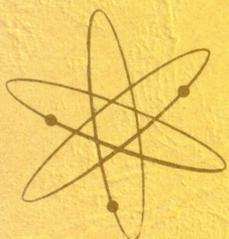
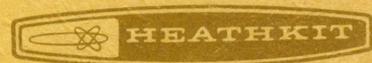


HEATHKIT®

Bedienungsanleitung



SCHUL- ANALOGRECHNER

MODELL EC - 1 - E

Farbschlüssel für Widerstände und Kondensatoren

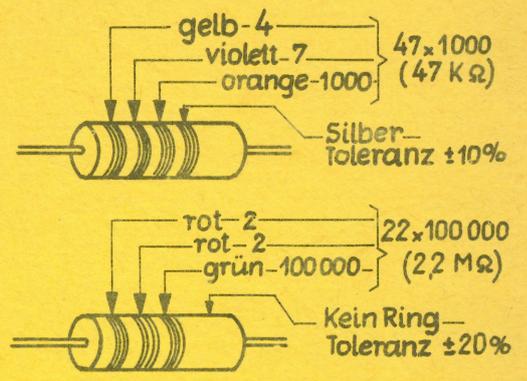
Widerstände

Die Farbringe, die auf den Widerständen angebracht sind, drücken dessen Widerstandswert aus.

Farbe	Kode		Multiplikator
	1. Stelle	2. Stelle	
schwarz	0	0	1
braun	1	1	10
rot	2	2	100
orange	3	3	1.000
gelb	4	4	10.000
grün	5	5	100.000
blau	6	6	1.000.000
violett	7	7	10.000.000
grau	8	8	100.000.000
weiss	9	9	1.000.000.000
gold			0,1
silber			0,01



Beispiele



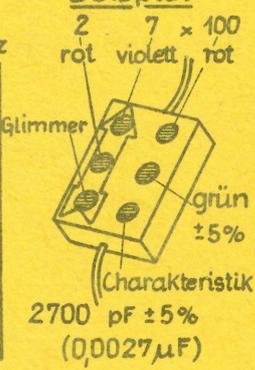
Kondensatoren

Normalerweise sind nur Glimmer und keramische Kleinkondensatoren farbkodiert. Der hier gebrachte Farbkode entspricht dem EIA Standard (Electronics Industries Association). Abweichungen können je nach Hersteller auftreten.

Glimmer

Farbe	Kode		Multiplikator	Toleranz
	1. Stelle	2. Stelle		
schwarz	0	0	1	±20
braun	1	1	10	—
rot	2	2	100	±2
orange	3	3	1.000	±3
gelb	4	4	10.000	—
grün	5	5	—	±5
blau	6	6	—	—
violett	7	7	—	—
grau	8	8	—	—
weiss	9	9	—	—
gold			0,1	—
silber			0,01	±10

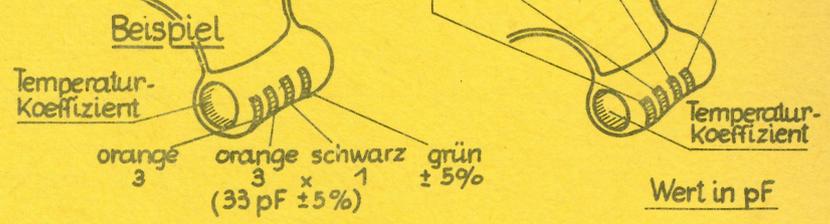
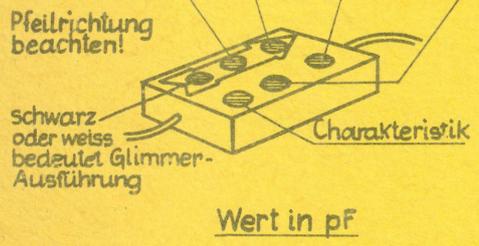
Beispiel



Keramik

Reihenfolge von links nach rechts, beginnend beim Punkt für den Temperatur-Koeffizient.

Farbe	Kode		Multiplikator	Toleranz	Temperatur-Koeffizient	
	1. Stelle	2. Stelle			± pf unter 10pF	±% über 10pF
schwarz	0	0	1	±20	±20	
braun	1	1	10	±0,1	±1	
rot	2	2	100	—	±2	
orange	3	3	1.000	—	±2,5	
gelb	4	4	10.000	—	—	
grün	5	5	—	±0,5	±5	
blau	6	6	—	—	—	
violett	7	7	—	—	—	
grau	8	8	—	±0,25	—	
weiss	9	9	—	±1,0	±10	

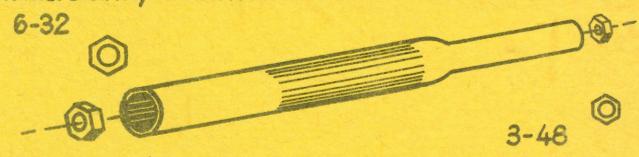


Bemerkungen

Weitere Eigenschaften (Temperatur-Koeffizient, Isolations-Widerstand) können dem EIA Standard RS 153 und RS 198 entnommen werden.

- 1 μF = 0,000001 Farad
- 1 nF = 0,001 μF = 1000 pF
- 1 pF (μμF) = 0,0001 nF = 0,000001 μF

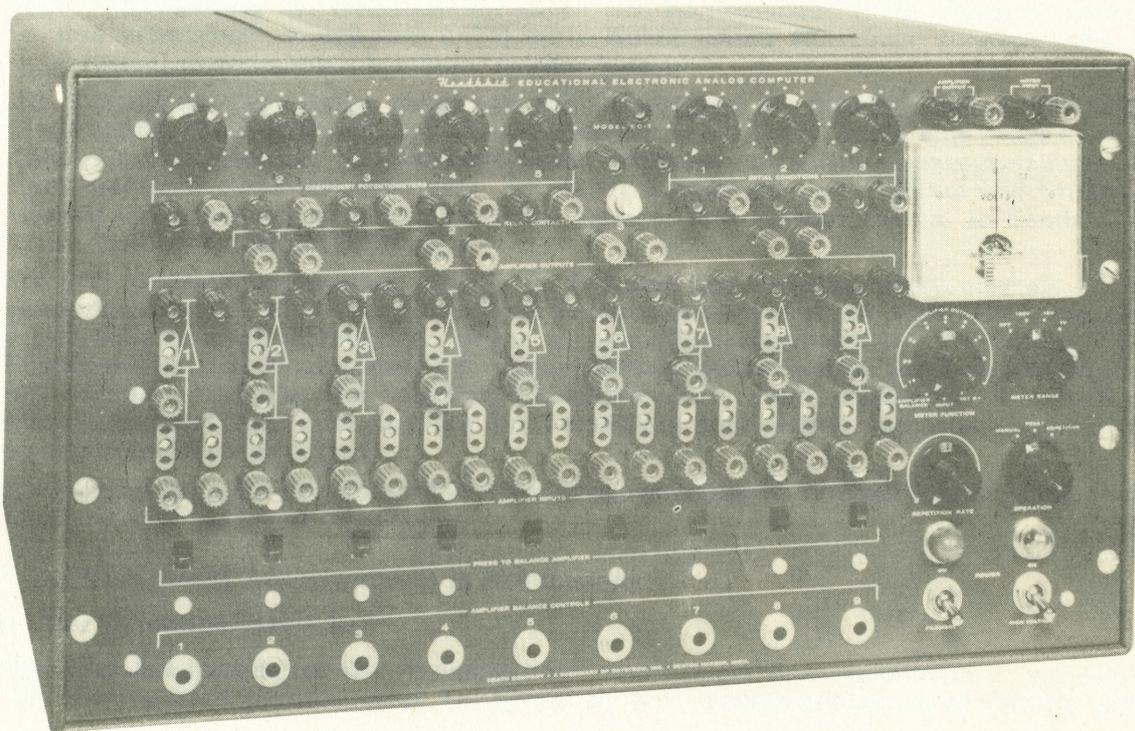
Um an versteckten Stellen Muttern auf kurze Gewinde aufzudrehen können Sie das beigefügte Kunststoffrohr verwenden, und zwar für die Mutter 3/16" und 1/4" Nr. 3-48 und 6-32. Dazu drücken Sie das entsprechende Ende des Kunststoffschlüssels über die betreffende Mutter, die dann von dem dehnbaren Kunststoff festgehalten wird. Selbstverständlich ist das Werkzeug nur zum Aufdrehen der Mutter auf die ersten Gewindegänge geeignet.



Bedienungsanleitung

SCHUL- ANALOGRECHNER

MODELL EC - 1 - E



Technische Daten

9 Gleichspannungs-Operationsverstärker, durch steckbare Elemente als Integrator, Addierer und Inverter schaltbar.

Verstärkung: ca. 1000, Ausgang. ± 60 Volt an 100 kOhm, Frequenzgang: — 1 dB bei 600 Hz, Drift: ± 5 mV am Eingang,

5 Koeffizienten-Potentiometer (100 kOhm),

3 variable, erdfreie, stabilisierte Spannungen für die Anfangsbedingungen;

Triggerrelais mit 4 Ruhekontakten, Multivibrator für repetierende Messungen von 0,1 bis 15 Hz;

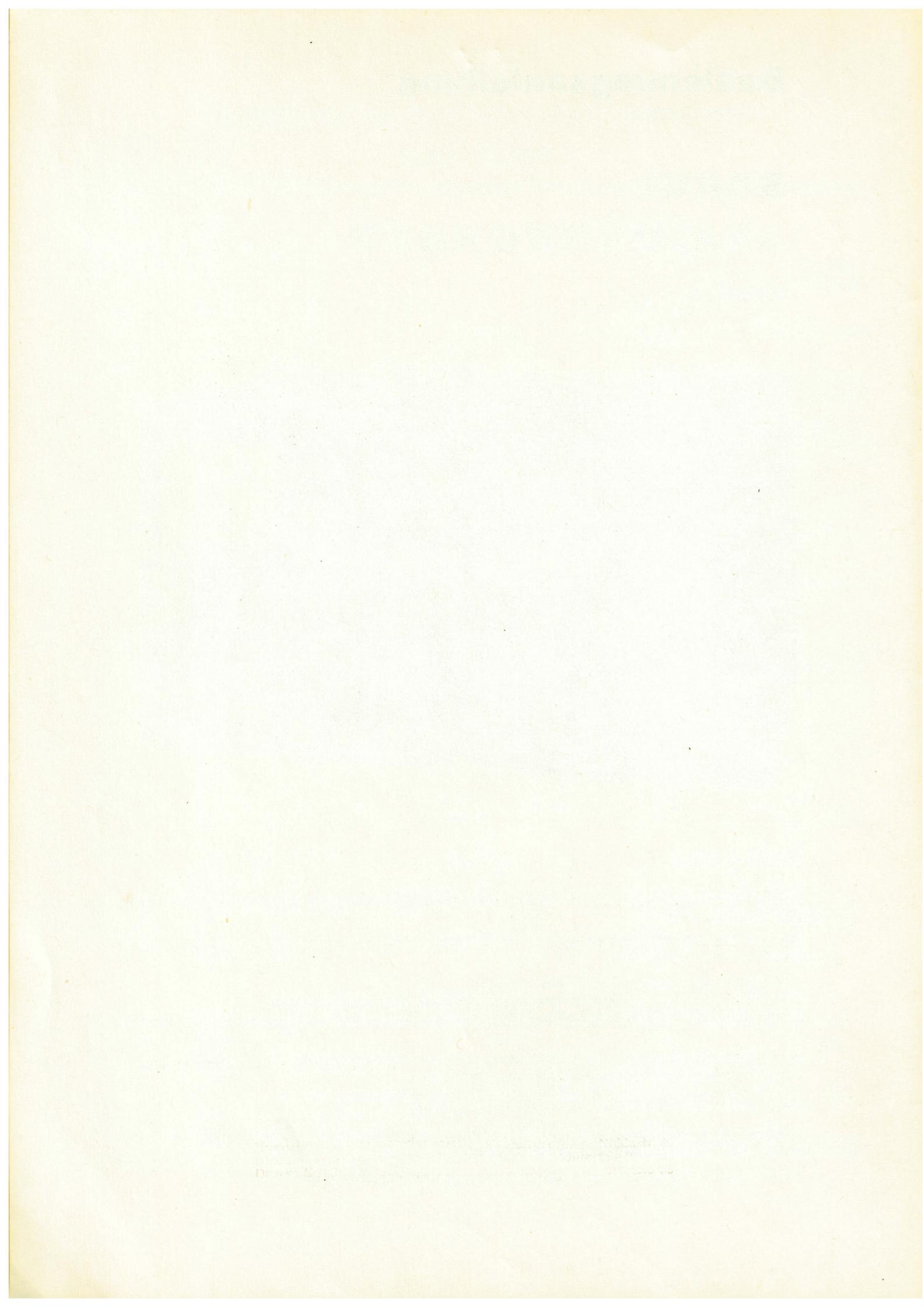
Anzeigensinstrument: 50-0-50 μ A, schaltbar auf die Verstärkerausgänge, als Betriebsspannungskontrolle und zum Balancieren der Verstärker.

Stromversorgung durch elektronisch stabilisiertes Netzgerät;

Netzanschluß: 110/220 Volt / 50—60 Hz / 100 Watt.

Abmessungen: 500×290×380 mm, Gewicht: 18 kg, Zubehör: Rechenwiderstände und Kondensatoren, Stöpselschnüre sowie 2 Si-Dioden.

Als Sichtgerät eignet sich unser Gleichspannungsoszillograph Modell OR-1.



1. Der Schulanalogrechner EC-1-E

Analogrechner dienen zur Berechnung mathematischer, physikalischer und technischer Probleme, vornehmlich zur Berechnung von Größen, die sich in Abhängigkeit von der **Zeit** ändern und bei denen sich diese Abhängigkeit in Form einer **Differentialgleichung** mathematisch darstellen läßt. Analogrechner **simulieren** das vorliegende Problem, indem sie ein physikalisches System bilden, das den gleichen Gesetzen gehorcht. Die unabhängige Veränderliche bleibt dabei die **Zeit**, gegebenenfalls in gedehntem oder verkürztem Maßstab.

Beim elektronischen Analogrechner werden die abhängigen Veränderlichen durch elektrische Spannungen dargestellt. Die Koeffizienten werden durch Spannungsteiler eingestellt, Verstärker dienen zur Vorzeichenumkehr, zur Addition und zur Integration. Mit Hilfe von Dioden, Multiplikatoren und Funktionsgebern lassen sich auch nichtlineare Probleme untersuchen, deren Differentialgleichung mathematisch in geschlossener Form nicht lösbar sind.

Die Veränderlichen lassen sich in ihrem zeitlichen Verlauf mit Spannungsmessern, mit dem Kathodenstrahloszillografen oder mit Linienschreibern beobachten und registrieren. Durch Veränderung der Koeffizienten lassen sich nacheinander viele Lösungen beobachten und aufzeichnen, so daß auch unbekannte Koeffizienten für einen vorgegebenen Lösungsverlauf experimentell bestimmt werden können.

Die Genauigkeit der Lösung hängt von der Genauigkeit der Schaltglieder — Verstärker, Widerstände, Kondensatoren, Spannungsteiler usw. — ab. Sie ist damit eine Frage des technischen Aufwandes. Der Schulanalogrechner verzichtet auf höchste Genauigkeit zugunsten eines niedrigen Anschaffungspreises. Er eignet sich sowohl zum Studium und Unterricht als auch zur Untersuchung zahlreicher Schwingungs- und Regelprobleme, in Sonderfällen bis zu Problemen achter Ordnung.

Die neun Operationsverstärker des EC - 1 - E lassen sich als Integratoren oder als Addierverstärker schalten. Fünf fein einstellbare Potentiometer dienen zur Wahl der Konstanten, drei erdunabhängige Spannungen stehen als Anfangsbedingungen zur Verfügung. Vier Relaiskontakte dienen zum Start des Lösungsablaufs: wahlweise von Hand oder repetierend mit wählbarer Periode. Das eingebaute Meßinstrument dient einmal zur Kontrolle der Betriebsspannung und zum Abgleich der Verstärker, zum andern zur Spannungsmessung an den Verstärkerausgängen.

Als Zubehör zum EC - 1 - E ist ein Gleichspannungszillograf erforderlich, empfohlen wird die Type OR - 1 - E von Daystrom.

2. Die Theorie des Analogrechners in Kurzfassung*)

2.1 Der Operationsverstärker

Die Operationsverstärker der Analogrechner sind Gleichspannungsverstärker mit hohem Verstärkungsgrad (Symbol Abb. 1). Eingangs- und Ausgangsspannungen werden gegen

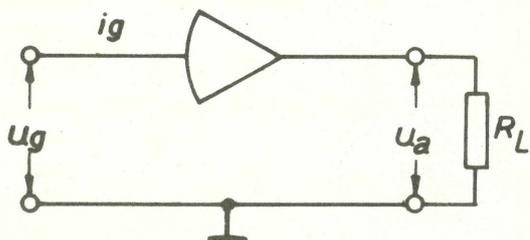


Abbildung Nr. 1 Symbol des Gleichspannungsverstärkers

Masse (Bezugspotential 0) gemessen. Die Masseverbindungen werden aber meist bei den symbolischen Schaltungsdarstellungen nicht gezeichnet. Bei der Eingangsspannung u_g folgt beim Verstärkungsgrad V die Ausgangsspannung

$$u_a = -V \cdot (u_g \pm u_d)$$

u_d ist die Driftspannung. Sie wird zu Beginn der Messungen auf $u_d = 0$ abgeglichen, so daß nun gilt:

$$u_a = -V \cdot u_g$$

Das Minuszeichen bedeutet, daß der Verstärker das Vorzeichen umkehrt. Der Verstärkungsgrad V beträgt beim EC - 1 - E etwa 1000, bei großen Anlagen bis zu 10^8 und nimmt bei höheren Frequenzen aus Stabilitätsgründen ab. Der Eingangsstrom (Gitterstrom) i_g der Verstärkers ist im allgemeinen vernachlässigbar.

