzeit (in der der zu untersuchende Vorgang auf dem Analogrechner abläuft) und der Echtzeit (in der der Vorgang wirklich abläuft) wieder. Während die Echtzeiten physikalischer Vorgänge in weiten Bereichen (µs bis Jahren) variieren können, ist die Rechenzeit eines Analogrechners aus den folgenden Gründen auf einen begrenzten Bereich festgelegt.

1. Nach unten hin ist die Rechenzeit durch die obere Grenzfrequenz der Rechenverstärker begrenzt. Mit zunehmender Frequenz zeigen die Verstärker einen Verstärkungsabfall und eine Phasendrehung, so daß das Rechenergebnis ungenauer wird.
2. Nach oben hin ist die Rechenzeit durch die Auswirkungen der Drift und durch die Tatsache begrenzt, daß die Rechenverstärker zwar eine sehr hohe, aber keine unendliche Verstärkung haben. Eine Angabe, wie lange die Rechenzeit sein darf, ohne daß ein bestimmter Fehler überschritten wird, kann allgemein nicht gemacht werden, da die maximale Rechenzeit wesentlich von der Rechenschaltung abhängig ist. Dieses soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden.

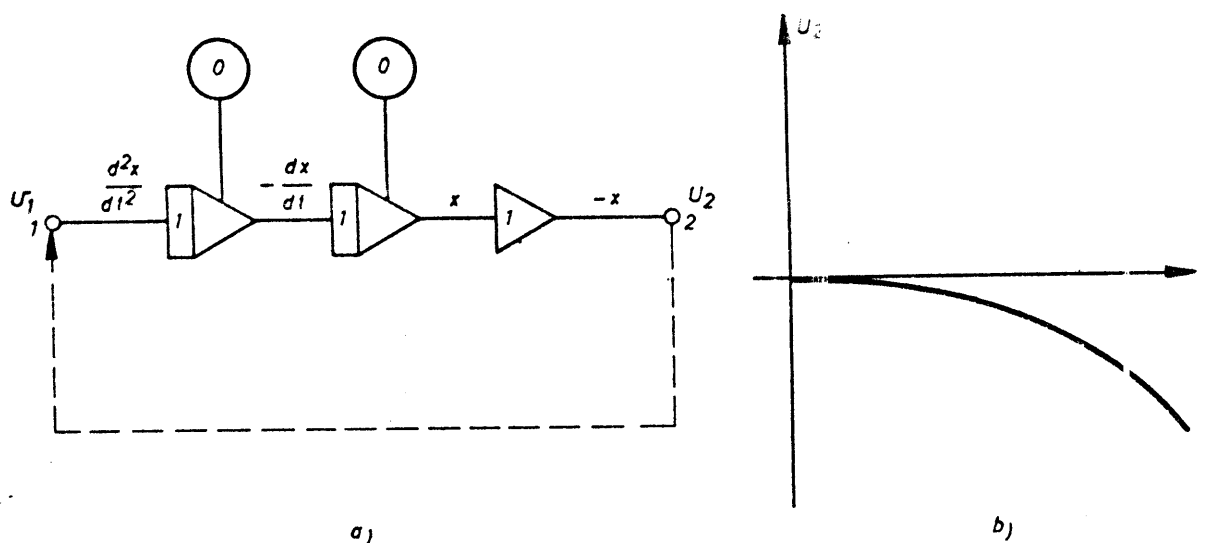


Bild 36: Beispiel einer offenen und einer geschlossenen Rechenschaltung

In Bild 36 ist eine Rechenschaltung dargestellt, die aus einer Reihenschaltung zweier Integratoren und eines Umkehrverstärkers besteht. Gibt man auf beide Integratoren die Anfangsbedingung Null und läßt anschließend die Rechnung beginnen, so soll im Idealfall noch nach unendlich langer Zeit die Ausgangsspannung U_2 Null sein, da die Eingangsspannung U_1 ebenfalls Null ist. Infolge der unvermeidlichen Drift beginnt nun beispielsweise der erste Integrator seine Ausgangsspannung langsam zu erhöhen. Diese Spannung wird vom zweiten Integrator integriert, so daß die Ausgangsspannung U_2 in relativ kurzer Zeit nach der in Bild 36 b dargestellten Kurve ansteigt. In derartigen "offenen" Schaltungen können also schon in verhältnismäßig kurzer Zeit beträchtliche Fehler auftreten.

