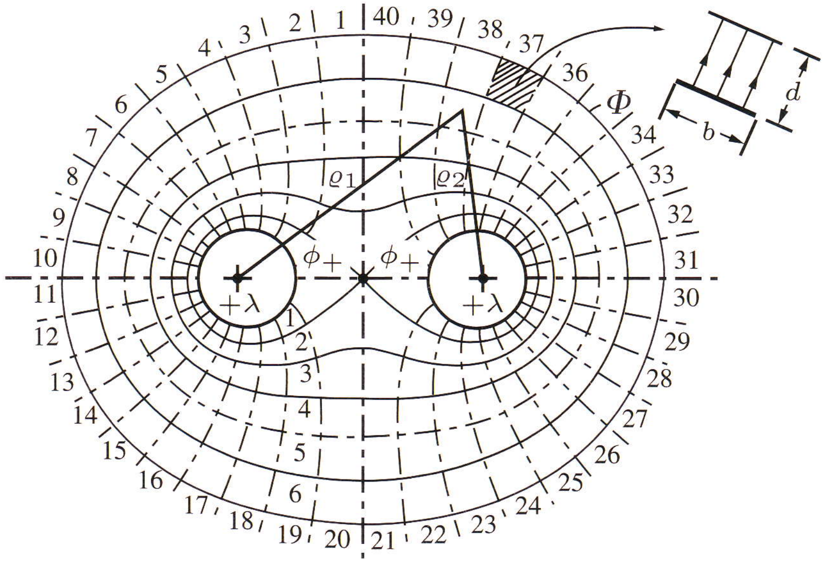
Horst Clausert | Gunther Wiesemann
Volker Hinrichsen | Jürgen Stenzel

Grundgebiete der Elektrotechnik 1

Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder

10. Auflage



Oldenbourg

Setzt man diese Werte in Gl. (2.161) ein, so wird

$$U_{\text{Amin}} = \frac{1 - x_{\text{M}}}{x_{\text{G}} - x_{\text{M}}} U_{\text{Eauf}} - \frac{U_{\text{Amin}} / v_0}{x_{\text{G}} - x_{\text{M}}}$$

$$-10\,\text{V} = \frac{1 - 0{,}5}{0{,}2 - 0{,}5} U_{\text{Eauf}} - \frac{-10\,\text{V}/10}{0{,}2 - 0{,}5}$$

$$U_{\text{Eauf}} = \underline{4\,\text{V}.}$$

Entsprechend wird $U_{\text{Eab}} = -4\,\text{V}$ (Bild 2.144b).

Anmerkung: Praktisch auftreten können kleine Werte v_0 z. B., wenn man Verstärker aus diskreten Bauelementen aufbaut oder statt des Operationsverstärkers einen Elektrometerverstärker (Bild 2.122b) mit kleinem Wert v_{ges} verwendet.

Spannungsgesteuerte Stromquelle

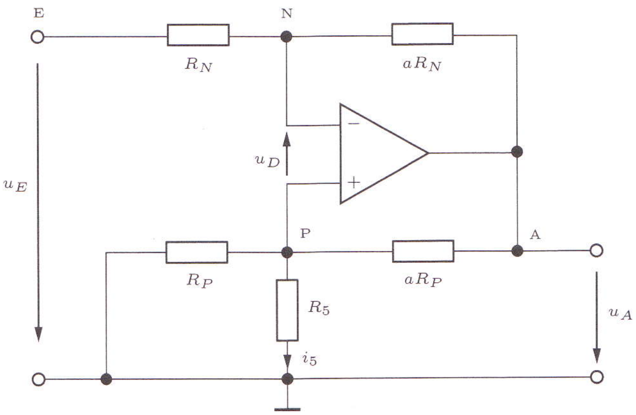


Bild 2.145 *Invertierende spannungsgesteuerte Stromquelle.*

In der Schaltung in Bild 2.145 überwiegt die Gegenkopplung in jedem Fall (d. h. auch bei beliebig hoher Leerlaufverstärkung v_0) die Mitkopplung, denn es gilt