*) Zu weiterführenden Studien sei lediglich verwiesen auf: Dietrich Ernst: Elektronische Analogrechner München 1960; dort auch weitere Literatur.

2.2 Der Operationsverstärker als Addierverstärker und Inverter

Der Verstärker wird mit einem Eingangswiderstand R_e und einem Gegenkopplungswiderstand R_g beschaltet (Abb. 2 und 3). Mit $i_g = 0$ muß dann der Strom durch R_e gleich dem Strom durch R_g sein:

$$\frac{u_e - u_g}{R_e} = \frac{u_g - u_a}{R_g}$$

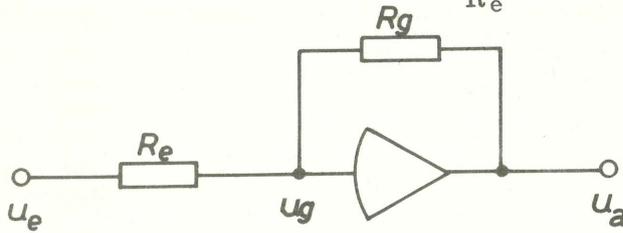


Abbildung Nr. 2 Schaltung des Inverters

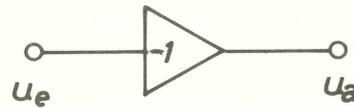


Abbildung Nr. 3 Symbol für einen beschalteten Inverter

Unter Berücksichtigung von (1a) folgt nach Umstellung:

$$u_a = -u_e \cdot \frac{R_g}{R_e - (R_e - R_g)/V}$$

Da V sehr groß ist, kann man das zweite Glied im Nenner vernachlässigen und schreiben:

$$u_a = -u_e \cdot R_g/R_e$$

Der Fehler beträgt bei dem häufigen Fall $R_e = R_g$ beim EC 1 mit $V = 1000 \text{ } 1/00$. Es ist üblich, für R_e und R_g die Werte $1 \text{ M}\Omega$ oder $0,1 \text{ M}\Omega$ zu wählen. Damit kehrt der Verstärker das Vorzeichen um (Inverter) und multipliziert mit einem konstanten Faktor 0,1 bzw. 1 oder 10.

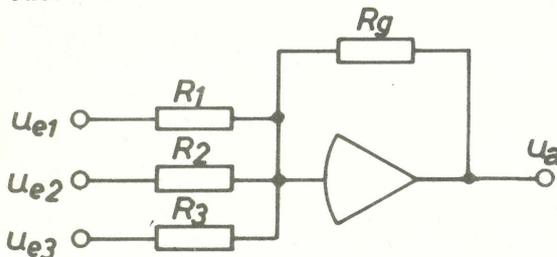


Abbildung Nr. 4 Schaltung des Addierverstärkers

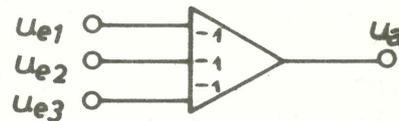


Abbildung Nr. 5 Addierverstärker, vereinfachtes Symbol (für $R_1 = R_2 = R_3 = R_g$)

Will man mehrere Spannungen addieren, so schaltet man diese über je einen Eingangswiderstand R_1, R_2 usw. (Abb. 4 und 5). Bildet man wieder die Summe der Ströme im Knotenpunkt:

$$\frac{u_1 - u_g}{R_1} + \frac{u_2 - u_g}{R_2} + \frac{u_3 - u_g}{R_3} + \frac{u_4 - u_g}{R} = 0$$

und stellt um so folgt mit $u_g = -u_a/V$:

$$u_a = -u_1 \frac{R_g}{R_1(1+\epsilon)} - u_2 \frac{R_g}{R_2(1+\epsilon)} - u_3 \frac{R_g}{R_3(1+\epsilon)}$$

wobei ist:

$$\epsilon = \frac{R_g}{V} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

Vernachlässigt man wiederum ϵ , so bildet der Verstärker die Summe:

$$u_a = -a \cdot u_1 - b \cdot u_2 - c \cdot u_3$$

$$\text{mit } a = R_g/R_1 \quad b = R_g/R_2 \quad c = R_g/R_3$$

Der Fehler beträgt hier wieder mit $V = 1000$ für gleiche Widerstände $0,4 \text{ } 0/0$.

2.3 Der Operationsverstärker als Integrator

Schaltet man an Stelle eines Widerstandes einen Kondensator C_g in den Gegenkopplungszweig, so wird der Verstärker zum Integrator. Mit einer Eingangsspannung u_e (Abb. 6 und 7) gilt:

$$(u_e - u_g)/R_e - \frac{d}{dt}(u_a - u_g) \cdot C_g = 0$$

Abbildung Nr. 6

Schaltung des Integrators

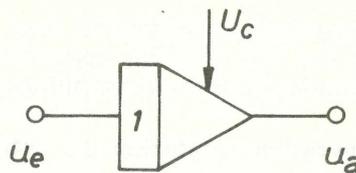
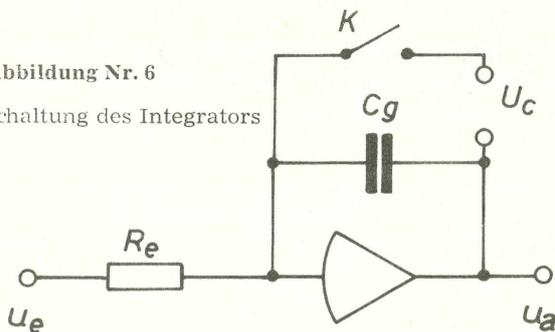


Abbildung Nr. 7 Vereinfachtes Symbol des Integrators mit $R_e \cdot C_g = 1$ Sekunde

Hieraus folgt nach Integration unter Vernachlässigung der Glieder $u_g = -u_a/V$:

$$u_a = - \frac{1}{R_e \cdot C_g} \int_0^t u_e \cdot dt - U_c$$

U_c ist dabei die Integrationskonstante, das ist diejenige Spannung, auf die der Kondensator C_g zu Beginn der Integration aufgeladen war. Der Zeitpunkt $t = 0$ ist dabei durch die Öffnung des Relaiskontaktes K gegeben. Die Spannung U_c darf nicht mit Masse verbunden sein. Ohne die Schaltung von K funktioniert die Schaltung nicht! Ist $U_c = 0$, wird K direkt mit beiden Anschlüssen von C_g verbunden.

Das Produkt $R_e \cdot C_g$ hat die Dimension einer Zeit: Es gibt diejenige Zeit an, für die mit $U_c = 0$; $u_a = -u_e$ ist.

Die Integration über mehrere Spannungen ermöglicht die Schaltung (Abb. 8 und 9), bei

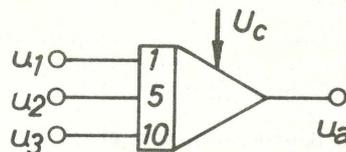
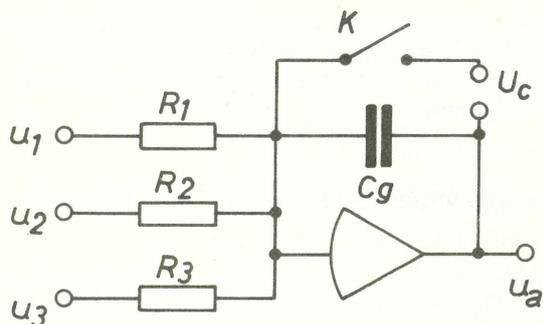


Abbildung Nr. 9 Integrator, vereinfachtes Symbol mit $R_1 \cdot C_g = 1$ Sekunde
 $R_2 \cdot C_g = 5$ Sekunden
 $R_3 \cdot C_g = 10$ Sekunden

Abbildung Nr. 8 Schaltung eines Integrators über mehrere Spannungen

der mehrere Eingänge mit den Widerständen R_1, R_2, R_3 geschaltet sind. Unter Vernachlässigung von u_g gilt:

$$u_a = - \int_0^t (a \cdot u_1 + b \cdot u_2 + c \cdot u_3) dt + U_c$$

$$\text{mit } a = 1/R_1 \cdot C_g \quad b = 1/R_2 \cdot C_g \quad c = 1/R_3 \cdot C_g$$

Die Komponenten R und C_g wählt man wieder dekadisch: R zu 0,1 oder 1 $M\Omega$, C_g zu 0,1 oder 1 μF . Die Zeitkonstante 0,01 s = 0,1 $M\Omega \cdot 0,1 \mu F$ ist dabei möglichst zu vermeiden. In Sonderfällen ist auch die Zeitkonstante 10 s = 10 $M\Omega \cdot 1 \mu F$ zugelassen.

Die Fehler durch Vernachlässigung von $1/V$ bleiben, wie eine Abschätzung der vollständigen Gleichung zeigt, unter $1^{\circ}/_{\infty}$. Bei längeren Integrationszeiten macht sich jedoch die Driftspannung u_d bemerkbar und ergibt einen Fehler, der sich besonders bei mehrfacher Integration störend bemerkbar macht. Bei einfacher Integration über die Zeit t ergibt sich eine Vergrößerung der Driftspannung um den Faktor $t/R_e \cdot C_g$, z. B. bei der gebräuchlichen Zeitkonstante $R \cdot C = 1$ Sekunde ergibt sich nach 1 Minute Integrationszeit der Faktor 60! Bei längerer Integrationszeit ist daher die Driftspannung besonders sorgfältig zu kompensieren.

Eine weitere Fehlermöglichkeit liegt in der nicht ausreichenden Isolation des Kondensators und der ihm parallel liegenden Teile der Schaltung. Daher dürfen nur sehr hochwertige Kondensatoren Verwendung finden.

2.4 Der Operationsverstärker als Differentiator

Durch Schaltung eines Eingangskondensators C_e und eines Gegenkopplungswiderstandes R_g wird der Verstärker zum Differenzglied (Abb. 10 u. 11). Unter Vernachlässigung von u_g läßt sich aus der Knotenpunktgleichung

$$C_e \cdot \frac{du_e}{dt} - u_a/R_g = 0$$

die Beziehung bilden:

$$u_a = -C_e \cdot R_g \cdot \frac{du_e}{dt}$$

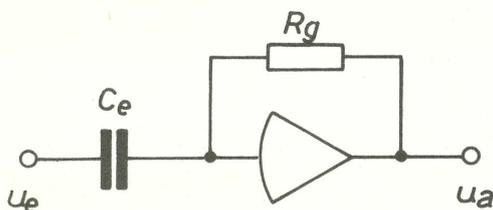


Abbildung Nr. 10 Schaltung des Differentiators

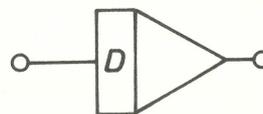


Abbildung Nr. 11 Symbol des Differentiators

Da die Differentiation „aufraut“, das heißt, höhere Frequenzen proportional zu ω verstärkt, werden Störspannungen, insbesondere auch Brumm und Unstetigkeiten bei der Differentiation stark vergrößert, so daß man meist auf die Differentiationsschaltung verzichtet und versucht, sie durch eine Integration zu ersetzen.

2.5 Die Multiplikation mit einer Konstanten

Das einfachste Multiplikationsglied ist der Spannungsteiler (Abb. 12 u. 13). Der ein-

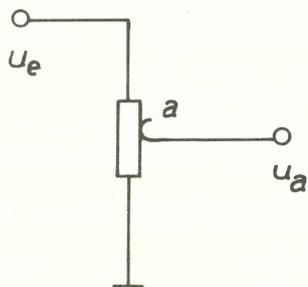


Abbildung Nr. 12 Spannungsteiler, Faktor $a \leq 1$

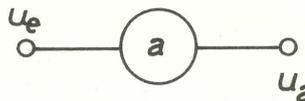


Abbildung Nr. 13 Symbol für Spannungsteiler, Faktor $a \leq 1$

gestellte Faktor ist natürlich stets kleiner als 1. Infolge der Belastung des Potentiometers durch die angeschlossenen Rechenwiderstände ist a nicht dem Einstellwinkel proportional. a muß daher mit einem hochohmigen Spannungsmesser bestimmt werden.

Faktoren größer als 1 ermöglicht die Schaltung eines nachfolgenden Verstärkers mit z. B. $R_g/R_e = 10$ (Abb. 14 u. 15).

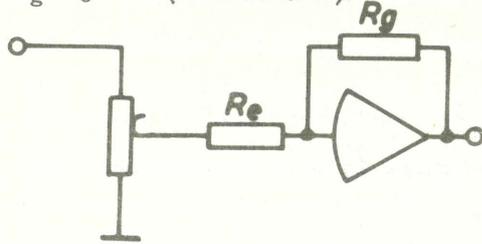


Abbildung Nr. 14 Spannungsteiler mit Verstärker, Beschaltung

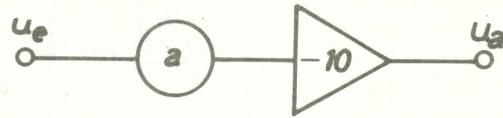


Abbildung Nr. 15 Symbol für Spannungsteiler mit Verstärker ($u_a = -10a \cdot u_e$)

Eine andere Möglichkeit, einen Faktor einzustellen, zeigt Abb. 16. Mit dem am Verstär-

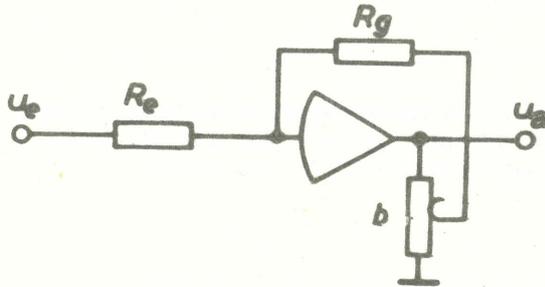


Abbildung Nr. 16 Verstärker mit Spannungsteiler im Gegenkopplungsweig

kerausgang geschalteten Potentiometer wird nur der Teil b der Ausgangsspannung von R_g zurückgeführt:

$$u_a = -u_e \frac{R_e}{b \cdot R_g} \text{ mit } b \leq 1$$

Beliebige Faktoren lassen sich mit einem erdfreien Potentiometer einstellen, dessen erste Hälfte $a \cdot R_p$ als R_e und dessen zweite Hälfte $(1-a) \cdot R_p$ geschaltet ist (Abb. 17):

$$u_a = -\frac{a}{(1-a)} \cdot u_e \quad 0 < a < 1$$

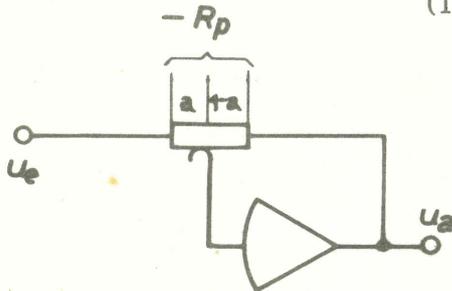


Abbildung Nr. 17 Verstärker mit Spannungsteiler als Eingangs- und Gegenkopplungswiderstand

Die Einstellung der Faktoren erfolgt stets mit einem Spannungsmesser oder durch Kompensation mit einem geeichten Spannungsteiler. Die Messung erfolgt in der Rechenschaltung, d. h. mit der endgültigen Belastung durch die Rechenwiderstände.

2.6 Nichtlineare Probleme

Die Multiplikation zweier Veränderlicher erfordert einen erheblichen Aufwand an Schaltungsmitteln. Die zur Zeit am Markt befindlichen Multiplikatoren kosten das Mehrfache des ganzen Schul-Analogrechners. Die Verwendung solcher Multiplikatoren mit dem EC 1 ist zwar möglich, aber wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Für die Darstellung empirischer Funktionen dienen Funktionsgeneratoren. Mit diesen Geräten lassen sich Funktionen beliebiger Art, z. B. x^3 , $\sin x$ oder die Hystereseschleife, darstellen.

Sehr viele in der Anwendungstechnik bedeutsame, nicht analytische Funktionen, wie Anschläge, Reibung, Lose, Hysterese usw., lassen sich in einfacher Weise durch Dioden darstellen. Die beiden, dem EC beigegebenen Silizium-Dioden sind dazu besonders geeignet, da sie über eine hohe Spannungsfestigkeit in Sperrichtung verfügen. Für den kleinen Spannungsbereich zwischen $+ 0,1 \text{ V}$ und $+ 0,4 \text{ V}$ ist der Stromanstieg exponentiell.