Schließt man dagegen den Kreis, in dem man die Ausgangsklemme 2 mit der Eingangsklemme 1 verbindet, so tritt eine starke Gegenkopplung auf. Ein ungewolltes Auswandern der Spannung U_2 würde sofort auf den lin-

gang 1 zurückwirken und zwar in der Weise, daß die Spannung U_2 auf annähernd Null festgehalten wird. Die Ausgangsspannung kann auch über beliebig lange Zeiten nur um einige Millivolt, nämlich um die Drift der Verstärker von ihrem Sollwert abweichen.

Zwischen diesen beiden extremen Schaltungen gibt es je nach der Stärke der Gegenkopplung beliebig viele Zwischenzustände. Der Zeitmaßstab ist also von Fall zu Fall nach der jeweiligen Rechenschaltung auszuwählen. Er wird außerdem noch durch die verwendeten Auswertgeräte bestimmt. Man wird beispielsweise bei Verwendung eines nachleuchtenden Kathodenstrahloszillographen mit relativ kurzer Repetierzeit rechnen (1 s bis 7 s), während man bei Verwendung eines Koordinatenschreibers mit Rücksicht auf die Trägheit dieses Gerätes die Vorgänge langsamer ablaufen lassen wird.

Entsprechend Formel (23) gilt für den Zeitmaßstab

$$\tau = z \cdot t \quad (29)$$

Dabei bedeuten τ = Rechenzeit

t = Echtzeit

z = Zeitmaßstab

Da sowohl τ als auch t Zeiten sind, ist z eine dimensionslose Größe.

Aus (29) ergibt sich

$$d\tau = z \cdot dt \quad (30)$$

$$d\tau^2 = z^2 \cdot dt^2 \quad (31)$$

oder allgemein

$$d\tau^n = z^n \cdot dt^n \quad (32)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (26), (27), (28) und (30),

(31), (32) läßt sich die Differentialgleichung (21) in die sogenannte Maschinengleichung umschreiben, die als abhängige Variable die Rechenspannung U und ihre Ableitungen und als unabhängige Variable die Rechenzeit τ enthält.

$$\frac{z^2}{a} \cdot \frac{d^2 U}{d\tau^2} = \frac{F}{m} - \frac{d}{m} \cdot \frac{z}{a} \cdot \frac{dU}{d\tau} - \frac{c}{m} \cdot \frac{1}{a} \cdot U \quad (33)$$

oder

$$\frac{d^2 U}{d\tau^2} = \frac{a}{z^2} \cdot \frac{F}{m} - \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{dU}{d\tau} - \frac{c}{m} \cdot \frac{1}{z^2} \cdot U \quad (34)$$

3.5 Beispiel einer vollständigen Programmierung

Das unter 3.2 aufgeführte Feder-Masse-System soll nun nach den unter 3.3 und 3.4 beschriebenen Gesichtspunkten programmiert werden.