$$x_{\text{G}} = \frac{R_{\text{N}}}{R_{\text{N}} + aR_{\text{N}}} = \frac{1}{1+a} \quad \text{und}$$

$$x_{\text{M}} = \frac{\dfrac{R_{\text{P}} R_5}{R_{\text{P}} + R_5}}{\dfrac{R_{\text{P}} R_5}{R_{\text{P}} + R_5} + aR_{\text{P}}} = \frac{1}{1 + a(1 + R_{\text{P}} / R_5)}; \qquad \text{also ist}$$

$$x_{\text{G}} > x_{\text{M}}.$$

Beispiel 2.41

Invertierende spannungsgesteuerte Stromquelle (Übersteuerungsgrenzen)

In der Schaltung 2.145 ist die Gegenkopplung stärker als die Mitkopplung. Innerhalb eines bestimmten Bereiches

$$U_{\text{Eu}} \leqq u_{\text{E}} \leqq U_{\text{Eo}}$$

kann die Schaltung also linear verstärken. Vereinfachend soll $v_0 = \infty$ gesetzt werden, so dass $u_D = 0$ ist, wenn der Verstärker nicht übersteuert wird.

a) Wie hängt beim nichtübersteuerten Verstärker i_5 von u_E und den Widerständen ab?

b) Wie hängen die Aussteuerungsgrenzen U_{Eo} und U_{Eu} von den Widerständen und U_{Amax} ab?

c) Es sei $a = 1$, $R_p = 1\ \text{k}\Omega$; $U_{Emax} = -U_{Emin} = 1$ V.

Wie groß darf R_5 höchstens werden, wenn die für i_5 unter a) berechnete Gleichung gelten soll?

Lösung:

a) Aufstellung der Gleichungen für die Knoten N und P (Knotenanalyse):

	u_E	u_N	u_P	u_A		
N	$-G_N$	$G_N + G_N/a$	0	$-G_N/a$	0	(2.163a)
P	0	0	$G_P + G_P/a + G_5$	$-G_P/a$	0	(2.163b)

Aus Gl. (2.163b) folgt

$$u_A = \frac{G_P/a + G_P + G_5}{G_P/a} u_P. \tag{2.163c}$$

Setzt man dies in die Gl. (2.163a) ein, so wird mit $u_N = u_P$

$$-u_E + \left[(1+1/a) - \frac{G_P/a + G_5 + G_P}{G_P}\right] u_P = 0$$

$$u_P = \frac{u_E}{1+1/a-1/a-1-G_5/G_P} = -\frac{G_P}{G_5}u_E = -\frac{R_5}{R_P}u_E$$

und wegen $i_5 = u_P/R_5$ wird

$$i_5 = -\frac{u_E}{R_p}. \tag{2.164}$$

Betrachtet man R_5 als Lastwiderstand und i_5 als den Ausgangsstrom, so ergibt sich das erstaunliche Resultat, dass der Ausgangsstrom zwar zur Eingangsspannung proportional ist, aber vom Widerstandswert R_5 selbst gar nicht abhängt. Selbstverständlich kann kein Strom vom Betrag u_E/R_P in R_5 erzwungen werden, wenn R_5 sehr groß wird (z. B. $R_5 = \infty$). Für R_5 muss es also eine Obergrenze geben, nach deren Überschreiten Gl. (2.164) nicht mehr gelten kann, weil der Verstärker dann nicht mehr im Bereich linearer Verstärkung $[U_{Du} < u_D < U_{Do}]$ arbeitet und daher die zur Berechnung von Gl. (2.164) vorausgesetzte Annahme $u_D = 0$, bzw. $u_N = u_P$, ungültig wird. Außerdem gelten auch – wie schon beim einfachen Umkehrverstärker – für u_E Grenzen. In welchen Grenzen sich R_P und u_E bewegen dürfen, wenn der Verstärker nicht übersteuert werden soll, zeigen die Aufgabenpunkte b und c.