Zwei Beispiele sollen die Anwendung der Diode erläutern: Schaltet man die Diode parallel zu R_g (Abb. 18), so wirkt R_g nur in einer Richtung. In der anderen Richtung

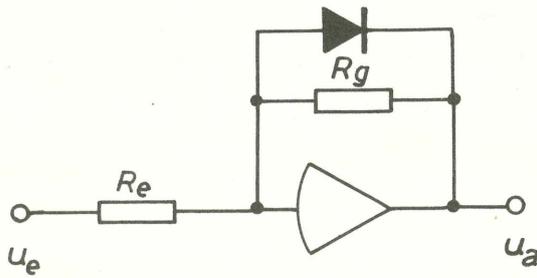


Abbildung Nr. 18 Diode im Gegenkopplungsweig

wirkt nur der kleine Durchlaßwiderstand der Diode. Die Ausgangsspannung ergibt sich zu:

$$u_a = 0 \quad \text{für positive } u_e$$

$$u_a = -u_e \cdot R_g/R_e \quad \text{für negative } u_e$$

Abb. 19 zeigt die Schaltung als Begrenzer, Abb. 20 die Wirkung dieser Schaltung. Auf eine Ableitung sei verzichtet. Auch der exponentielle Stromanstieg läßt sich zur Darstellung der Exponentialfunktionen oder des Logarithmus ausnutzen.

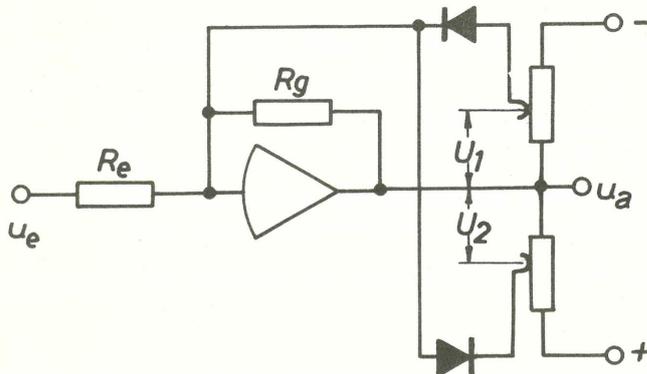


Abbildung Nr. 19 Begrenzerschaltung

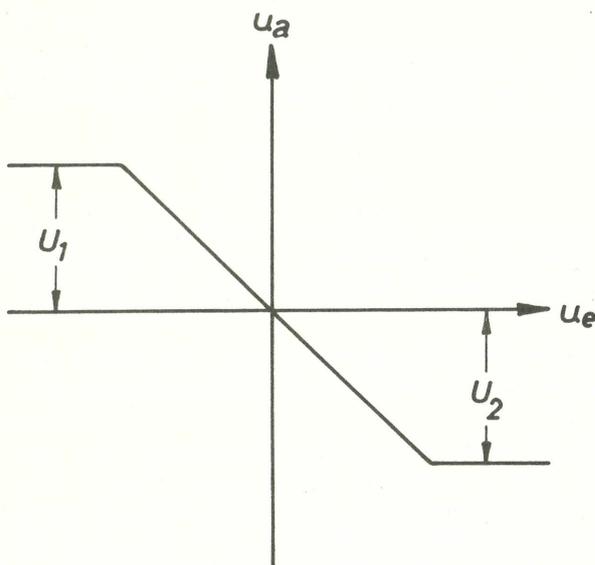


Abbildung Nr. 20 Wirkung der Begrenzerschaltung

3. Aufbau und Schaltung des Schulanalogrechners EC-1-E

3.1 Anschlüsse und Bedienungselemente

Der Schul-Analogrechner EC 1 wiegt 17,6 kg und ist in einem Stahlblechgehäuse von 495 mm × 400 mm × 290 mm anschlussfertig eingebaut. Der Anschluß an das Wechselstromnetz 220 V 50 Hz erfolgt über einen Schutzkontaktstecker, die Leistungsaufnahme beträgt 100 Watt. Die vordere Frontplatte trägt die Anschlüsse der 9 Verstärker sowie alle Bedienungsknöpfe und das Meßgerät (Ansicht Seite 1, Ansichtzeichnung als Beilage 1). Links oben sind 5 Koeffizientenpotentiometer (100 k Ω , linear). Unter jedem Potentiometer befinden sich zwei Buchsen: oberer Anschluß rot, Abgriff schwarz. Der untere Anschluß liegt an Masse. Rechts davon schließen sich drei Einstellknöpfe für 3 stabilisierte, voneinander völlig unabhängige 0... 100 V einstellbare Spannungen an. Diese haben keine Verbindung mit Masse und dienen zur Einstellung der Anfangsbedingungen der Integratoren (INITIAL CONDITIONS, IC). Unter den Knöpfen kann die Spannung abgenommen werden: rote Klemme plus, schwarze Klemme minus. Auf der rechten Seite der Frontplatte befindet sich das Meßinstrument, ein Drehspulgerät mit Nullpunkt Mitte, einer Skala von 100 .. 0 .. 100 mit dem Stromverbrauch $\pm 50 \mu\text{A}$. Darüber liegen die Anschlußklemmen, darunter die beiden Bedienungsschalter: Funktionsschalter und Meßbereichwähler. Darunter liegt der Betriebsschalter: RESET — Rückstellung, MANUAL — 1 × Rechnen, REPETITIVE — periodisch rechnen. Die Periode wird mit dem Drehknopf „REPETITIVE RATE“ zwischen 0,06 und 10 Sekunden (rechts) stetig eingestellt.

Rechts unten befinden sich die Netzschalter mit den Kontrolllampen.

Die vier Relaiskontakte (Ruheschaltung) sind in der zweiten Buchsenreihe von oben zugänglich. Darunter liegen die Anschlüsse und Bedienungselemente der Operationsverstärker.

3.2 Die Operationsverstärker

Die Haupterfordernisse eines guten Operationsverstärkers sind hohe Verstärkung und geringe Drift. Mit nur einer Verbundröhre (6U8) wurden diese beim EC 1-E verwirklicht (Schaltung Abb. 21). Die Penthode ist mit sehr hohem Außenwiderstand be-

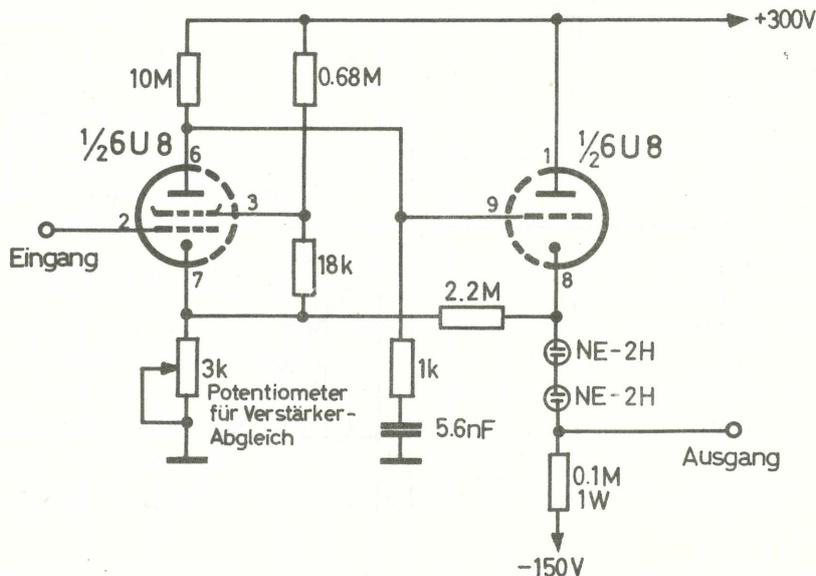


Abbildung Nr. 21 Schaltbild des Operationsverstärkers

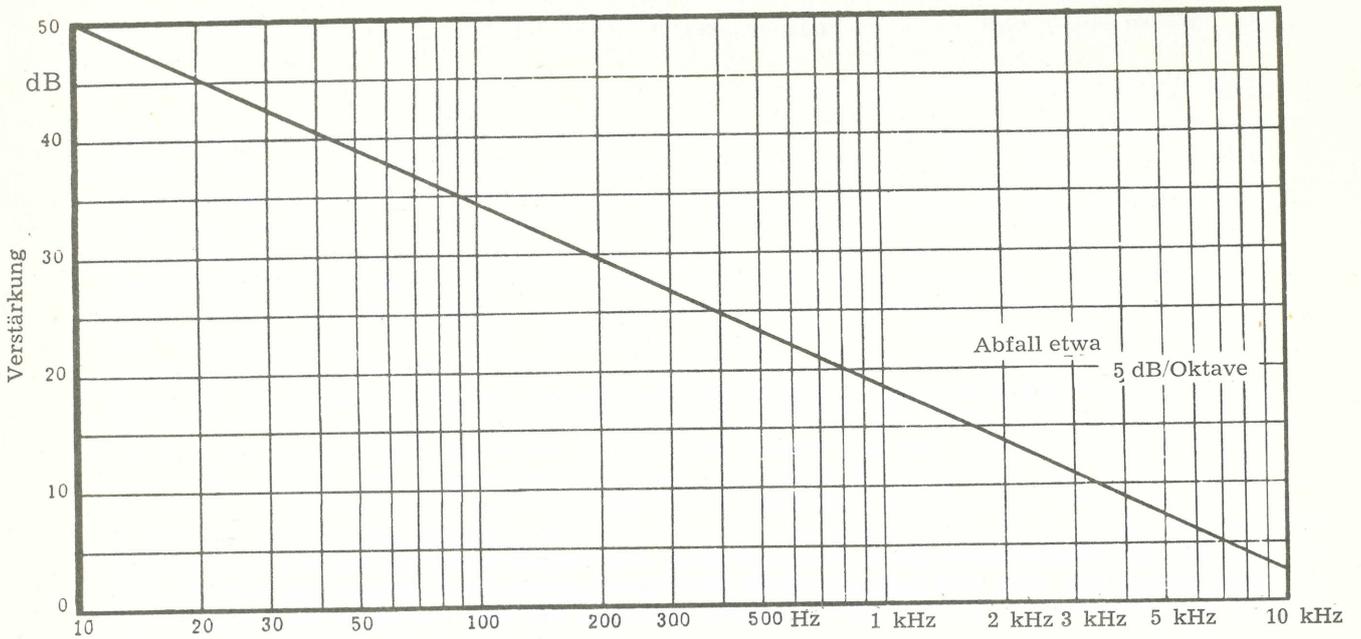


Abbildung Nr. 22 Frequenzgang der Verstärkung

schaltet. Die Verstärkung ist dadurch sehr hoch (etwa 700mal) und der Gitterstrom sehr klein. Direkt damit gekoppelt ist das Triodensystem als Kathodenfolger. Eine schwache Mitkopplung bewirkt das Anheben der Verstärkung auf etwa 1000mal, ein RC-Glied sorgt für das Abfallen der Verstärkung bei höheren Frequenzen, um Selbsterregung zu verhindern (Frequenzgang Abb. 22). Den Frequenzgang des mit $R_e = R_g = 1\text{ M}\Omega$ beschalteten Verstärkers zeigt Abb. 23. Zwei Glimmlampen im Kathodenkreis der Triodenstufe schleusen die Ausgangsspannung vom Anodenpotential der Penthode wieder auf das Massepotential. Der Verstärker ist für eine Belastung von max. $100\text{ k}\Omega$ bemessen.

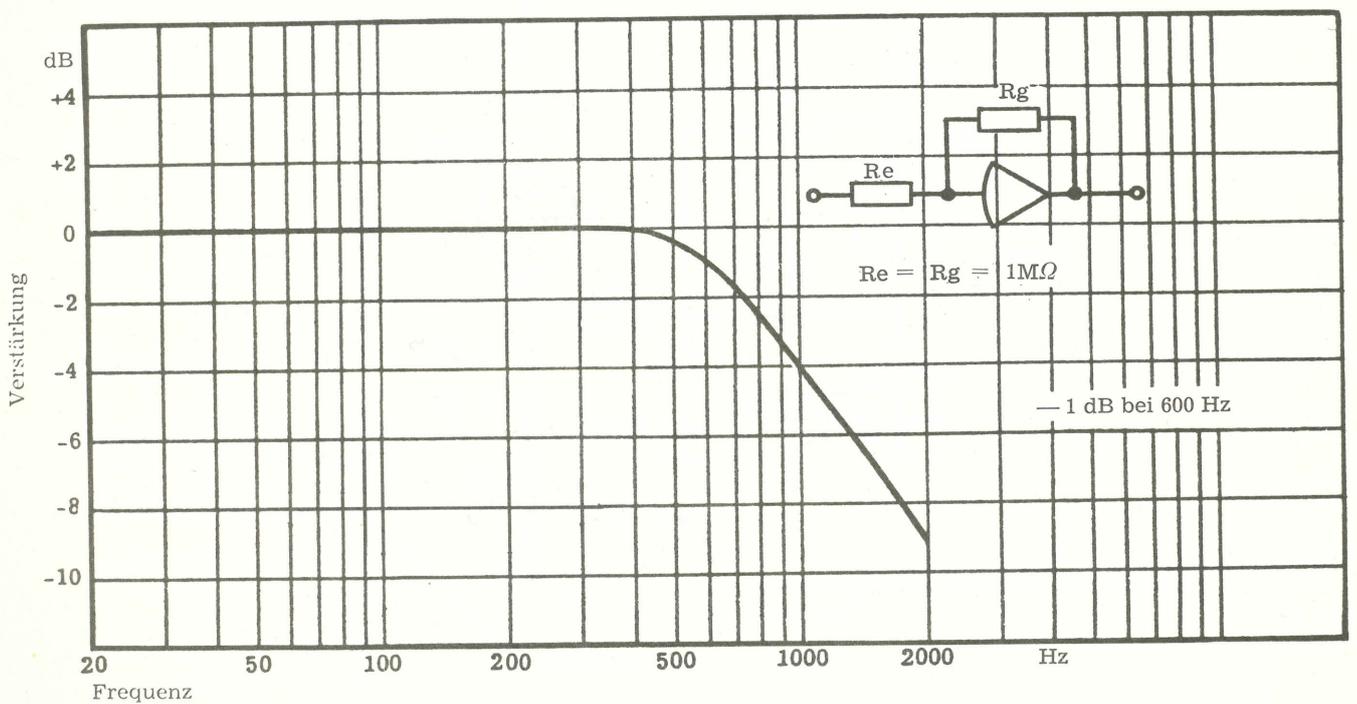


Abbildung Nr. 23 Frequenzgang des mit $R_e = R_g = 1\text{ M}\Omega$ beschalteten Verstärkers

Die maximale Ausgangsspannung beträgt in diesem Fall ± 60 V (für andere Belastungen siehe Abb. 24). Der Abgleich des Verstärkers wird durch ein Schraubenschlitzpotentiometer im Kathodenkreis der Eingangsröhre vorgenommen.

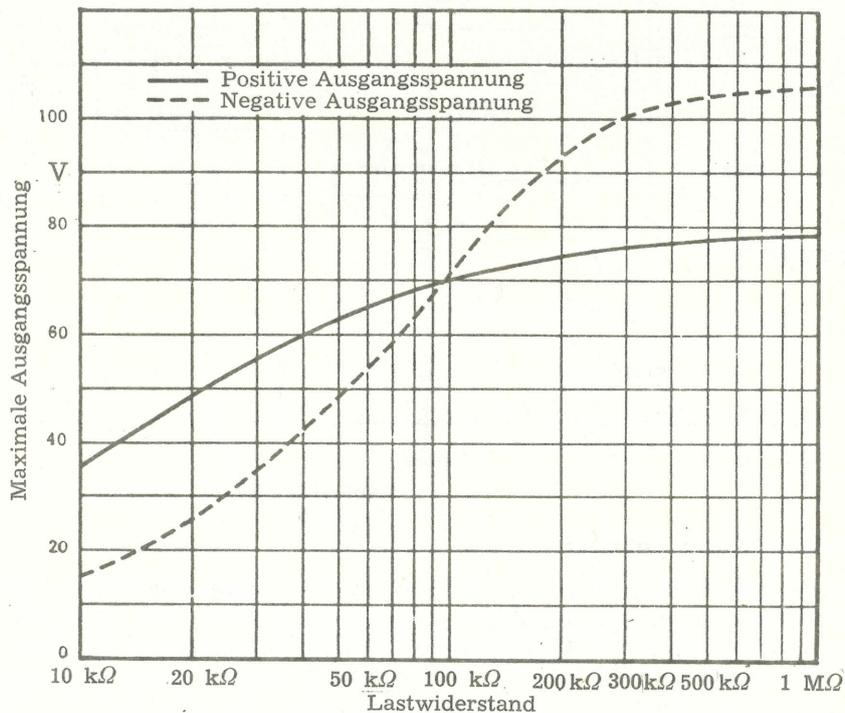


Abbildung Nr. 24 Maximale Ausgangsspannung als Funktion der Belastung

Zu jedem Verstärker gehören folgende Anschlüsse (von oben nach unten): zwei Ausgangsklemmen (schwarz), ein Doppelsteckkontakt für die Gegenkopplungsimpedanz, eine Eingangsklemme (rot), zwei Doppelsteckkontakte für die Eingangsimpedanzen, dazu zwei rote Anschlußbuchsen für den Eingang. Mehr als zwei Eingänge müssen mit Schaltkabeln geschaltet werden.

