

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.1. Lineare Grundschaltungen**

#### **2.1.1. Ohmscher Spannungsteiler (frequenzunabhängig)**

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.1. Lineare Grundschaltungen**

#### **2.1.2. Tiefpass (TP) 1. Ordnung**

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.1. Lineare Grundschaltungen**

#### **2.1.3. Hochpass (HP) 1. Ordnung**

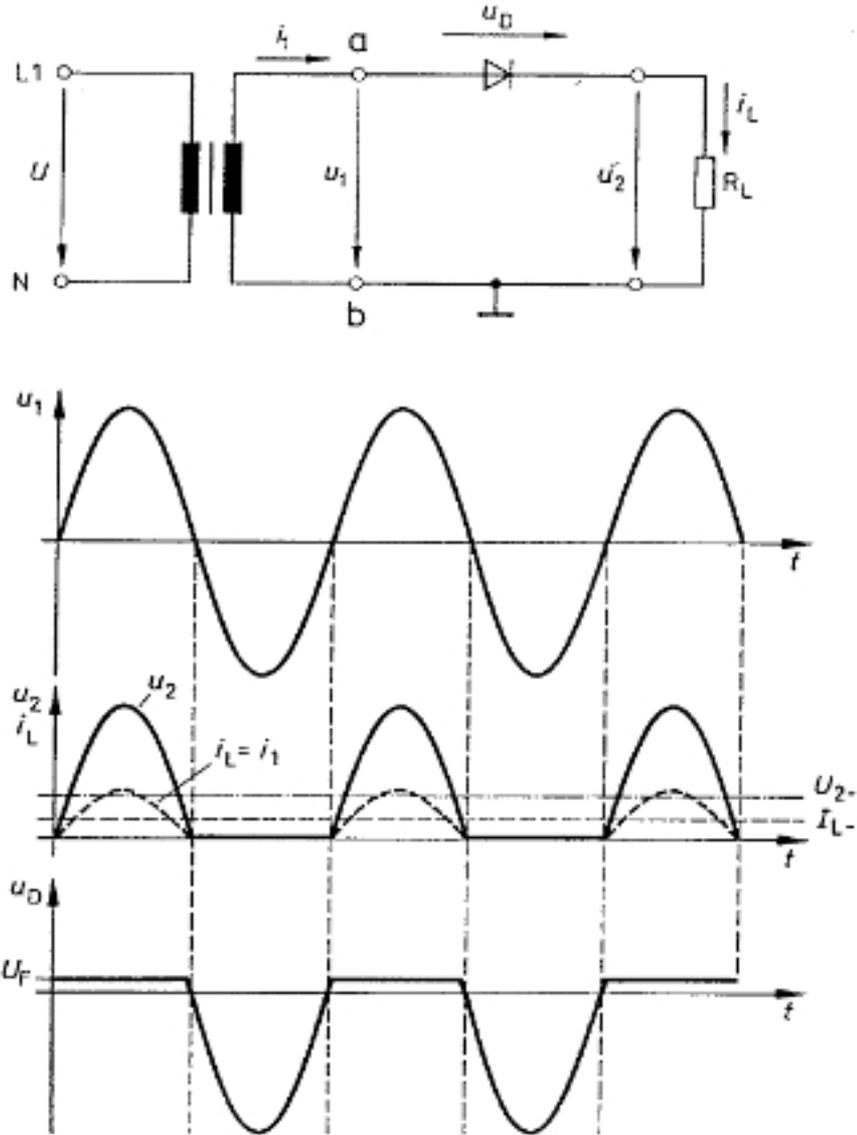
## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.2. Schaltungen mit Dioden**