b) Aus Gl. (2.163c) und $u_p = u_N$ ergibt sich

$$u_N = \frac{1/a}{1+1/a+G_5/G_P} u_A.$$

Setzt man dies in die Gl. (2.163a) ein, so erhält man für den linearen Zusammenhang zwischen u_A und u_E:

$$u_E = \left[\frac{1/a}{1+1/a+G_5/G_P}(1+1/a) - \frac{1}{a}\right] u_A = -\frac{G_5/G_P}{1+1/a+G_5/G_P}\frac{u_A}{a}$$

$$u_E = -\frac{R_P}{R_5}\frac{u_A}{1+a+aR_P/R_5} \tag{2.165}$$

Speziell an den Grenzen des linearen Verstärkungsbereiches gilt damit

$$U_{\mathrm{Eu} \atop (\mathrm{o})} = \frac{R_\mathrm{P} / R_5}{1 + a + aR_\mathrm{P} / R_5} U_{\mathrm{Amax} \atop (\mathrm{min})} \tag{2.166a, b}$$

c) Mit der Abkürzung $r = R_\mathrm{P}/R_5$ gilt

$$\frac{U_{\mathrm{E\,max}}}{-U_{\mathrm{A\,min}}} = \frac{r}{1+a+ar},$$

wegen $-U_{\mathrm{Amin}} = U_{\mathrm{Amax}}$ daher

$$\frac{U_{\mathrm{E\,max}}}{U_{\mathrm{A\,min}}} = \frac{r}{1+a+ar}. \tag{2.167}$$

Mit den Werten $U_{\mathrm{Emax}} = 1\ \mathrm{V}$, $U_{\mathrm{Amax}} = 13\ \mathrm{V}$; $a = 1$; $R_\mathrm{P} = 1\ \mathrm{k\Omega}$ wird

$$\frac{1\ \mathrm{V}}{13\ \mathrm{V}} = \frac{r}{1+1+r}$$

$$2 + r = 13r;\ r = R_\mathrm{P} / R_5 = 1/6$$

$$R_5 = 6\,R_\mathrm{P} = 6\ \mathrm{k\Omega}.$$

Unter den gegebenen Bedingungen darf R_5 den Wert 6 kΩ nicht überschreiten. Bei größeren Werten kommt es zur Übersteuerung.

Negativer Eingangswiderstand

Der Eingangswiderstand

$$R_\mathrm{E} = \frac{u_\mathrm{E}}{i_\mathrm{E}}$$

der Schaltung in Bild 2.141 kann negativ werden (Beispiel 2.42).

Beispiel 2.42

Negativ-Impedanz-Konverter (NIC)

R_1, R_2, R_3, R_4 und $U_{\mathrm{Amax}} = -U_{\mathrm{Amin}} = 12$ V sind gegeben. Für die Leerlaufverstärkung soll gelten: $v_0 = \infty$; (Bild 2.141).

a) Geben Sie das Spannungsverhältnis $u_\mathrm{A}/u_\mathrm{E}$ unter der Voraussetzung an, dass die Gegenkopplung überwiegt und der Verstärker nicht übersteuert wird, so dass mit $u_D \approx 0$ gerechnet werden kann.

   Wie hängt in diesem Fall $R_\mathrm{E} = u_\mathrm{E}/i_\mathrm{E}$ von R_1, R_2, R_3, R_4 ab?

b) Welche Bedingung müssen die Widerstände erfüllen, damit die Gegenkopplung überwiegt?

c) Für $R_1 = R_2 = 10\ \mathrm{k\Omega}$; $R_3 = 2R_4 = 20\ \mathrm{k\Omega}$ überwiegt die Gegenkopplung. Welche Bedingung muss u_E erfüllen, damit für diesen Fall der Verstärker nicht übersteuert wird, und wie groß wird hierbei R_E?

d) Geben Sie für den Fall $R_1 = R_2 = 10\ \mathrm{k\Omega}$; $R_3 = 2R_4 = 20\ \mathrm{k\Omega}$ den Eingangswiderstand R_E für zwei Werte von u_E an, bei denen der Verstärker übersteuert wird.