3.3 Das Kontrollinstrument

Das eingebaute Drehspulgerät dient zur Messung der Arbeitsspannungen, der Spannungen an den Ausgängen der Verstärker, zur Kontrolle der stabilisierten Anodengleichspannung und zum Abgleich der Verstärker. Entsprechend sind die Funktionen mit dem Schalter „METER FUNKTION“ wählbar. Durch den Schalter „METER RANGE“ lassen sich die Meßbereiche 1..0..1 V, 10..0.. und 100..0..100 V wählen. In der Stellung „METER INPUT“ des Funktionsschalters sind diese Meßbereiche durch zwei Klemmen oben rechts direkt zugänglich. Die schwarze Klemme liegt dabei stets an Masse.

In der Stellung „SET B“ wird die Anodenspannung (300 V) unabhängig von der Stellung des Meßbereichswählers kontrolliert.

Die Stellung „AMPLIFIER BALANCE“ ermöglicht die Kontrolle der Driftspannung nach Betätigung des zugehörigen Schiebeschalters.

In den übrigen 9 Stellungen dient das Gerät zur Messung der Ausgangsspannung der 9 Verstärker. Parallel zum jeweils geschalteten Verstärkerausgang liegen die Klemmen „METER OUTPUT“.

3.4 Der Netzteil

Das Gerät enthält einen besonderen Heiztransformator, der in der Schalterstellung „FILAMENT ON“ die Vorheizung der Röhren erlaubt. Der Haupttransformator speist 6 getrennte Gleichrichter: den röhrenstabilisierten Netzteil für die Anodenspannung (Schaltung Abb. 25), den glimmstabilisierten Netzteil für die Gegenspannung von -150 V, drei glimmstabilisierte Spannung für die „INITIAL CONDITIONS“ und eine Spannungsquelle für den Multivibrator zur Relaissteuerung.

4.2 Abgleich der Verstärker

Der Abgleich ist nach etwa 10 Minuten Einbrennzeit vorzunehmen. Er ist öfter zu kontrollieren und gegebenenfalls zu wiederholen. Der Abgleich kann prinzipiell auch bei beschaltetem Gerät ohne Änderung der Schaltung vorgenommen werden, da durch Betätigung des Schiebeschalters alle Verbindungen von der Frontplatte abgetrennt werden und der Verstärker mit $R_e = R_g = 1\text{ M}\Omega$ beschaltet wird (Abb. 27). Es ist jedoch zweckmäßig, bei unbeschaltetem Verstärker einen Gegenkopplungswiderstand zu stecken, bei Integratoren die IC-Spannung wegzunehmen und den Kondensator durch einen Widerstand von $1\text{ M}\Omega$ zu ersetzen.

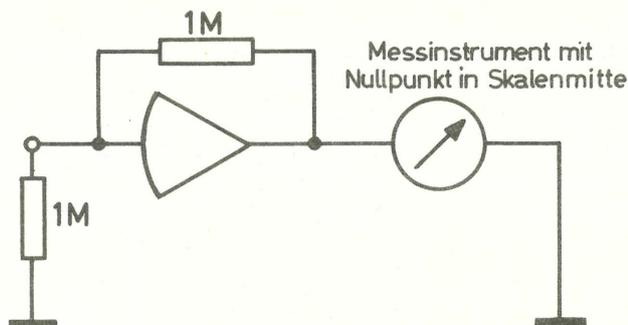


Abbildung Nr. 27 Abgleichschaltung

Schalter „METER RANGE“ auf 100 V. Schalter „METER FUNKTION“ auf „AMPLIFIER BALANCE“. Schiebeschalter zum Verstärker 1 nach unten drücken, festhalten und mit dem Schraubenzieher dazugehörige Potentiometer verstellen (Abb. 28), bis das Instrument 0 zeigt. Abgleich nach Umschalten des Meßbereichs auf 10 V und 1 V wiederholen und verfeinern. In der gleichen Weise sind alle Verstärker abzugleichen. Sollte ein Abgleich nicht möglich sein, einige Zeit warten, da oft Ladungen im Inneren der Röhre stören, die nur langsam abfließen.

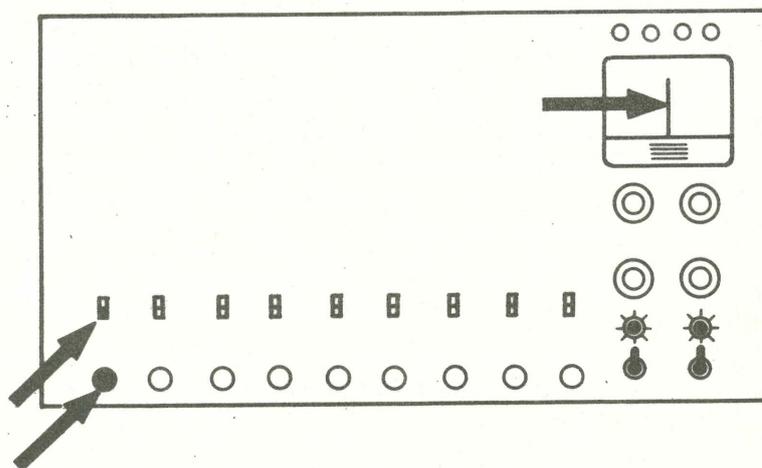


Abbildung Nr. 28 Verstärkerabgleich

5. Ausführung grundlegender Rechenoperationen

5.1 Inversion (Umkehr des Vorzeichens)

Das Vorzeichen der Spannung -21 V vom Potentiometer IC 1 soll umgekehrt werden. Die rote Klemme des Potentiometers IC 1 wird mit Masse, die schwarze Klemme mit der (linken) roten unteren Eingangsklemme des Verstärkers 1 verbunden. Zwei Rechenwiderstände zu $1\text{ M}\Omega$ werden in die zugehörige (linke) Doppelbuchse und in die Gegenkopplungs-Doppelbuchse gesteckt. Nun wird, unter Belastung durch R_e , die Spannung -21 V mit Hilfe des Spannungsmessers (Meßbereich 100 V , Funktion METER INPUT) kontrolliert. Dazu wird die schwarze Klemme von IC 1 parallel zur Verbindung zum Verstärker mit der roten Klemme links außen (METER INPUT) verbunden, und das Potentiometer IC 1 auf die gewünschte Spannung von -21 V eingestellt.

Der Funktionsschalter wird nun auf den Ausgang des Verstärkers 1 geschaltet: Das Instrument zeigt $+21\text{ V}$.

Steckt man für R $0,1\text{ M}\Omega$, so wird die Spannung gleichzeitig durch 10 dividiert: Das Instrument zeigt (Meßbereich 10 V) $+2,1\text{ V}$ an.

Mögliche Abweichungen erklären sich durch Ungenauigkeiten der Widerstände. Da diese die Toleranz $\pm 1\%$ haben, ist ein Fehler von max. 2% möglich. Dieser Fehler läßt sich vermeiden, wenn die Spannung am IC 1 unter Kontrolle des Verstärkerausganges eingestellt wird. Die Ausgangsspannung wird dann auf $+21\text{ V}$ eingestellt.

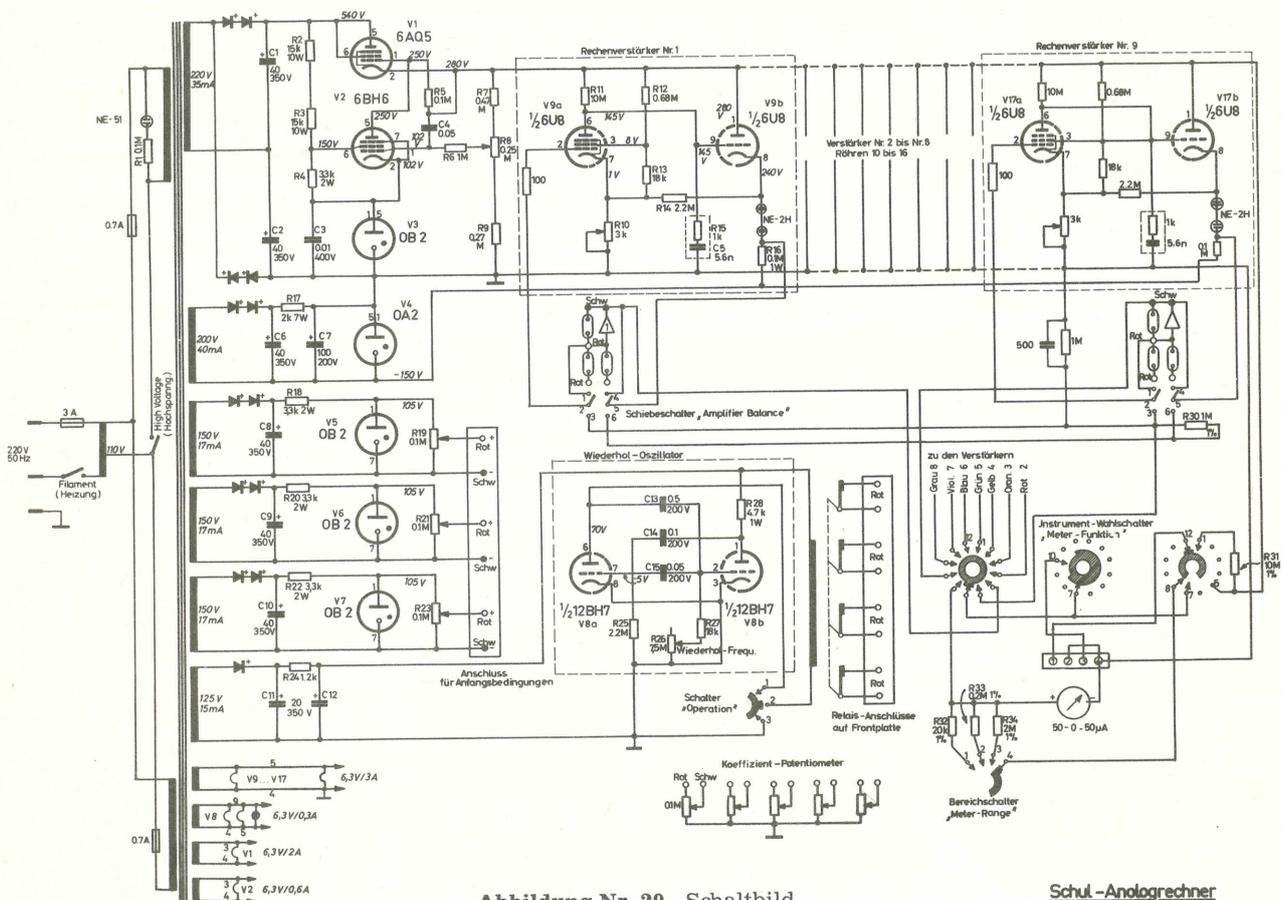


Abbildung Nr. 29 Schaltbild

Schut-Analogrechner
MODELL EC - 1 - E

5.2 Addition mit Inversion

Es sollen die Spannungen 3,6 V und 5,8 V addiert werden. Man stellt die Spannungen wie oben einzeln ein und kontrolliert am Ausgang ($-3,6$ V). Die 5,8-V-Spannung wird an den zweiten Eingang gelegt und bei der Einstellung der Eingangswiderstand R_{e1} gezogen und damit die Zuführung der ersten Spannung unterbrochen. In die zweite Eingangsdoppelbuchse wird ebenfalls ein Widerstand R_{e2} von $1\text{ M}\Omega$ gesteckt. Nach Einstellung der Einzelspannungen steckt man wieder R_{e1} und liest die negative Summe am Ausgang ab: $-9,4$ V. Wünscht man ein positives Ergebnis, so muß man mit einem zweiten Verstärker (z. B. V 2) wieder eine Inversion vornehmen. Man steckt hierzu auch auch hier R_e und $R_g = 1\text{ M}\Omega$ und verbindet die Ausgangsbuchse von V 1 mit der Eingangsbuchse von V 2. Zur Vermeidung der Fehler durch die nunmehr verwendeten 5 Widerstände kann man die Einzelspannungen wiederum am Ausgang von V 2 kontrollieren, indem man nacheinander beim Verstärker 1 R_{e1} und R_{e2} zieht (Abb. 30).

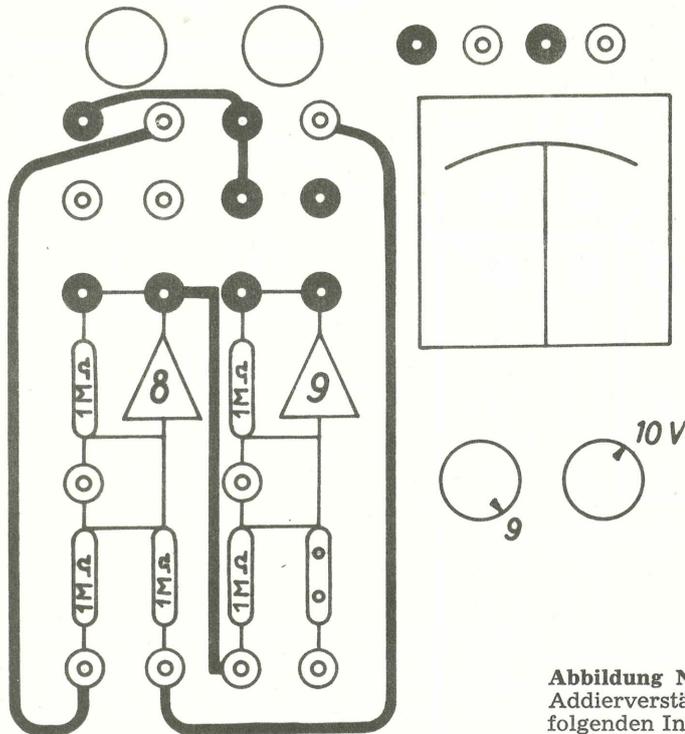


Abbildung Nr. 30 Beschaltung des EC-1-E als Addierverstärker für zwei Summanden und nachfolgenden Inverter

5.3 Die Integration einer Kontanten

3,6 V sollen über die Zeit integriert werden. Die Zeitkonstante der Integration soll so gewählt werden, daß bei einer Anfangsbedingung $u_a = 0$ für $t = 0$ nach einer Sekunde am Ausgang $-3,6$ V, nach 10 Sekunden -36 V herrschen. Der Verstärker 8 wird als Integrator geschaltet mit einer Zeitkonstanten $R_e \cdot C_g = 1$ Sekunde. Der Kondensator $C_g = 1\ \mu\text{F}$ wird in die Gegenkopplungsdoppelbuchse, der Widerstand $R_e = 1\text{ M}\Omega$ in die Eingangsdoppelbuchse gesteckt. Die zu integrierende Spannung wird wie unter 5.1 eingestellt und auf die zugehörige rote Eingangsbuchse gelegt. Zur Auslösung der Integration dient der über den Ausgangsbuchsen des Verstärkers gelegene Relaiskontakt. Dieser, im Ruhezustand geschlossene, Kontakt wird als Überbrückung des Verstärkers zwischen der roten Gitterbuchse und einer Ausgangsbuchse geschaltet. Die letztgenannte Verbindung kann auch über einen 19-mm-Brückenstecker an Stelle eines Schaltkabels erfolgen (Abb. 25). Diese Brückenverbindung ist bei den Verstärkern 2, 4, 6 und 8 möglich, deshalb sollten diese vorzüglich als Integratoren geschaltet werden!

Durch Drehen des Schalters „OPERATE“ nach links auf „MANUAL“ beginnt die Integration durch Öffnung des Relaiskontakts. Durch Rückdrehung des Schalters auf „RESET“ wird sie beendet. Die Integrationszeit darf übrigens nur solange dauern, bis die Ausgangsspannung $+$ oder -60 V erreicht sind. Dann arbeitet der Verstärker nicht mehr. Am Meßinstrument und an dem an den Buchsen „OUTPUT“ angeschlossenen Oszillografen lassen sich die Integration als ein der Zeit proportionales Steigen der Ausgangsspannung beobachten.

Durch Drehen des Schalters „OPERATE“ nach rechts wird der Relaiskontakt periodisch geöffnet und geschlossen. Die Periode läßt sich am Drehknopf „REPETITIVE RATE“ zwischen 0,1 und 15 Hz stetig einstellen.

Den linearen Spannungsanstieg kann man dazu benutzen, den Kathodenstrahl des Oszillografen zeitproportional nach rechts abzulenken und damit ein Kippgerät ersetzen.

Will man beim periodischen Rechnen ein stehendes Bild auf dem Oszillografenschirm erzielen, macht man zweckmäßigerweise von dieser Möglichkeit Gebrauch. Allerdings fällt dann ein Verstärker und ein Relaiskontakt für die eigentliche Rechenschaltung fort. Abbildung 31 zeigt die Schaltung des Verstärkers 8 als Kippintegrator. Die Kippgeschwindigkeit wird den Klemmen IC 2 entnommen (v_x).