Folgende Zahlenwerte seien gegeben.

$$m = 6000 \frac{\text{Kp} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}} \quad (35)$$

$$d = 300 \frac{\text{Kp} \cdot \text{s}}{\text{cm}} \quad (36)$$

$$c = 150 \frac{\text{Kp}}{\text{cm}} \quad (37)$$

Das System werde um 45 cm aus der Ruhelage ausgelenkt und dann freigegeben d. h. es gelten folgende Anfangsbedingungen

$$x_0 = 45 \text{ cm} \quad (38)$$

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_0 = 0 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (39)$$

Eine äußere Störfunktion soll nicht auftreten, d. h.

$$F = 0 \quad (40)$$

Um die Amplitudenmaßstäbe festlegen zu können, ist zunächst ungefähr abzuschätzen, welche Höchstwerte die abhängigen Veränderlichen, also die Auslenkung x , die Geschwindigkeit $\frac{dx}{dt}$ und die Beschleunigung $\frac{d^2x}{dt^2}$ annehmen können. Vom Moment der Freigabe führt die Masse m eine Sinusschwingung aus, deren Amplitude infolge der Dämpfung d langsam abnimmt. Die Größe x bleibt also im Verlauf der Rechnung immer unter ihrem Anfangswert x_0 . Man kann demnach den Amplitudenmaßstab für U so wählen, daß 45 cm Auslenkung 100 % der Rechenspannung entsprechen.

$$a = \frac{U}{x} = \frac{100 \%}{45 \text{ cm}} = 2,22 \frac{\%}{\text{cm}} \quad (41)$$

Die Anfangsbedingung für den Integrator "4" ist

$$U_0 = 100 \%$$

Die Ableitungen der Rechenspannung errechnen sich nach den Gleichungen (26) und (30) bzw. (27) und (31) wie folgt:

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{a}{z} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (42)$$

$$\frac{d^2U}{d\tau^2} = \frac{a}{z^2} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (43)$$

Unter der Annahme, daß x eine ungedämpfte Sinusschwingung mit der Kreisfrequenz ω ausführt, gilt

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{\max} = \omega \cdot x_{\max} \quad (44)$$

$$\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)_{\max} = \omega^2 \cdot x_{\max} \quad (45)$$

Die Maximalwerte der ersten und zweiten Ableitung der Rechenspannung sind also

$$\left(\frac{dU}{d\tau}\right)_{\max} = \frac{a}{z} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)_{\max} = \frac{a}{z} \cdot \omega \cdot x_{\max} \quad (46)$$

$$\left(\frac{d^2U}{d\tau^2}\right)_{\max} = \frac{a}{z^2} \cdot \left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)_{\max} = \frac{a}{z^2} \cdot \omega^2 \cdot x_{\max} \quad (47)$$

Die wirklich auftretenden Maximalwerte sind infolge der vernachlässigten Dämpfung etwas kleiner.

Nächste Aufgabe ist nun die Bestimmung der Koeffizienten der Rechenschaltung. Diese sind nach Festlegung der Amplitudenmaßstäbe und des Zeitmaßstabes nicht mehr frei wählbar, sondern ergeben sich aus folgenden teilweise schon bekannten Forderungen

1. Die Koeffizienten sind so zu wählen, daß die Maschinen-Verstärker möglichst weit ausgesteuert aber nicht übersteuert werden.
2. Das Produkt der Koeffizienten in einer Masche der Rechenschaltung muß mit den betreffenden Koeffizienten der Maschinengleichung übereinstimmen.

Forderung 1 führt zu den folgenden drei Festimmungsgleichungen:

Am Ausgang des Integrators "4" liegt die Rechenspannung U , die nach (23) gleich $a \cdot x$ ist. Ihr Höchstwert soll gleich 100 % sein, also ist

$$U_{\max} = a \cdot x_{\max} \hat{=} 100 \% \quad (48)$$

Die Eingangsspannung des Integrators "4", gleichzeitig Ausgangsspannung des Integrators "3", ist nach (26) und (30)

$$\frac{1}{K_4} \cdot \frac{dU}{dt} = \frac{1}{K_4} \cdot \frac{a}{z} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (49)$$

Ihr Maximalwert soll ebenfalls gleich 100 % sein. Nach (44) ist also

$$\frac{1}{K_4} \cdot \frac{a}{z} \cdot \omega \cdot x_{\max} \approx 100 \% \quad (50)$$

