

MATHEMATIK  
FÜR NATURWISSENSCHAFT UND TECHNIK  
HERAUSGEGEBEN VON H. HEINRICH UND H. SCHUBERT

BAND 8

D  
**ELEKTRONISCHE  
ANALOGRECHNER**

VON

PROF. DR. RER. NAT. HABIL. HELMUT ADLER  
Direktor des Instituts für Maschinelle Rechentechnik  
der Technischen Hochschule Ilmenau

*Mit 273 Abbildungen und 7 Tabellen  
Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage*



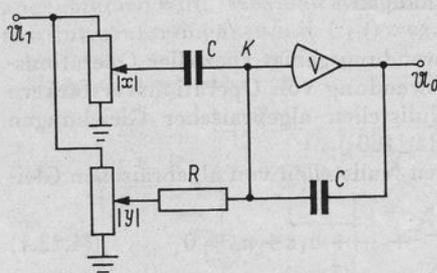
VEB DEUTSCHER VERLAG DER WISSENSCHAFTEN  
BERLIN 1968

Wegen  $u_1 = U_1 \sin \omega t$  erhält man

$$\frac{u_1}{P} = \int u_1 dt = -U_1 \frac{\sin \omega \left( t + \frac{\pi}{2} \right)}{\omega} = \frac{-i}{\omega} u_1 \quad (4.12.6)$$

und damit

$$u_0 = \left( -|x| + \frac{|y| i}{\omega RC} \right) u_1. \quad (4.12.7)$$



Wählt man  $\omega RC = 1$ , so folgt schließlich Gleichung (4.12.2). Bezüglich Einzelheiten der übrigen Recheneinheiten für dieses Spezialrechengesetz sei auf die zitierte Literatur verwiesen.

Abb. 69. Schaltung zur Bildung von  $u_0 = (-|x'| + i|y|) u_1$

### § 13. Umkehrbare Operationsverstärker

Von PUCHOW und seinen Mitarbeitern (vgl. [336]) wurden in den letzten Jahren verschiedene Arbeiten über sog. umkehrbare Operationsverstärker veröffentlicht. Darunter versteht man Operationsverstärkerschaltungen, bei denen im Gegensatz zu den bisher behandelten Schaltungen eine eindeutige Zuordnung der Ein- und Ausgänge nicht besteht. Abb. 70 zeigt die Grundschaltung eines solchen Systems mit Angabe der Ströme, Spannungen, Rechenimpedanzen  $\mathfrak{R}_k$  und den Hilfsimpedanzen  $\mathfrak{R}'_k$ . Mit  $I''_k$  werden die Ströme gekennzeichnet, die von außen in die Schaltung eingespeist werden. Der Knotenpunktsatz liefert folgende Beziehungen:

$$1. \quad \sum_{j=1}^n \frac{U_K - x_j}{\mathfrak{R}_j} = -I_e \approx 0, \quad (4.13.1)$$

$$2. \quad \frac{x_j - U_K}{\mathfrak{R}_j} + \frac{x_j - U_0}{\mathfrak{R}'_j} + I''_j = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (4.13.2)$$

$$3. \quad \sum_{j=1}^n \frac{U_0 - x_j}{\mathfrak{R}'_j} = -I_a. \quad (4.13.3)$$

Zwischen  $U_0$  und  $U_K$  besteht wiederum der Zusammenhang

$$U_0 = A U_K.$$

Für  $U_K$  erhält man

$$U_K = \frac{\sum_{j=1}^n \left[ x_j \left( 1 + \frac{\mathfrak{R}_j}{\mathfrak{R}'_j} \right) + I''_j \mathfrak{R}_j \right]}{n + A \sum_{j=1}^n \frac{\mathfrak{R}_j}{\mathfrak{R}'_j}}$$

und wegen  $|A| \rightarrow$

Diese Gleichung s  
verstärkers dar. I

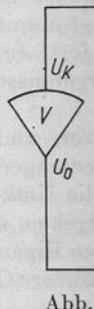
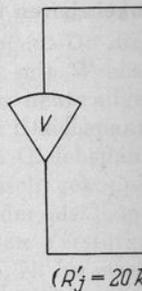


Abb.



( $R'_j = 20 k$ )

Abb. 71.  
Konstant

$n-1$  Klemmen S  
chung (4.13.4) ge  
einen umkehrbar  
ein, so entnimmt  
nimmt man  $x_1 =$

mit der Grundgle

dieser Schaltung  
bei der Different  
beseitigt.

Die Gleichung  
schaften des um

und wegen  $|A| \rightarrow \infty \quad U_K \rightarrow 0$ . Somit folgt aus (4.13.1)

$$(4.12.6) \quad \sum_{j=1}^n \frac{x_j}{R_j} = 0 \quad (4.13.4)$$

(4.12.7)

Diese Gleichung stellt die grundlegende Beziehung des umkehrbaren Operationsverstärkers dar. Das Bemerkenswerte dieser Schaltung ist, daß man an beliebigen