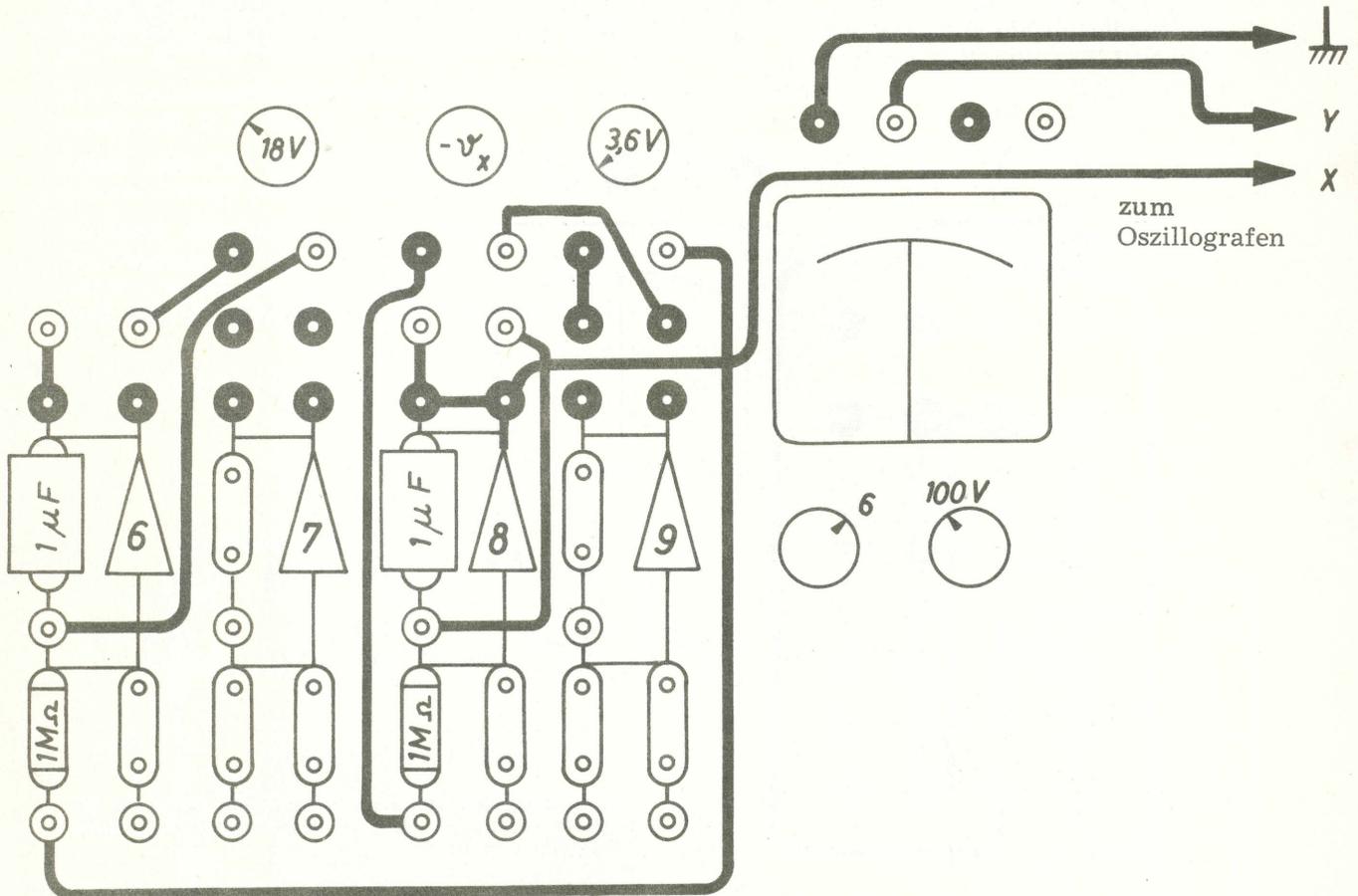


Abbildung Nr. 31 Verstärker 6 und 8 als Integratoren geschaltet

Da man häufig alle IC-Spannungen für die Rechenschaltung benötigt, lohnt sich die Anfertigung eines Einsatzes nach Abb. 34, den man sich leicht herstellen kann und bei dem die notwendige Spannung einer kleinen Batteriezelle von 1,5 V entnommen werden kann. Die Kippgeschwindigkeit wird hier mit dem Potentiometer P eingestellt.

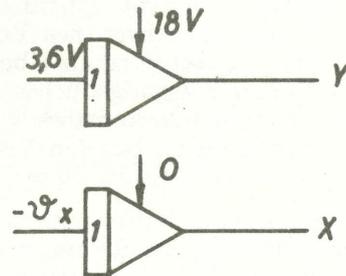


Abbildung Nr. 32 Symbol der Schaltung, Abb. 31

Nun soll als Anfangsbedingung zur Zeit $t = 0$ die Spannung $U_{a0} = 18 \text{ V}$ eingeführt werden. Wiederum sollen $3,6 \text{ V}$ mit der Zeitkonstante 1 Sekunde integriert werden. Der Verstärker 2 wird wie oben geschaltet, nur wird an Stelle der Brücke zwischen einem Relaiskontakt und dem Ausgang des Verstärkers die Spannung $IC\ 3 = 18 \text{ V}$ geschaltet, die wie unter 5.1 beschrieben, eingestellt und kontrolliert wird.

Abbildung 31 zeigt die fertige Beschaltung des Rechners nebst der Integrationschaltung für die Zeitablenkung auf dem Oszillografenschirm. Bild 33 zeigt den Verlauf des Katenstrahls auf dem Bildschirm.

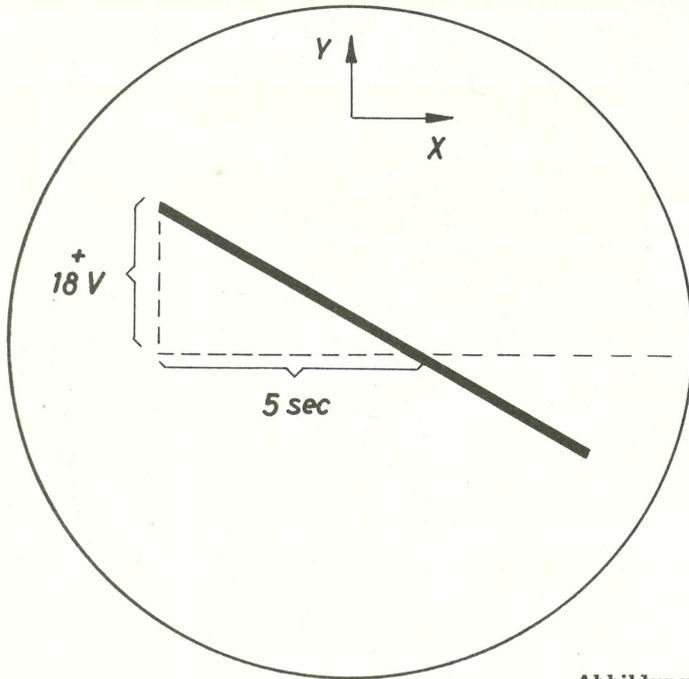


Abbildung Nr. 33 Schirmbild der Integration nach Abb. 31

Die Verstärkung der x - und y -Ablenkung des Oszillografen ist zweckmäßigerweise vorher so einzustellen, daß das gewünschte Bild den Oszillografenschirm gut ausfüllt. Ist ein cm-Netz vorhanden, stellt man die Verstärkung des Oszillografen z. B. so ein, daß in der y -Richtung $1 \text{ cm} \cong 5 \text{ V}$ entspricht. Um den Fehler des Kondensators C_g und des Widerstandes R_e zu ermitteln oder deren genaue Zeitkonstante zu bestimmen, kann man diese auch mit Hilfe einer Stoppuhr ermitteln. Man wählt z. B. als Anfangsbedingung den zehnfachen Spannungswert des Integranden und stoppt die Zeit vom Start bis zum Nulldurchgang der Ausgangsspannung: dies ist die zehnfache Zeitkonstante!

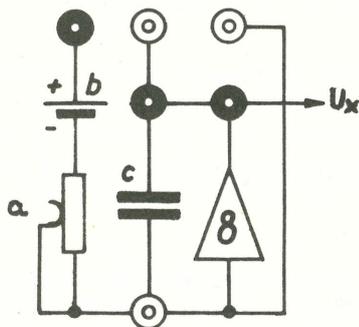


Abbildung Nr. 34 Schaltbild eines steckbaren Einsatzes zur Verwandlung des Verstärkers 8 als Kippintegrator

- a) Potentiometer $2 \text{ M}\Omega \log +$
- b) $1,5 \text{ V}$ Miniaturzelle
- c) Kondensator $0,5 \mu\text{F}$
- d) U_x Ablenkspannung

6. Programmierung und Lösung von Aufgaben

6.1 Die Lösung eines linearen Gleichungssystems

Die Lösung der folgenden Aufgabe zeigt in einfacher Weise, wie der Analogrechner Gleichungen nachbildet. Als Beispiel soll das lineare Gleichungssystem gelöst werden:

$$2x + 5y = 160$$

$$5x + 3y = 210$$

Damit die Faktoren kleiner als 1 werden, formt man um:

$$x/3 - y/5 = 14$$

$$x/5 - y/2 = 16$$

Man benötigt für die Lösung zwei Addierverstärker mit je drei Eingängen, 4 Spannungsteiler für die Faktoren und 2 IC-Spannungen 14 und 16 Volt. Das Schaltschema für die Lösung zeigt Abb. 35. Die Lösung läßt sich mit dem Voltmeter an beiden Verstärkerausgängen messen ($x = 30 \text{ V}$, $y = 20 \text{ V}$).

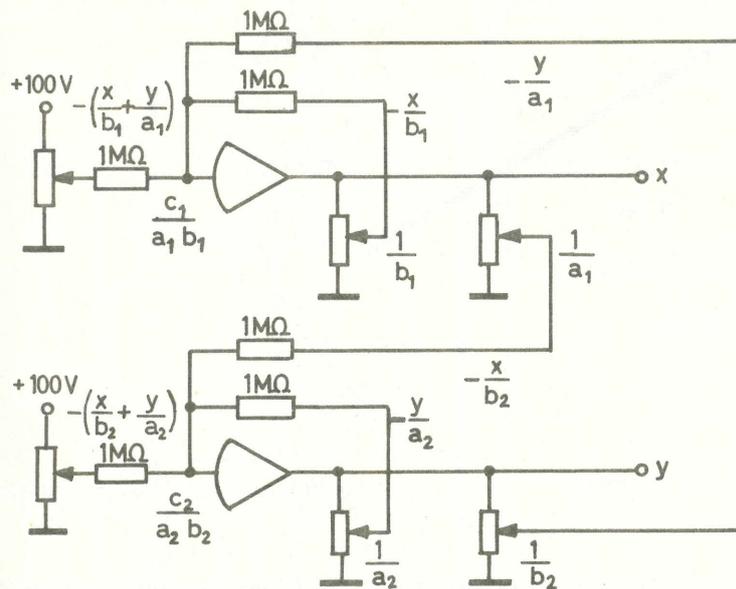


Abbildung Nr. 35 Lösungsschaltung eines linearen Gleichungssystems

Die Gegenkopplungswiderstände sind hier übrigens wie auf Abb. 16 an den Abgriff des Spannungsteilers am Ausgang des jeweiligen Verstärkers gelegt. Die Doppelstecker für die Gegenkopplung läßt sich daher bei dieser Schaltung nicht verwenden.

6.2 Der schiefe Wurf

Vorbemerkung: Wie in der Mathematik allgemein üblich, werden die Ableitungen nach der Zeit durch übergesetzte Punkte gekennzeichnet: $\dot{y} = dy/dt$, $\ddot{y} = d^2y/dt^2$, $\dddot{y} = d^3y/dt^3$ usw.

Die Differentialgleichungen des schiefen Wurfes ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes lauten:

$$\ddot{y} = -g, \quad \dot{y}(0) = v_{y0}, \quad y(0) = 0 \qquad \ddot{x} = 0, \quad \dot{x}(0) = v_{x0}, \quad x(0) = 0$$

Die Integrationsschaltung für die x -Koordinate ist mit der für die Zeitablenkung in Abschnitt 5.3 entwickelten identisch. Schaltung und Schema zeigen Abb. 36 und 37. Für die beiden Integratoren wurde die Zeitkonstante 1 Sekunde = $1 \mu\text{F} \cdot 1 \text{M}\Omega$ gewählt. Auf den Eingang des ersten Integrators wird eine negative Spannung des IC 1 gelegt: sie entspricht der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Die Anfangsbedingung v_y wird mit IC 2 eingestellt, und zwar ebenfalls als negativer Wert, da der erste Integrator das Vorzeichen umkehrt. Die Spannung IC 2 wird über den Relaiskontakt parallel zum Verstärker geschaltet. Am Ausgang des Verstärkers 2 erhält man nach Öffnen des Relaiskontakts 1 eine v_y ent-

sprechende Spannung. Diese wird nun auf den zweiten Integrator geschaltet. Hier ist die Anfangsbedingung $y(0) = 0$, so daß der Kontakt 2 direkt über den Verstärker geschaltet wird. Am Ausgang erhält man die Koordinate y .

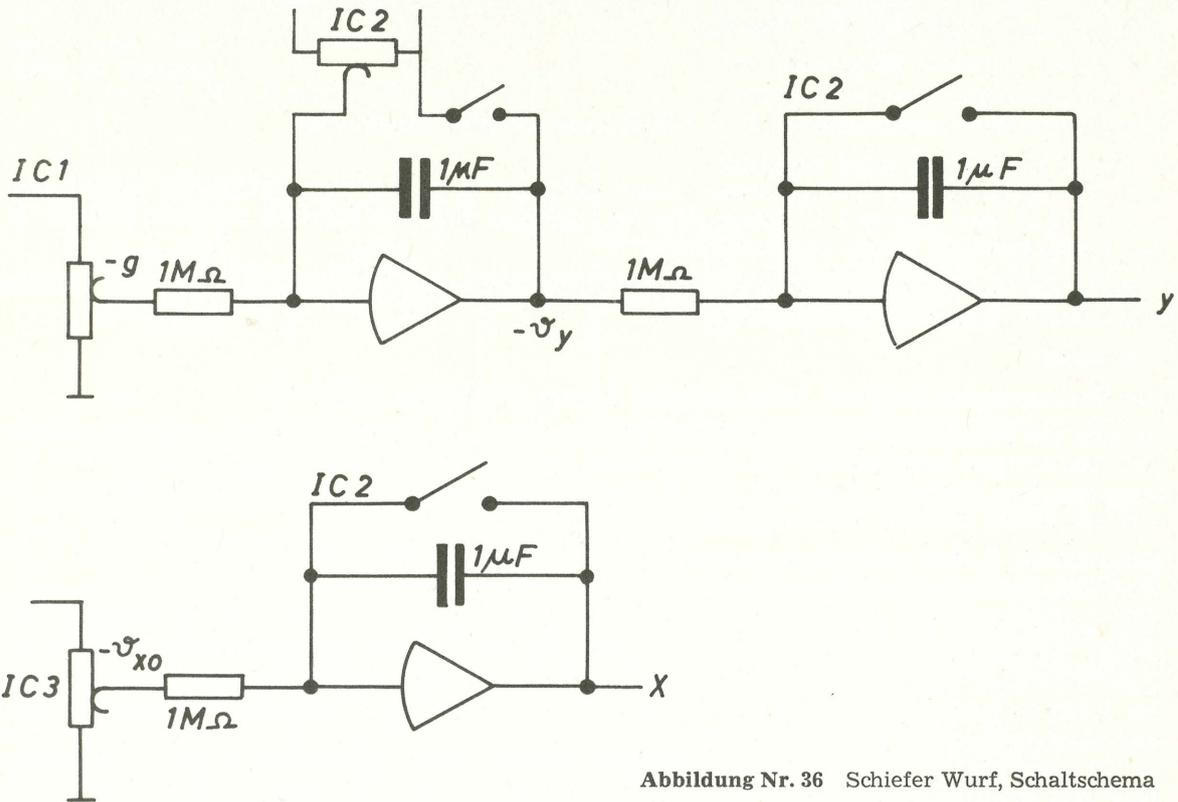


Abbildung Nr. 36 Schiefer Wurf, Schaltschema

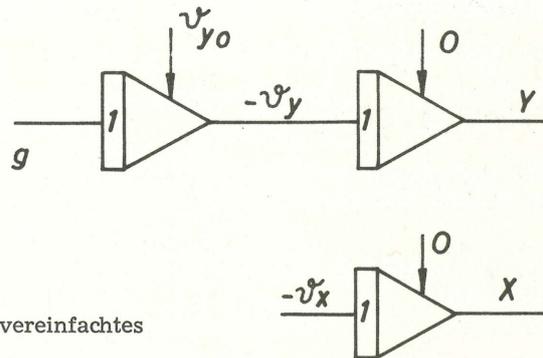


Abbildung Nr. 37 Schiefer Wurf, vereinfachtes Schema

Wichtig zur Auswertung ist die Beachtung der Maßstäbe. Diese müssen so gewählt werden, daß der Verstärker im Rahmen der zu lösenden Aufgabe niemals übersteuert wird. Beispiele soll die Wahl der Maßstäbe erläutern:

1. Beispiel:

Die Anfangsgeschwindigkeit eines unter einem Erhöhungswinkel von 45° abgeworfenen Körpers betrage 20 m/s , d. h. $v_y(0) = 14,1 \text{ m/s}$. Gesucht sind Wurfweite, Wurfhöhe y_{max} und Flugzeit t_f .