Lösung:

a) Aus Beispiel 2.40 kann das Ergebnis nach Gl. (2.160a) übernommen werden. Setzt man dort $v_0 = \infty$, so erhält man

$$\frac{u_\mathrm{A}}{u_\mathrm{E}} = \frac{1 - x_\mathrm{M}}{x_\mathrm{G} - x_\mathrm{M}}. \tag{2.168}$$

wobei die Definitionen nach Gl. (2.158) verwendet werden. Damit wird

$$i_E = \frac{u_E - u_A}{R_1 + R_2} = \frac{u_E}{R_1 + R_2}\left[1 - \frac{1 - x_M}{x_G - x_M}\right] = \frac{x_G - 1}{x_G - x_M} \cdot \frac{u_E}{R_1 + R_2}.$$

$$R_E = \frac{u_E}{i_E} = \frac{x_G - x_M}{x_G - 1}(R_1 + R_2) = R_1 - \frac{R_3}{R_4} R_2. \tag{2.169}$$

Mit $R_1 = 0$ (d. h. ohne Mitkopplung) wird übrigens

$$R_E = -\frac{R_2}{R_4} R_3$$

d. h. am Eingang der Schaltung in Bild 2.141 erscheint der mit –1 (und dem Gewichtsfaktor R_2/R_4) multiplizierte Widerstand R_3. Wenn man R_3 als Ausgangswiderstand betrachtet und $R_2 = R_4$ wählt, so hat der Eingangswiderstand ebenfalls den Betrag R_3, ist aber negativ.

b) Die Gegenkopplung überwiegt für $x_G > x_M$ (Beispiel 2.40a), d. h. für

$$\frac{R_3}{R_3 + R_4} > \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

oder

$$\boxed{\frac{R_2}{R_1} > \frac{R_4}{R_3}}\ . \tag{2.170}$$

c) Es ist $R_2/R_1 = 1$ und $R_4/R_3 = 0{,}5$; die Bedingung nach Gl. (2.170) ist also erfüllt und die Gl. (2.168) ist anwendbar:

$$\frac{u_A}{u_E} = \frac{1 - 1/2}{2/3 - 1/2} = \underline{3.}$$

Die Ausgangsspannung u_A erreicht also ihre Grenzen U_{Amin} und U_{Amax} bei $u_E = \pm 4$ V (Bild 2.146). Damit der Verstärker nicht übersteuert wird, muss demnach gelten:

$$-4\,\text{V} \le u_E \le +4\,\text{V}.$$

Als Eingangswiderstand ergibt sich $R_E = 10\ \text{k}\Omega - 2 \cdot 10\ \text{k}\Omega = \underline{-10\ \text{k}\Omega.}$

d) Bei $u_D = 10$ V wird $R_E = 24$ V/0,6 mA = 40 kΩ;
bei $u_D = 2$ V wird $R_E = 8$ V/– 0,2 mA = –40 kΩ.

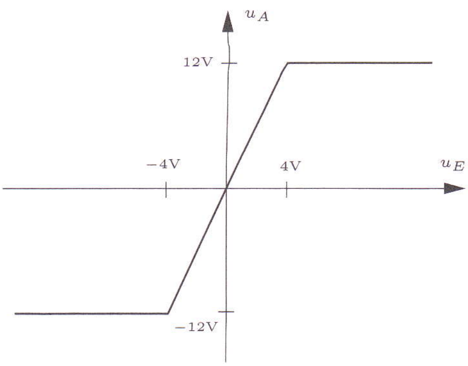


Bild 2.146 *Grenzen der linearen Verstärkung eines NIC.*