Die Eingangsspannung des Integrators "3", gleichzeitig Ausgangsspannung des Summierverstärkers "8" ist nach (27) und (31)

$$\frac{1}{K_3 \cdot K_4} \cdot \frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{1}{K_3 \cdot K_4} \cdot \frac{a}{z^2} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (51)$$

Ihr Maximalwert soll ebenfalls gleich 100 % sein. Nach (45) ist demnach

$$\frac{1}{K_3 \cdot K_4} \cdot \frac{a}{z^2} \cdot \omega^2 \cdot x_{\max} \approx 100 \% \quad (52)$$

Forderung 2 liefert zwei weitere Bestimmungsgleichungen für die Rechenkoeffizienten. Damit die Schaltung die Maschinengleichung (34) erfüllt, muß in jeder Masche das Produkt der Koeffizienten gleich dem Koeffizienten des betreffenden Teils der Maschinengleichung sein. Die aus dem Integrator "3", dem Potentiometer "5", dem Umkehrverstärker "7" und dem Summierverstärker "8" gebildete Masche, erfüllt in der Maschinengleichung (34) die Teilgleichung

$$\frac{d^2 U}{dt^2} = - \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (53)$$

BROWN, SOVIN & CIE ANGEZEIGTE FÜR MANNHEIM

Da die Verstärker "7" und "8" den Verstärkungsfaktor 1 haben, gilt also

$$k_3 \cdot k_5 = \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{z} \quad (34)$$

In ähnlicher Weise erhält man durch Auswertung der aus den Integratoren "3" und "4", dem Potentiometer "6" und dem Summierverstärker "8" gebildeten Masche die letzte Bestimmungsgleichung

$$K_3 \cdot K_4 \cdot k_6 = \frac{c}{m} \cdot \frac{1}{z^2} \quad (35)$$

Aus diesen 5 Bestimmungsgleichungen können nun die Koeffizienten ermittelt werden.

Gleichung (48) liefert die Größe des Amplitudenmaßstabes a , wie bereits in (41) dargestellt.

$$a = \frac{U_{\max}}{x_{\max}} = \frac{100 \%}{45 \text{ cm}} = 2,22 \frac{\%}{\text{cm}} \quad (46)$$

Die Koeffizienten K_3 und K_4 (Verstärkungsfaktoren der Integratoren "3" und "4") können nur die Werte 1 s^{-1} oder 10 s^{-1} annehmen, wenn man nicht noch zusätzliche Potentiometer vor die Integratoren schalten will. Da a , ω und $x_{\max}$ gegeben sind, legt man nach Gleichung (50) mit K_4 gleichzeitig den Zeitmaßstab z fest. Wählen wir

$$K_4 = 10 \text{ s}^{-1} \quad (57)$$

so ergibt sich der Zeitmaßstab aus Gleichung (50) zu

$$z = \frac{a \cdot \omega \cdot x_{\max}}{K_4 \cdot 100 \%} = \frac{2,22 \cdot \frac{\%}{\text{cm}} \cdot 0,158 \text{ s}^{-1} \cdot 45 \text{ cm}}{10 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \%} = 0,0158 \quad (58)$$

Wobei sich ω aus der bekannten Formel

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} = \sqrt{\frac{150 \frac{kp}{cm}}{6000 \frac{kp s^2}{cm}}} = 0,158 s^{-1} \quad (59)$$

errechnet.