Versuchsweise wird angesetzt $g = 9,81 \text{ m/s}^2 \cong 19,62 \text{ V}$, d. h. $1 \text{ m/s}^2 \cong 2 \text{ V}$. Durch Multiplikation mit der Zeitkonstante des ersten Integrators — 1 s — folgt für den Geschwindigkeitsmaßstab $1 \text{ m/s} \cong 2 \text{ V}$ am Ausgang des ersten Integrators und $1 \text{ m} \cong 2 \text{ V}$ am Ausgang des zweiten Integrators. Der Rechenvorgang verläuft im natürlichen Zeitmaßstab, d. h. 1 Sekunde auf dem Rechner entspricht 1 Sekunde in der Natur.

Man stellt also folgende Spannungen ein:

IC 1 (g) — 19,6 V, IC 2 (v_y) — 28,2 V und IC 3 (v_x) — 28,2 V.

Bei einem Probelauf stellt man fest, daß der Integrator für die x -Koordinate am Ende der Parabelbahn übersteuert wird, während die beiden y -Integratoren innerhalb des zulässigen Spannungsbereiches bleiben.

Es bleiben folgende Möglichkeiten:

1. Alle Maßstäbe werden halbiert. $1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ V}$, $1 \text{ m/s} = 1 \text{ V}$, $1 \text{ m} = 1 \text{ V}$
Damit wird der Aussteuerbereich in y -Richtung schlecht ausgenutzt.

2. Die x -Koordinate wird verkürzt.

Nur der Maßstab der x -Koordinate wird halbiert, d. h. nur in x -Richtung wählt man $1 \text{ m/s} = 1 \text{ V}$ und $1 \text{ m} = 1 \text{ V}$. Nachteilig ist, daß das Bild der Parabel verzerrt wird, z. B. der Abwurfwinkel bleibt nicht erhalten.

3. Man gibt als Anfangsbedingung für $x(0) = -20 \text{ m} = -40 \text{ V}$ vor. Hierzu ist eine weitere einstellbare Spannung erforderlich.

2. Beispiel:

Die Bedingungen sind wie beim Beispiel 1, nur beträgt $v_0 = 200 \text{ m/s}$.

Da sich die Wurfweite ver Hundertfacht, könnte man z. B. den x -Maßstab und den y -Maßstab des vorigen Beispiels auf ein Hundertstel verkleinern, d. h. am Eingang des ersten Integrators den Maßstab $1 \text{ m/s}^2 = 0,01 \text{ V}$ zu wählen. Das wäre jedoch sehr ungünstig, da sich bei dieser kleinen Spannung der Driftfehler zu stark auswirkt.

Man kann z. B. bei beiden Integratoren durch je einen $10\text{-M}\Omega$ -Widerstand für R_e bei $1 \mu\text{F}$ die Zeitkonstante der Integratoren auf 10 Sekunden zu erhöhen.

Man erhält dann die Maßstäbe: $1 \text{ m/s}^2 \triangleq 1 \text{ V}$ am Eingang, $10 \text{ m/s} \triangleq 1 \text{ V}$ am Ausgang des ersten Integrators und $100 \text{ m} \triangleq 1 \text{ V}$ am Ausgang des zweiten Integrators. Die Integration läuft hier auch wieder unter der natürlichen Zeit ab. Nachteilig ist die hohe Zeitkonstante, die erhöhte Rechenfehler bewirkt. Daher ist es besser, den Zeitmaßstab zu ändern und den Rechengang schneller ablaufen zu lassen als in Wirklichkeit. Hier ist der Faktor 10 angebracht, d. h. 1 Sekunde auf dem Rechner bedeutet 10 Sekunden in Wirklichkeit. Das erreicht man, indem man alle Zeitkonstanten auf den zehnten Teil verkleinert, d. h. in unserem Beispiel, die Zeitkonstante beider Integratoren von 10 Sekunden wieder auf 1 Sekunde herabzusetzen. Damit wird nur der Zeitmaßstab geändert, die übrigen Maßstäbe: $1 \text{ m/s}^2 \triangleq 1 \text{ V}$, $10 \text{ m/s} \triangleq 1 \text{ V}$ und $100 \text{ m} \triangleq 1 \text{ V}$ bleiben erhalten!

6.3 Darstellung eines Polynoms 4ten Grades

Ein Polynom n -ten Grades:

$$y = \sum_0^n a_n \cdot t^n$$

läßt sich durch aufeinanderfolgende Integrationen darstellen. Dies sei am Beispiel eines Polynoms vierten Grades gezeigt:

$$y = a_0 - a_1 \cdot t - a_2 \cdot t^2 - a_3 \cdot t^3 - a_4 \cdot t^4$$

Durch viermalige Differentiation folgt die Differentialgleichung mit den Anfangsbedingungen:

$$\ddot{y} = 24 a_4$$

$$\text{für } t = 0 \text{ ist } \ddot{y} = 6 a_3, \dot{y} = 2 a_2, \dot{y} = a_1, y = a_0$$

Hieraus folgt die Schaltung des Rechners (Abb. 38).

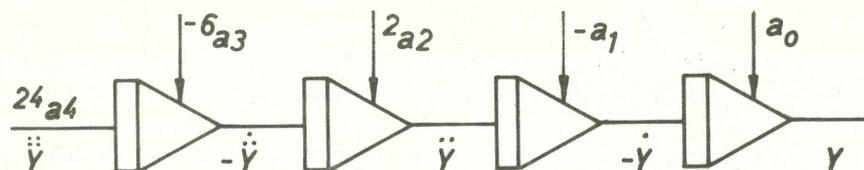


Abbildung Nr. 38 Darstellung eines Polynoms 4. Grades

6.4 Die lineare Differentialgleichung erster Ordnung

Die lineare Differentialgleichung erster Ordnung mit Störfunktion:

$$\dot{y} = a \cdot y + b(t)$$

läßt sich mit einem Integrator lösen, wenn a negativ ist (Abb. 39). Die Störfunktion muß, wenn sie keine Konstante ist, einem Funktionsgeber entnommen werden. Für den wichtigen Fall einer Sinusfunktion kann diese mit dem EC - 1 E selbst nach Abschnitt 6.5 erzeugt werden.

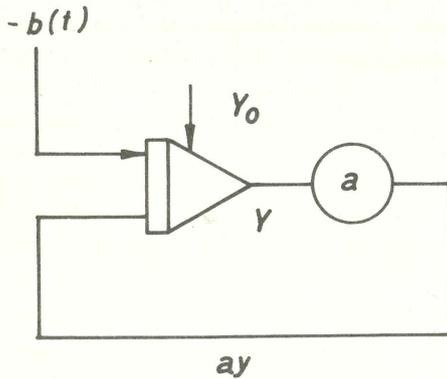


Abbildung Nr. 39 Lineare Differentialgleichung erster Ordnung

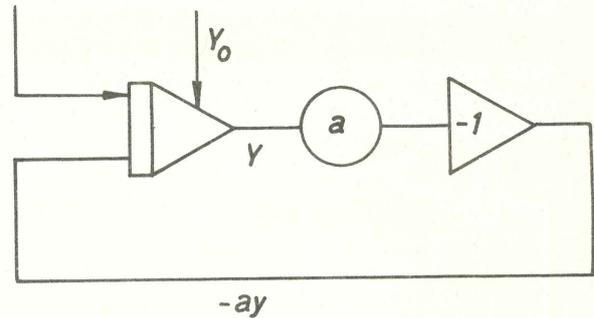


Abbildung Nr. 40 Lineare Differentialgleichung erster Ordnung

Für positive a ist ein Inverter vorzuschalten (Abb. 40). Diese Schaltung dient mit $b = 0$ zur Kontrolle der Stabilität des Verstärkers. Mit $y(0) = 0$ ergibt sich die labile Lösung $y = 0$, die beim Auftreten einer kleinen Driftspannung sofort in die Exponentialfunktion $y = y_0 \cdot \exp(a \cdot t)$ umschlägt. Die Zeit vom Öffnen des Relaiskontakts bis zu einem bestimmten y -Wert (z. B. $y = 10 \text{ V}$) ist ein Maß für die Drift.

6.5 Die lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung

Die Differentialgleichung eines gedämpften Feder-Masse-Systems (Abb. 41) lautet:

$$m \cdot \ddot{y} = -c \cdot y - p \cdot \dot{y} \quad \text{mit } y(0) = y_0 \\ y'(0) = 0$$

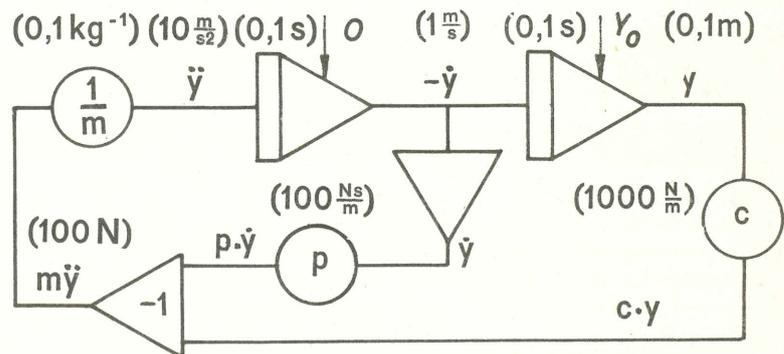
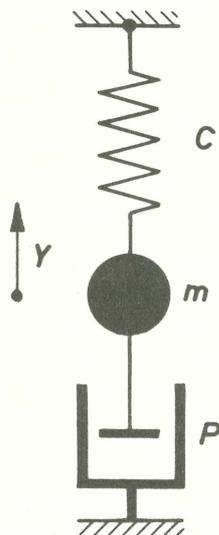


Abbildung Nr. 42 Schaltungsschema für Differentialgleichung 2. Ordnung mit drei Koeffizientenpotentiometern (Koeffizienten und Maßstäbe nach Beispiel)

Abbildung Nr. 41 Federpendel mit Dämpfung

Der Gang der Programmierung ist folgender:

Man nimmt \ddot{y} als gegeben an und integriert zweimal, das erste Mal mit 0 , das zweite Mal mit y_0 als Integrationskonstante. Man erhält am Ausgang des ersten Integrators (V 2) $-\dot{y}$, am Ausgang des zweiten Integrators (V 4) \dot{y} (Abb. 42). Durch einen Inverter (V 3) erzeugt

man sich $+\dot{y}$ \dot{y} multipliziert man mit dem ersten Potentiometer mit p , y multipliziert man mit dem zweiten Potentiometer mit c . Die abgegriffenen Werte addiert man mit V_1 und erhält $-(p \cdot \dot{y} + c \cdot y)$. Das ist aber gerade $m \cdot \ddot{y}$. Man verbindet also den Ausgang von V_1 mit dem dritten Potentiometer und multipliziert mit $1/m$. Dieser Wert ist aber \ddot{y} und er wird mit dem Eingang von V_2 verbunden. Damit ist die Lösungsschaltung vollständig und beim Öffnen der Relaiskontakte zeichnet der Oszillograf die Lösung.

Einen Verstärker und ein Potentiometer kann man sparen, wenn man die Schaltung Abb. 43 wählt. Hier wird allerdings auf die Darstellung von \ddot{y} verzichtet. Auch lassen sich die Konstanten m , p , c nicht mehr getrennt, sondern nur in der Form p/m und c/m einstellen.

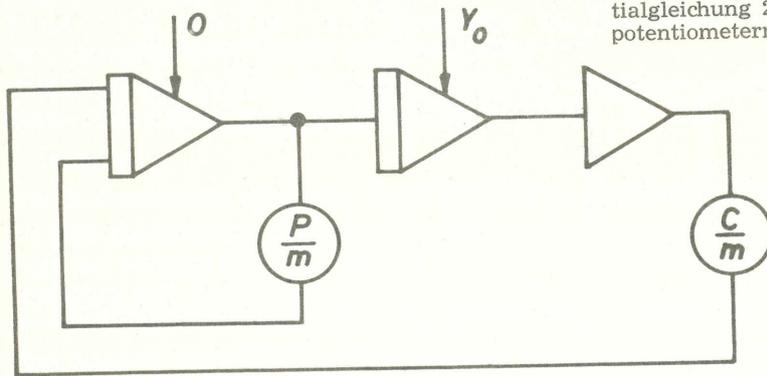


Abbildung Nr. 43 Schaltungsschema für Differentialgleichung 2. Ordnung mit zwei Koeffizientenpotentiometern

Außer der Darstellung $y = f(t)$ auf dem Oszillografenschirm, bei der der zeitliche Ablauf der Schwingung dargestellt ist, lassen sich auf dem Schirm auch die Amplituden- und Phasenbeziehungen zwischen y , \dot{y} und \ddot{y} als Phasenellipse darstellen. Meist stellt man die Beziehung $y = f(t)$ (senkrechte Koordinate) und $\dot{y} = f(t)$ (waagerechte Koordinate) auf dem Schirm des Oszillographen dar. Da zwischen y und \dot{y} eine Phasenverschiebung von 90° besteht, erhält man die Lissajous-Ellipse mit senkrechtem Achsenkreuz, die bei Dämpfung ($p \pm 0$) sich in Form einer logarithmischen Spirale verkleinert (positive Dämpfung) oder vergrößert (negative Dämpfung: Selbsterregung).

Die Phasenellipse dient auch zur Kontrolle der Stabilität der Verstärker. Schaltet man $p = 0$ durch Unterbrechung des Kabels oder Ziehen des Widerstandes, so dürfen sich die Achsen der Ellipsen nicht ändern. Das langsame Anwachsen oder Verkleinern der Achsen ist ein Maß für die Drift.

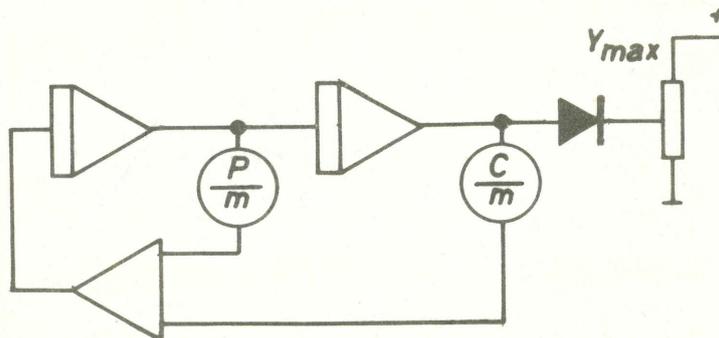


Abbildung Nr. 44 Sinusgenerator für ungedämpfte Schwingungen

Die Schaltung Abb. 44 kann man dazu benutzen, eine ungedämpfte Sinusspannung beliebiger Frequenz zu erzeugen. Mit dem Potentiometer $c/m = \omega^2$ stellt man die Frequenz ein, mit dem Potentiometer p/m gibt man eine kleine negative Dämpfung, so daß Selbsterregung eintritt. Die Schwingungsamplitude wird durch eine Diode und mit dem Potentiometer (IC) y_{max} begrenzt. Die Einstellung p/m soll so klein wie möglich gewählt werden, damit die Kurvenform nicht verzerrt wird. Andererseits muß aber noch ein stabiles Schwingen sichergestellt sein. Auf die Schaltung von Startkontakten und Anfangsbedingungen kann man verzichten, wenn die Phasenanlage der Schwingung nicht kritisch ist.

An Hand eines praktischen Beispiels soll die Lösung einer Schwingungsaufgabe quantitativ behandelt werden. Zur Übung empfiehlt es sich, diese Aufgabe auch rechnerisch zu lösen, um dann die Ergebnisse zu vergleichen:

An einer Feder mit der Federkonstanten $c = 1 \text{ kp/cm}$ hängt eine Masse $m = 20 \text{ kg}$. Die Dämpfungskonstante p für eine Überschwingung von 10% sowie die Eigenfrequenz des ungedämpften Systems soll ermittelt werden.

Zur quantitativen Auswertung ist es erforderlich, die Spannungen und Potentiometerstellungen der Schaltung Abb. 42 in die Problemgrößen umzurechnen. Als erster Schritt müssen daher die einzelnen Koeffizienten festgelegt werden. Dabei muß beachtet werden, daß die Aussteuerungsgrenzen der Verstärker in keinem Fall überschritten werden.

Für die rein mathematische Behandlung der Maßstäbe und Koeffizienten sei hier auf die einschlägige Literatur verwiesen. Meist ist es bei kleineren Problemen bequemer, die Maßstäbe schrittweise festzulegen.

Als erster Schritt ist es erforderlich, alle gegebenen Einheiten auf ein kohärentes Maßsystem umzustellen. Als solches wird das MKS-System mit den Grundeinheiten Meter, Kilogramm (Masse) und Sekunde gewählt. Die hierzu passende Krafteinheit ist das Newton (N). $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0,102 \text{ kp}$. Die gegebenen Größen sind somit:

$$\text{Masse } m = 20 \text{ kg} \quad \text{Federkonstante } c = 981 \text{ N/m}$$

gesucht ist: die Dämpfung $p = ?$ Einheit von p ist $\text{N} \cdot \text{s/m}$.

Die maximale Schwingungsamplitude y_{max} soll $0,1 \text{ m}$ sein.

Für diese legen wir den Maßstab fest. $0,1 \text{ m}$ soll 50 V entsprechen.

$$y \text{ — Maßstab: } 0,1 \text{ m} \triangleq 50 \text{ V}$$

Dieser Maßstab ist gültig am Ausgang des Verstärkers 4.