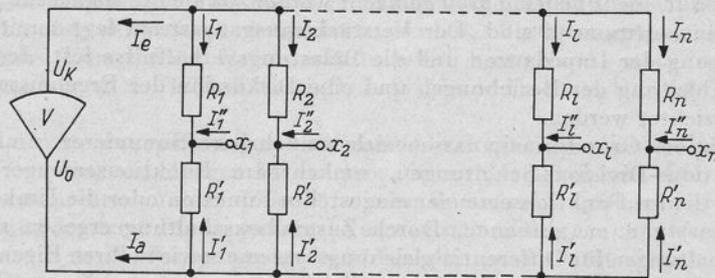
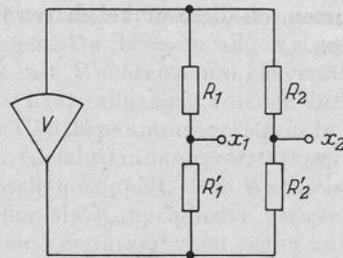
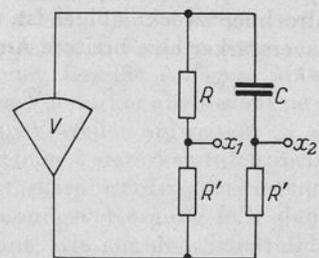


Abb. 70. Zum Prinzip des umkehrbaren Operationsverstärkers



$(R'_j = 20 \text{ k}\Omega, R_j = 200 \text{ k}\Omega)$   
 $j=1,2$

Abb. 71. Der umkehrbare Konstantenmultiplizierer



$(C = 5 \mu\text{F}, R' = 20 \text{ k}\Omega)$   
 $R = 200 \text{ k}\Omega$

Abb. 72. Das umkehrbare Differenzier-Integrierelement

$n-1$  Klemmen Spannungen  $x_j$  eingeben und an einer  $n$ -ten Klemme die der Gleichung (4.13.4) genügende Ergebnisspannung entnehmen kann. So zeigt Abb. 71 einen umkehrbaren Inverter mit der Grundgleichung  $x_1 + x_2 = 0$ . Gibt man  $x_1$  ein, so entnimmt man  $x_2 = -x_1$  und umgekehrt; d. h., gibt man  $x_2$  ein, so entnimmt man  $x_1 = -x_2$ . Abb. 72 zeigt einen umkehrbaren Integrator-Differentiator mit der Grundgleichung  $x_1 + RC \frac{dx_2}{dt} = 0$ . Selbstverständlich ist bei Verwendung dieser Schaltung als Differenziererelement ( $x_2$  Eingang,  $x_1$  Ergebnis) die prinzipiell bei der Differentiation auftretende Eigenschaft der Anhebung des Störpegels nicht beseitigt.

Die Gleichungen (4.13.1), (4.13.2) und (4.13.3) gestatten, weitere wichtige Eigenschaften des umkehrbaren Operationsverstärkers abzuleiten. Die Verstärkeraus-

gangsspannung  $U_0$  muß, wie aus 2. und 1. folgt, größer sein als die Rechenspannungen  $x_j$ , und zwar gilt, wenn  $x_l$  Ergebnisspannung ist:

$$U_0 = x_l \left( 1 + \frac{\mathfrak{R}'_l}{\mathfrak{R}_l} \right).$$

Ein Verkleinern von  $R'_j$  ist mit einem Anwachsen der Ströme  $I'_j$  verbunden und somit mit einer starken Belastung des Verstärkers. Umgekehrt können auch die Impedanzen  $R_j$  nicht beliebig groß gemacht werden, da sie für die auszuführenden Operationen bestimmend sind. Der Verstärkerausgangsstrom legt somit die Dimensionierung der Impedanzen und die Belastungsverhältnisse fest. Jedoch soll auf eine Ableitung der Beziehungen und eine Diskussion der Ergebnisse im einzelnen verzichtet werden.

Nach diesem Grundprinzip lassen sich umkehrbare Summierer, umkehrbare Multiplikations-Divisions-Schaltungen, umkehrbare Funktionserzeuger (es ist wahlweise die im Funktionserzeuger eingestellte Funktion oder die Umkehrfunktion bildbar) u. a. m. aufbauen. Durch Zusammenschaltung ergeben sich u. a. Rechenschaltungen für Differentialgleichungssysteme sowie in ihren Eigenschaften bemerkenswerte Schaltungen für lineare Gleichungssysteme und lineare Optimierungsprobleme.

Da jedoch gerade für die zuletzt genannten Probleme eine Bearbeitung mittels Digitalrechner zweckmäßiger ist, bleibt abzuwarten, ob diese umkehrbaren Operationsverstärker eine breitere Anwendung finden.

## § 1.

In diesem Kapitel Gleichspannungsverstärker konstruktive Einzelheiten [158], JACKSON, A. [123].

Der in den Rechnungen von Null der Recheneinheit Verstärkung besitzt im Gegensatz zu Verstärkern, d. h. auch bei Nullspannung.

Bei repetitiven Operationsverstärkern von Frequenz dieser Verstärkeranlagen. Da diese man mit Wechselstrom daher heute allgemein über Gleichspannung.

In Gleichspannungsverstärkern galvanisch gekoppelt Glieder als Koppelglieder beiden Verstärker Abb. 73 für zwei Stufen.

Bei Wechselspannungsverstärkern Stufenzahl des Verstärkers Anodenspannung galvanisch getrennt dagegen die Anodenspannung des Gitter dieser Verstärker hervorgerufen sind zweiten Stufe eine Gitter wieder die Anodenspannung als Signalspannung Abbildung ersicht Anodenspannung der Spannungsverstärker.

Bei der Schaltung der Verstärker bei nur ein Verstärker der entsprechend m