Der Faktor K_3 kann aus Gleichung (52) bestimmt werden.

$$K_3 = \frac{a \cdot \omega^2 \cdot x_{\max}}{z^2 \cdot 100\% \cdot K_4}$$

$$= \frac{100\% \cdot 0,158^2 s^{-2} \cdot 45 cm}{45 cm \cdot 0,0158^2 \cdot 100\% \cdot 10 s^{-1}} = 10 s^{-1} \quad (60)$$

Gleichung (54) liefert den Koeffizienten k_5

$$K_5 = \frac{d}{m} \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{k_3} = \frac{300 \cdot \frac{kp s}{cm}}{6000 \cdot \frac{kp s^2}{cm} \cdot 0,0158 \cdot 10 s^{-1}} = 0,317 \quad (61)$$

und Gleichung (55) den Koeffizienten K_6

$$K_6 = \frac{c}{m \cdot z^2 \cdot K_3 \cdot K_4} = \frac{150 \frac{kp}{cm}}{6000 \frac{kp s^2}{cm} \cdot 0,0158^2 \cdot 10 s^{-1} \cdot 10 s^{-1}} = 1 \quad (62)$$

Damit sind sämtliche Koeffizienten bestimmt und die Aufstellung des vollständigen Koppelplanes ist abgeschlossen.

Die Schwingungsfrequenz auf dem Rechner beträgt in diesem Fall

$$f_r = \frac{\omega}{2\pi} \cdot \frac{1}{z} = \frac{0,158 \text{ s}^{-1}}{2\pi \cdot 0,0158} = 1,59 \text{ Hz}$$

Ist eine niedrigere Schwingungsfrequenz erwünscht, beispielsweise wenn ein mechanischer Schreiber als Auswertgerät benützt wird, so können die Verstärkungsfaktoren K_3 und K_4 gleich 1 s^{-1} gemacht werden.

In diesem Fall ist dann nach (50)

$$z = \frac{2,22 \frac{\%}{\text{cm}} \cdot 0,158 \text{ s}^{-1} \cdot 45 \text{ cm}}{1 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 100 \%} = 0,158 \quad (64)$$

und die Schwingungsfrequenz auf dem Rechner

$$f_r = \frac{0,158 \text{ s}^{-1}}{2\pi \cdot 0,158} = 0,159 \text{ Hz} \quad (65)$$

Noch langsamere Schwingungen können durch Vorschalten von Potentiometern vor die Integratoren "3" und "4" erzielt werden.

Literaturhinweise1 C. A. Korn und Th. M. Korn:

Electronic Analog Computers

Mc. Graw-Hill Book Company, New York 1952

2 C. L. Johnson:

Analog Computer Techniques

Mc. Graw-Hill Book Company, New York 1956

3 D. Ernst:

Elektronische Analogrechner

R. Oldenbourg-Verlag, München 1960

Inhaltsverzeichnis

1. Grundsätzliche Wirkungsweise elektronischer Analogrechner

1.1 Anwendungsbereich	Seite	1
1.2 Grundoperationen	"	3
1.21 Rechenverstärker	"	3
1.22 Summation	"	5
1.23 Integration	"	6
1.24 Koeffizientenpotentiometer	"	17
1.3 Multiplikation und Division zweier veränderlicher Spannungen	"	10
1.4 Bildung nichtlinearer Zusammen- hänge	"	19

2. Beschreibung des EDC-Tischanalogrechners

2.1 Gesamtaufbau	"	24
2.2 Elektrische Daten	"	27
2.21 Anschlußwerte	"	27
2.22 Grundbestückung	"	28
2.23 Signalniveau	"	31
2.3 Mechanische Daten	"	32
2.4 Rechenelemente	"	33
2.41 Rechenverstärker	"	33
2.42 Koeffizientenpotentiometer	"	37
2.43 Integriereinheiten	"	38
2.44 Referenzspannungseinheit	"	41
2.45 Multiplikator	"	43
2.46 Funktionsgenerator	"	45
2.47 Diodeneinheit	"	57
2.48 Bedienungstafel	"	58

3. Programmierung des Analogrechners

3.1 Allgemeines	Seite 63
3.2 Aufstellung des Koppelplanes	" 64
3.3 Festlegung der Amplitudenmaßstäbe	" 67
3.4 Festlegung des Zeitmaßstabes	" 69
3.5 Beispiel einer vollständigen Programmierung	" 72
Literatur	" 79