Der Faktor am Potentiometer c wird wie folgt gewählt:

$$c \text{ — Maßstab } 1 \triangleq 1000 \text{ N/m}$$

Bei voll aufgedrehtem Potentiometer (Faktor 1) bedeuten also 50 V am Eingang $0,1 \text{ m}$, 50 V am Ausgang dagegen 100 N .

Da der Faktor c aber in unserem Beispiel 981 N/m ist, ist das Potentiometer nur auf den Faktor $0,981$ einzustellen. Man tut das in der Weise, daß man bei voll beschaltetem Kreis y auf z. B. 50 V einstellt und das Potentiometer so einstellt, daß bei voller Belastung am Ausgang die Spannung von $49,05 \text{ V}$ herrscht.

Der Maßstab $50 \text{ V} \triangleq 100 \text{ N}$ muß natürlich auch für den Ausgang des Potentiometers p und für den Ausgang des Summierers V_1 gelten, wenn man diesen mit jeweils $1 \text{ M}\Omega$ beschaltet.

Die Maßstäbe für \dot{y} und \ddot{y} ergeben sich aus den beiden möglichen Zeitkonstanten der Integratoren, wobei wir festlegen wollen, daß beide Integratoren die gleiche Zeitkonstante $0,1 \text{ Sekunde}$ ($1 \text{ M}\Omega$ und $0,1 \mu\text{F}$) oder 1 Sekunde ($1 \text{ M}\Omega$ und $1 \mu\text{F}$) haben sollen:

$$\begin{aligned} R \cdot C = 0,1 \text{ s} : \dot{y} : 1 \text{ m/s} \triangleq 50 \text{ V} \quad \ddot{y} : 10 \text{ m/s}^2 \triangleq 50 \text{ V} \\ (1 \text{ s} : \dot{y} : 0,1 \text{ m/s} \triangleq 50 \text{ V} \quad \ddot{y} : 0,1 \text{ m/s}^2 \triangleq 50 \text{ V}) \end{aligned}$$

Diese Werte folgen aus dem Ausgangsmaßstab für y ($0,1 \text{ m}$) dividiert durch die Zeitkonstanten der Integratoren.

Den Zusammenhang mit dem Kraftmaßstab 100 N und dem Maßstab für \dot{y} stellt das Potentiometer $1/\text{m}$ her. Der Übergang von 100 N auf 10 m/s^2 ($0,1 \text{ s}$) bedeutet für die Potentiometerstellung 1 einen Faktor $1 = (10 \text{ kg})^{-1}$. Für $m = 20 \text{ kg}$ folgt daraus der vernünftige Einstellwert $0,5$. Bei der Zeitkonstante 1 s ergibt sich die unmögliche Potentiometerstellung 50 , so daß diese Zeitkonstante keine Verwendung finden kann. Die Maßstabwerte sind daher oben eingeklammert. Aus dem Maßstab für \dot{y} und dem Kraftmaßstab folgt der Maßstab für das p -Potentiometer $1 = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}$.

Zur Lösung der Aufgabe stellt man noch $y_0 = 0,1 \text{ m} \triangleq 50 \text{ V}$ ein und integriert durch einfaches oder periodisches Schalten des Relais (MANUAL, oder REPETITIVE). Die Schwingungsdauer ergibt sich mit Hilfe einer Stoppuhr zu $0,90 \text{ Sekunden}$. Durch Verändern des p -Potentiometers versucht man den Sollwert der Dämpfung ($\ddot{u} = 10 \%$) einzustellen. Es ergibt sich aber selbst bei voll aufgedrehtem p -Potentiometer ($p = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}$) noch ein Überschwingen von 30% . Daher muß der p -Einfluß verzehnfacht werden. Dies erfolgt durch Austausch des dem Potentiometer p zugeordneten Eingangswiderstandes am Summierverstärker gegen einen $100\text{-k}\Omega$ -Widerstand. Nunmehr läßt sich die Dämpfung auf den gewünschten Wert einstellen. Ein Nachmessen unter Belastung ergibt den Wert $0,16$ entsprechend einem Dämpfungsfaktor $160 \text{ N} \cdot \text{s/m}$. Damit ist die Aufgabe quantitativ gelöst.

Unter Beibehaltung der Eichkonstanten und Maßstäbe läßt sich nun die Lösung um den Faktor 10 verlangsamen, indem man allen Integratoren durch Vertauschen des Kondensators mit $1 \mu\text{F}$ die Zeitkonstante 1 Sekunde gibt.

Eine solche Verlangsamung ist z. B. erforderlich, wenn die Dimensionierung auf zu kleine Zeitkonstanten führt.

Wir wollen daher die besprochene Aufgabe so variieren, daß nunmehr eine Masse $m = 200 \text{ g}$ schwingen soll. Alle anderen Festsetzungen sollen beibehalten bleiben. Dann führt diese kleine Masse bei den Zeitkonstanten $0,1 \text{ s}$ wieder zu einem zu großen Einstellwert (50!). Also muß die Zeitkonstante beider Integratoren zu $0,01 \text{ s}$ gewählt werden. Dann ergeben sich für y , das Potentiometer c und die Kraft die gleichen Maßstäbe wie oben. Es ändern sich folgende Maßstäbe: $y \triangleq 10 \text{ m/s}$, $y \triangleq 1000 \text{ m/s}^2$, m -Potentiometer $1 \triangleq 1/0,1 \text{ kg}$ und p -Potentiometer $1 \triangleq 10 \text{ N} \cdot \text{s/m}$. Da die kleine Zeitkonstante nicht zulässig ist, ändert man den Zeitmaßstab im Verhältnis $1 : 10$ und gibt **unter Beibehaltung** der genannten Maßstäbe den Integratoren die Zeitkonstante $0,1 \text{ s}$. Damit wird nur die Rechnung um den Faktor 10 verlangsamt. Bei der Zeitkonstante 1 s wird der Vorgang auf das 100 -fache gedehnt. Alle anderen Maßstäbe und Verhältnisse und die Amplituden ändern sich nicht.

Bei der Wahl der Maßstäbe ist darauf zu achten, daß nirgendwo die Aussteuerungsgrenze $\pm 60 \text{ V}$ der Verstärker überschritten wird!

6.6 Die direkte Programmierung physikalischer Systeme

Bei der direkten Programmierung werden physikalische Systeme simuliert, ohne daß zuvor die Differentialgleichung des Vorgangs aufgestellt wurde. Dies läßt sich rein schematisch durchführen, lediglich durch Übertragung entsprechender Analogien auf den Analogrechner. Auf Tafel S. 25 sind einige Analogbeispiele zusammengestellt. Als unabhängige Veränderliche sind bei den mechanischen Beispielen gewählt: Geschwindigkeit und Kraft, bei den elektrischen Beispielen Spannung und Strom.

Das Verfahren läßt sich am einfachsten an den folgenden Beispielen zeigen, die mathematisch zu einem System simultaner Differentialgleichungen führen.

Das erste Beispiel ist eine Siebkette aus zwei Induktivitäten, zwei Kapazitäten und einem Belastungswiderstand (Abb. 45). Die Spannungen und Ströme bei einer Eingangsspannung beliebiger Kurvenform sollen untersucht werden.

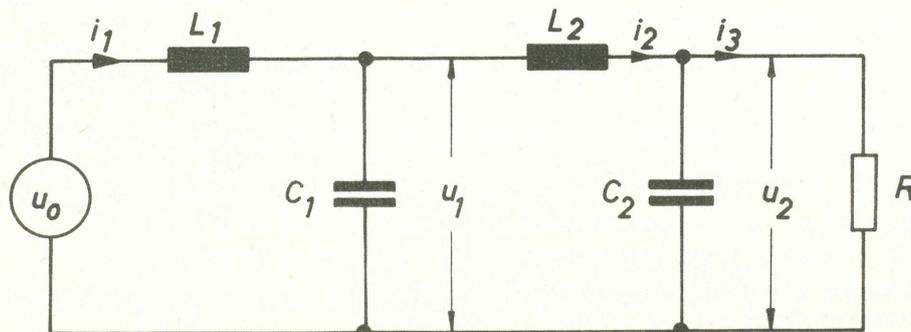


Abbildung Nr. 45 Siebkette

Die Schaltung des Analogrechners (Abb. 46) folgt in einfacher Weise aus den Analogien der Tafel unter Zusammenschaltung gemäß dem Schaltbild.

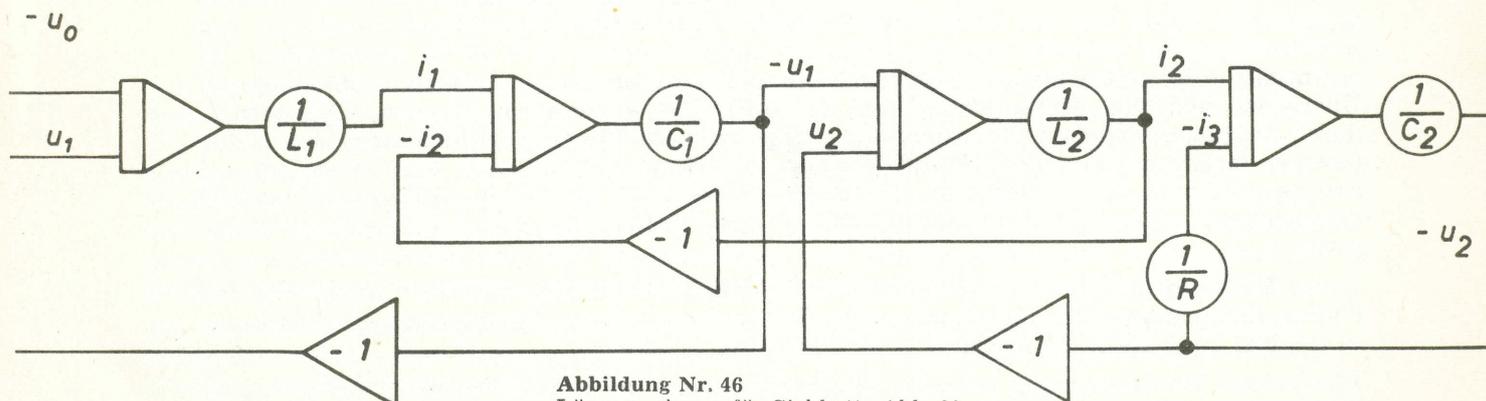
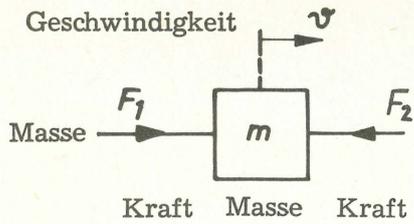
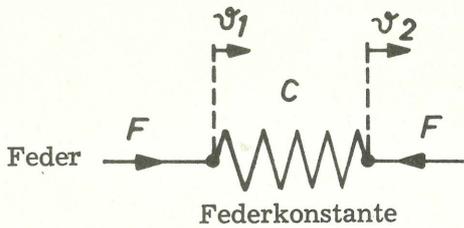


Abbildung Nr. 46 Lösungsschema für Siebkette Abb. 39

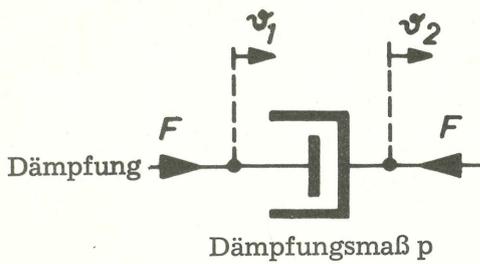
Analogiebeispiele



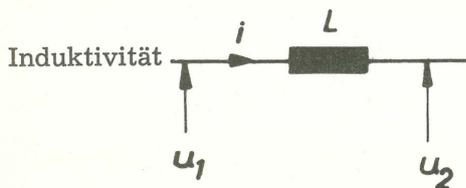
$$v = \frac{1}{m} \int (F_1 - F_2) dt$$



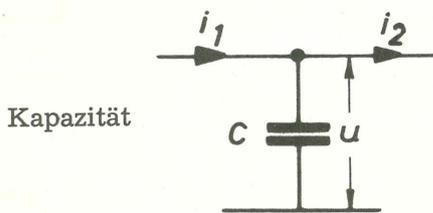
$$F = c \int (v_1 - v_2) dt$$



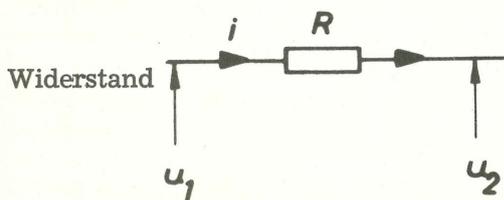
$$F = p (v_1 - v_2)$$



$$i = \frac{1}{L} \int (u_1 - u_2) dt$$



$$u = \frac{1}{c} \int (i_1 - i_2) dt$$



$$i = \frac{1}{R} (u_1 - u_2)$$

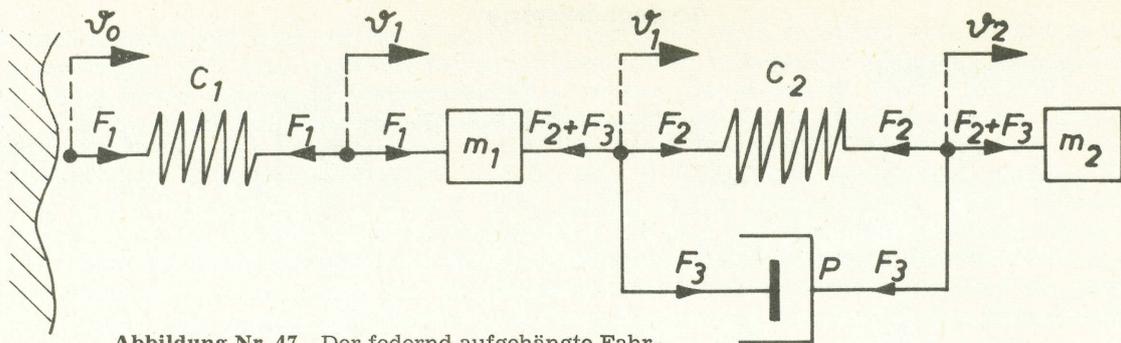


Abbildung Nr. 47 Der federnd aufgehängte Fahrzeugreifen mit Stoßdämpfer. v_0 gegebene Geschwindigkeit der Reifenoberfläche durch die Unebenheit der Straße

Bemerkung: Alle v sind Vertikalgeschwindigkeiten!

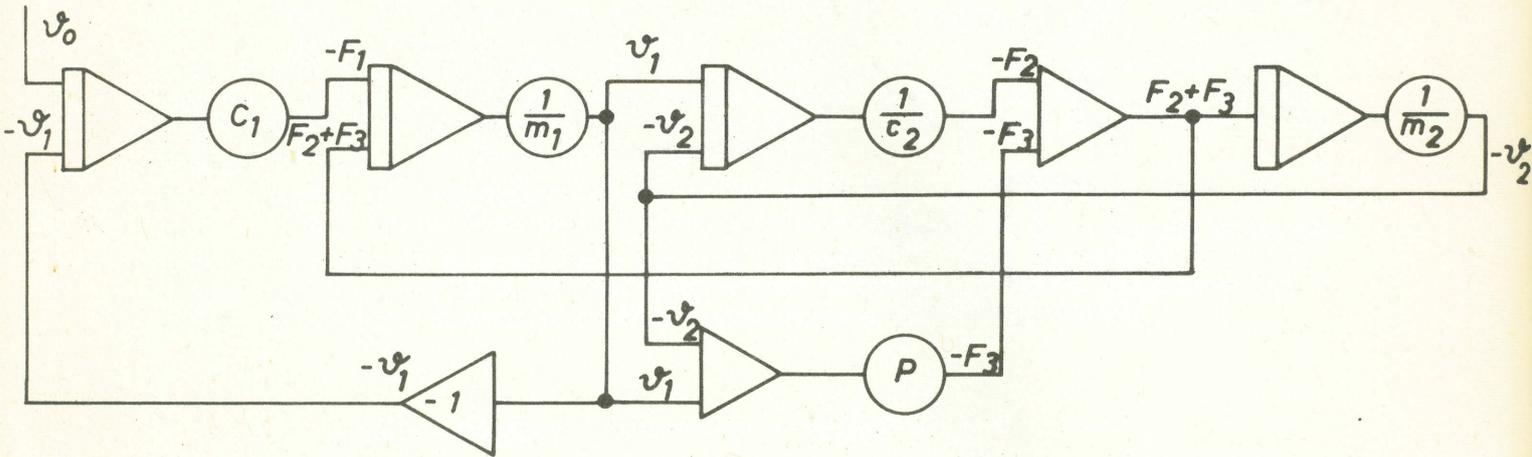


Abbildung Nr. 48

Lösungsschaltung zu Abb. 41

- v_1 Geschwindigkeit der Radachse
- v_2 Geschwindigkeit des Wagenchassis
- c_1 Federkonstante des Reifens
- c_2 Federkonstante der Radaufhängung
- p Dämpfungskonstante des Stoßdämpfers

- m_1 Masse des Rades nebst Achse und der damit fest verbundenen Teile
- m_2 anteilige Masse des Chassis
- F_1 Kraft zwischen Straße und Reifen
- F_2 Federkraft der Radfederung
- F_2 Stoßdämpferkraft

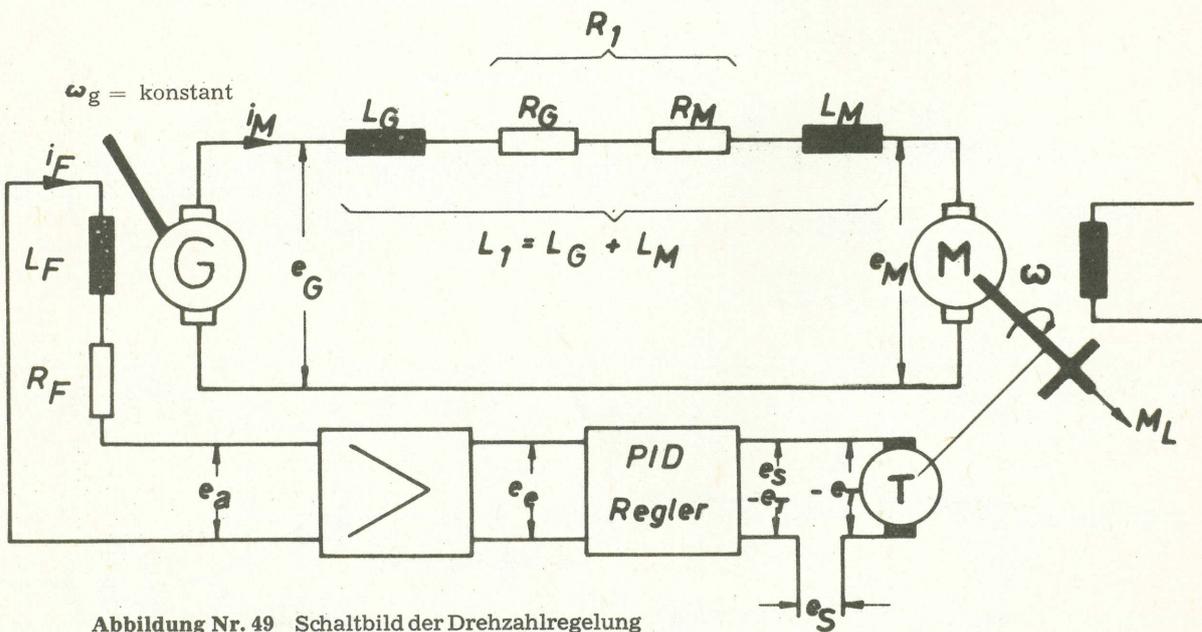


Abbildung Nr. 49 Schaltbild der Drehzahlregelung eines Leonard-Umformers mit P-I-D-Regler

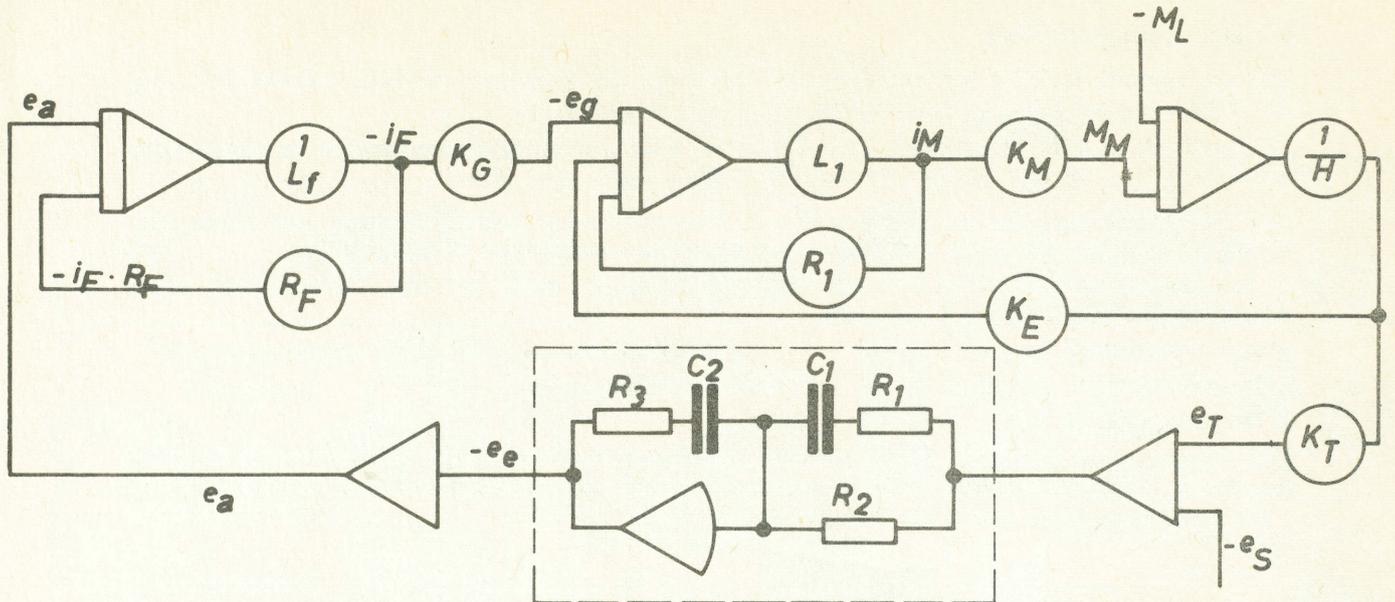


Abbildung Nr. 50
 Programmierung des Regelkreises Abb. 43
 Der Regler ist durch Verstärker mit Netzwerk
 R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 nachgebildet

Der gefedert aufgehängte Luftreifen eines Fahrzeuges ist Gegenstand des zweiten Beispiels. Die Störfunktion ist hier die Unebenheit der Straße, deren erste Ableitung, die Vertikal-Geschwindigkeit des Berührungspunktes Reifen/Straße als empirische Funktion durch einen Funktionsgeber vorgegeben sein muß. Mit dieser Schaltung können zum Beispiel Wirkungsweise und Kräfte des Stoßdämpfers untersucht werden (Abb. 47 und 48).

Das dritte Beispiel ist eine Drehzahlregelung eines Leonard-Antriebes (Abb. 49 und 50). Dieser besteht aus einem mit konstanter Geschwindigkeit angetriebenen Gleichstrom-Generator G, dem von diesem gespeisten Motor M, dessen Welle das Lastmoment M_L aufzubringen hat und der Regeleinrichtung, bestehend aus dem Tachodynamo T, dem P-I-D-Regler R und dem Verstärker für den Erregerstrom I_f .

Die Aufgabe des Reglers ist, dafür zu sorgen, daß die Drehgeschwindigkeit der Steuerungsspannung E_s unmittelbar folgt (Stellverhalten) und von Änderungen des Lastmoments M_L möglichst wenig beeinflusst wird (Störverhalten). Gegeben sind die Daten der Maschinen, gesucht ist die Dimensionierung des Reglers. Das Zeitverhalten der Regelstrecke wird bestimmt durch die Induktivitäten und Widerstände im Generator- und Motorerregerkreis und durch das Trägheitsmoment der Motorachse mit allen darangekuppelten Maschinenteilen Θ . Die Generatorspannung E_g sei dem Erregerstrom proportional. Die Ankerspannung des Motors sei der Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers ω ebenso proportional wie die Spannung E_t an den Klemmen des Tachodynamos ω hängt ab von dem Erregerstrom I_m , der das Antriebsmoment M_a erzeugt. Die Beschleunigung des Ankers ergibt sich aus dem Differenzmoment $M_a - M_L$ dividiert durch das Trägheitsmoment Θ .

Die Steuerungsspannung E_s ist der Tachospannung E_t entgegengeschaltet. Die Differenz ist die Eingangsspannung des P-I-D-Reglers, dessen Verstärkungsgrad, Vorhalt und Nachstellzeit gesucht sind. Die daraus resultierende Spannung E_r wird proportional verstärkt zur Spannung E_o , die den Erregerstrom I_f hervorruft. Damit ist der Regelkreis geschlossen. Die Spannungen E_s und M_L sind nun vorzugeben und dem Regelkreis aufzuschalten.

Die Reglerschaltung läßt sich durch einen Verstärker darstellen, der mit einem Netzwerk verbunden ist. Im Interesse der leichteren Einstellbarkeit kann man diese aber auch durch mehrere Verstärker nachbilden.

Bei diesem Beispiel ist allgemein Proportionalität zwischen den gekoppelten Veränderlichen angenommen. Es ist durch Funktionsgeber möglich, auch nichtlineare Verhältnisse nachzubilden (z. B. zwischen Erregerstrom I_f und Spannung E_g gemäß der Hysterese des Ständers).

6.7 Der springende Ball

Der springende Ball ist ein nichtlineares Problem, das sich mit dem EC 1 lösen läßt. Für die Schaltung sind einige zusätzliche Kleinteile erforderlich.

Widerstände 0,5 W möglichst 1% Toleranz (für Demonstrationszwecke genügen auch 5 .. 10 %): 20 k Ω , 200 k Ω , 500 k Ω , 2 M Ω , 5 M Ω , 4 \times 10 M Ω .

Für die Darstellung der Ballform wird ein Phasenschieber zur Erzeugung von Lissajous-Kreisen benötigt, der noch aus folgenden Bauteilen aufgebaut werden muß:

1 Heiztransformator 220/6,3 V mit Mittelanzapfung, auch ist die Verwendung eines Klingeltrafos 220/3 und 5 V möglich.

2 Potentiometer 100 k Ω

1 Kondensator 0,1 μ F

2 Potentiometer 25 k Ω

1 Kondensator 1 μ F

2 Widerstände 10 k Ω

Die Schaltung ist auf Abb. 51 dargestellt. Das Potentiometer g gibt die Erdbeschleunigung, der erste Integrator bildet die Fallgeschwindigkeit, der zweite den Ort y . m ist die Masse, c die Federkonstante und p die Dämpfung des Balls.

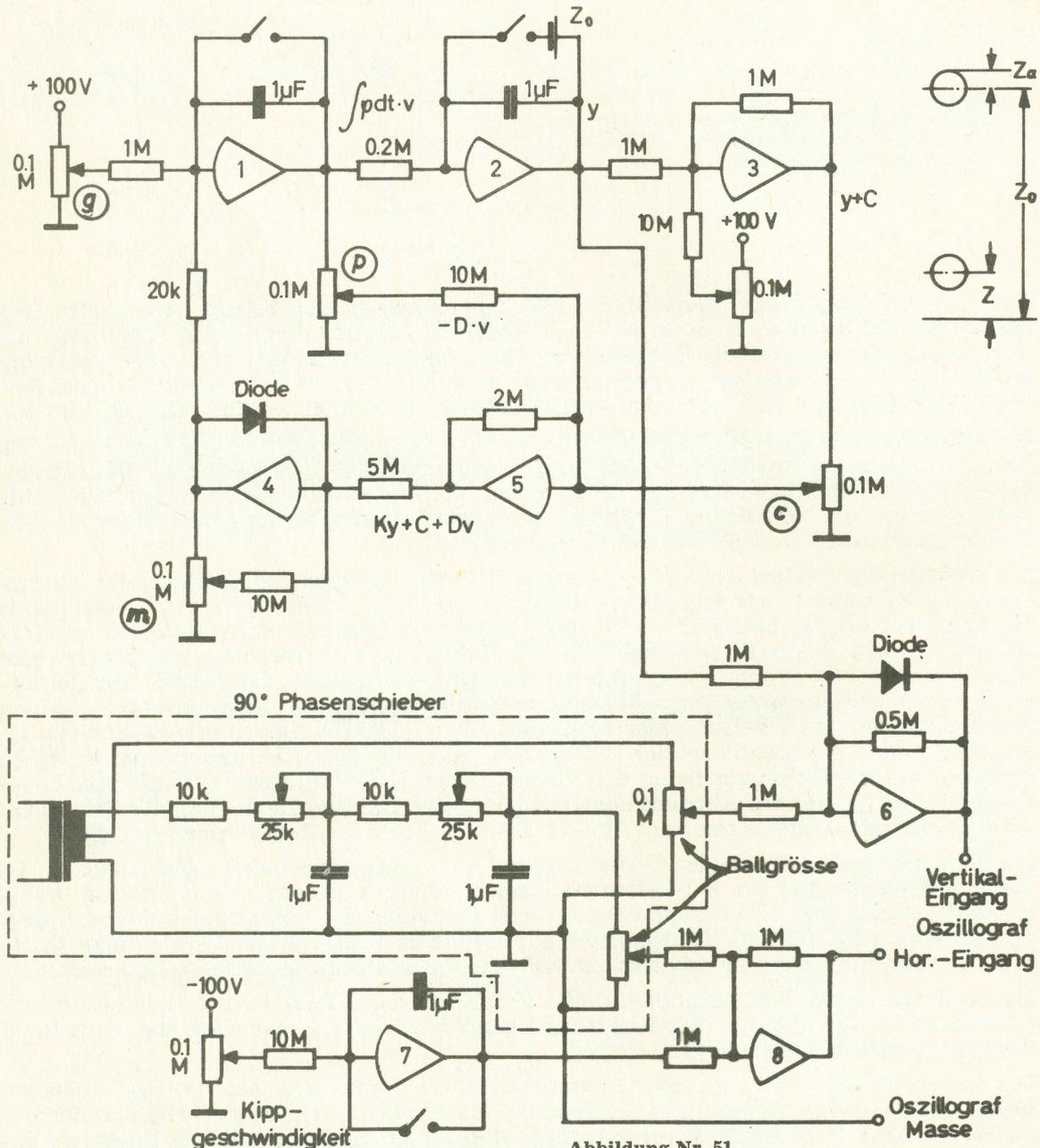
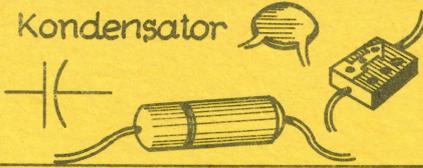
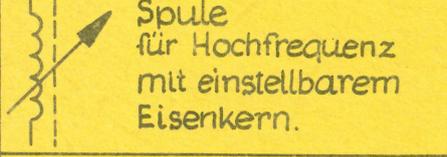
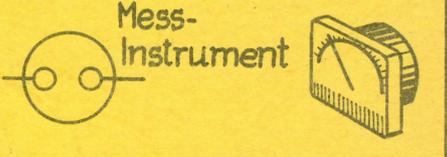
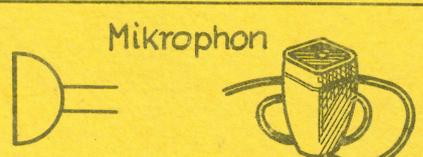
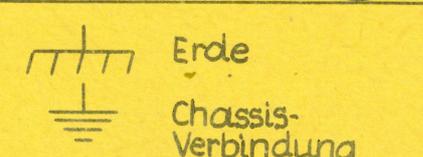


Abbildung Nr. 51
Springender Ball, Schaltbild

Schaltungssymbole

für häufig gebrauchte Einzelteile

<p style="text-align: center;">Widerstand</p> 	<p style="text-align: center;">Kondensator</p> 	<p style="text-align: center;">Röhre</p> 
<p style="text-align: center;">Potentiometer (Regler)</p> 	<p style="text-align: center;">Elektrolyt-kondensator</p> 	<p style="text-align: center;">Transistor</p> 
<p style="text-align: center;">Transformator (mit Eisenkern)</p> 	<p style="text-align: center;">Dreh-kondensator</p> 	<p style="text-align: center;">Gleichrichter</p> 
<p style="text-align: center;">Transformator (Bandfilter) mit einstellbarem H-F-Massekern Bewegung in Pfeilrichtung erhöht Induktivität.</p> 	<p style="text-align: center;">Batterie</p> 	<p style="text-align: center;">Glimmlämpchen</p> 
<p style="text-align: center;">Spule für Hochfrequenz mit einstellbarem Eisenkern.</p> 	<p style="text-align: center;">Buchse</p> 	<p style="text-align: center;">Beleuchtungs-lämpchen</p> 
<p style="text-align: center;">Netz-Transformator</p> 	<p style="text-align: center;">Klingenbuchse</p> 	<p style="text-align: center;">Mess-Instrument</p> 
<p style="text-align: center;">Spule frei-tragend.</p> 	<p style="text-align: center;">Einbaubuchse</p> <p style="text-align: center;">US-Ausführung</p> 	<p style="text-align: center;">einpoliger Kippschalter</p> 
<p style="text-align: center;">Quarz-Kristalle</p> 	<p style="text-align: center;">Lautsprecher</p> 	<p style="text-align: center;">Drehschalter</p> 
<p style="text-align: center;">Anschluss-Klemme</p> 	<p style="text-align: center;">Mikrophon</p> 	<p style="text-align: center;">Sicherung</p> 
<p style="text-align: center;">Antenne</p> <p style="text-align: center;">allgemein Rahmen-Antenne</p> 	<p style="text-align: center;">Erde</p> <p style="text-align: center;">Chassis-Verbindung</p> 	<p style="text-align: center;">Kreuzung ohne Verbindung verbunden abgeschirmt</p> 



DAS GÜTEZEICHEN FÜR ELEKTRONISCHE BAUSÄTZE VON WELTRUF

HEATHKIT-GERÄTE
GmbH

6079 Sprendlingen bei Frankfurt
Robert-Bosch-Straße Nr. 32-38
Tel. 06103 · 68971, 68972, 68973