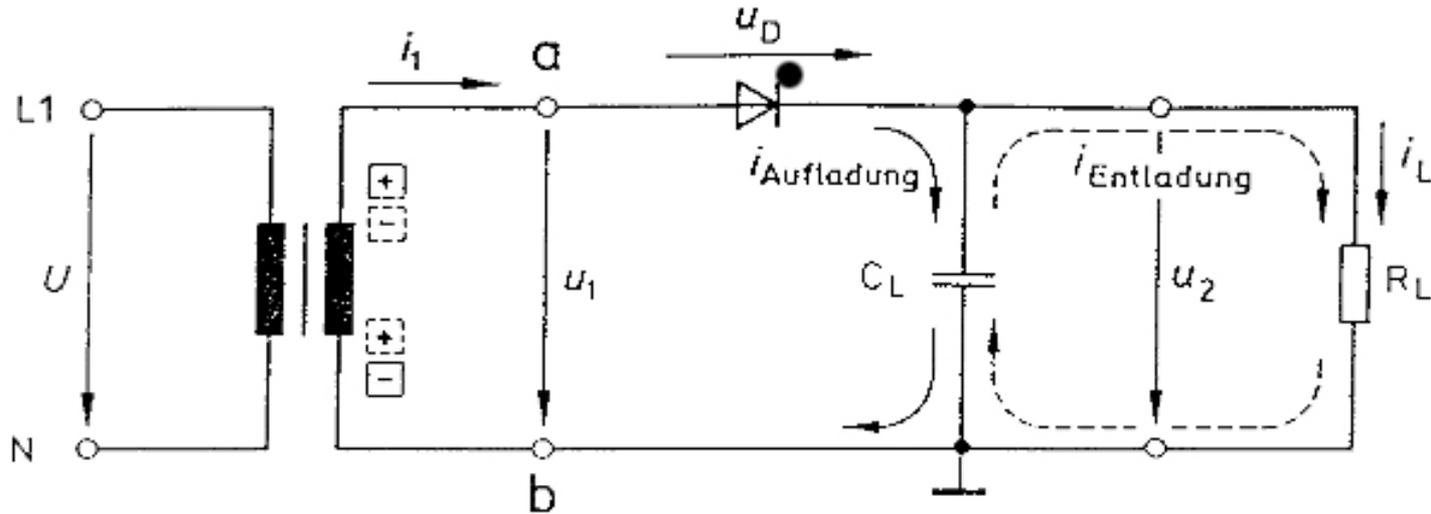
#### **2.2.0. Vorbemerkungen**

#### **2.2.1. Einpuls – Mittelpunkt – Schaltung (M1U)**

# Vorlesung - Analogelektronik

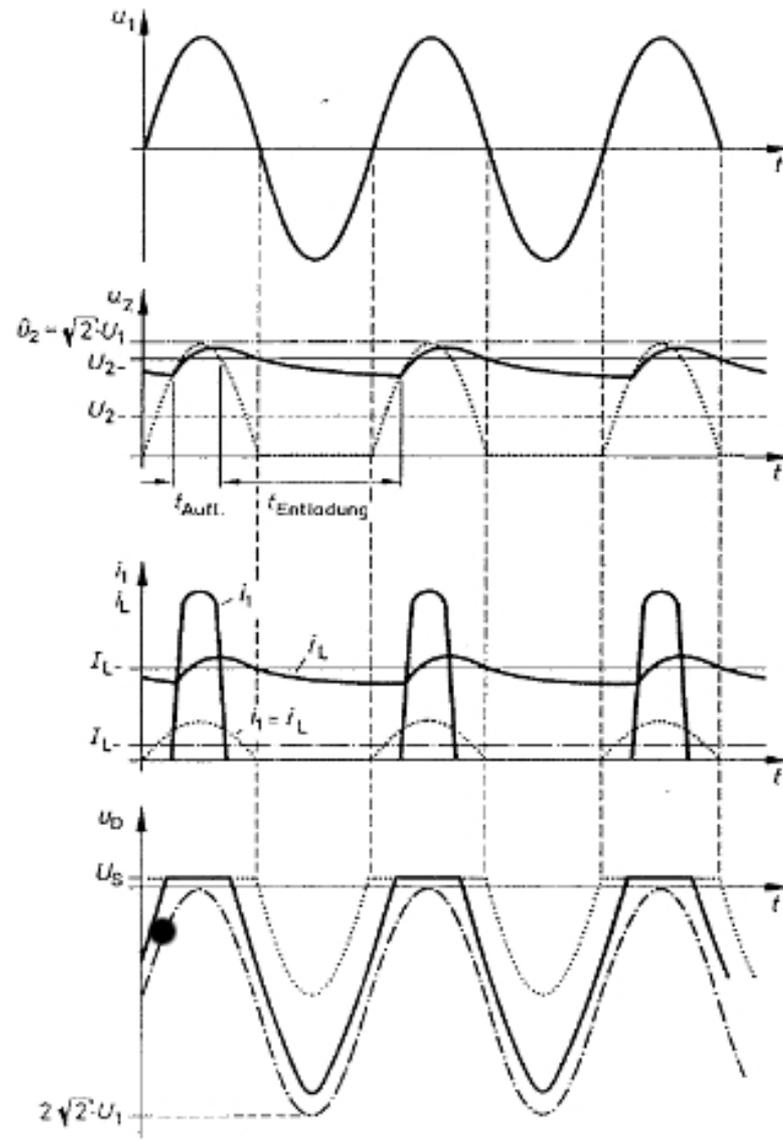


**Bild 1.47** Schaltung und Spannungsverläufe bei einer Einpuls-Mittelpunkt-Schaltung (M1U) mit ohmscher Last

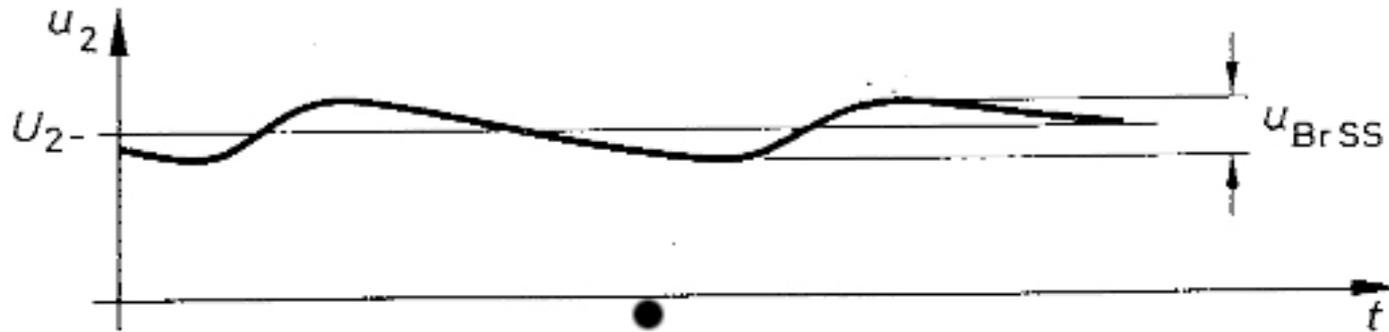


**Bild 1.48** Einweggleichrichterschaltung mit Ladekondensator und Lastwiderstand

# Vorlesung - Analogelektronik



**Bild 1.50** Spannungs- und Stromverläufe bei einer Einpuls-Mittelpunkt-Schaltung mit Ladekondensator



**Bild 1.51** Brummspannung bei einer M1U-Schaltung mit Ladekondensator

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.2. Schaltungen mit Dioden**

#### **2.2.2. Zweipuls – Schaltungen (M2U und B2U)**

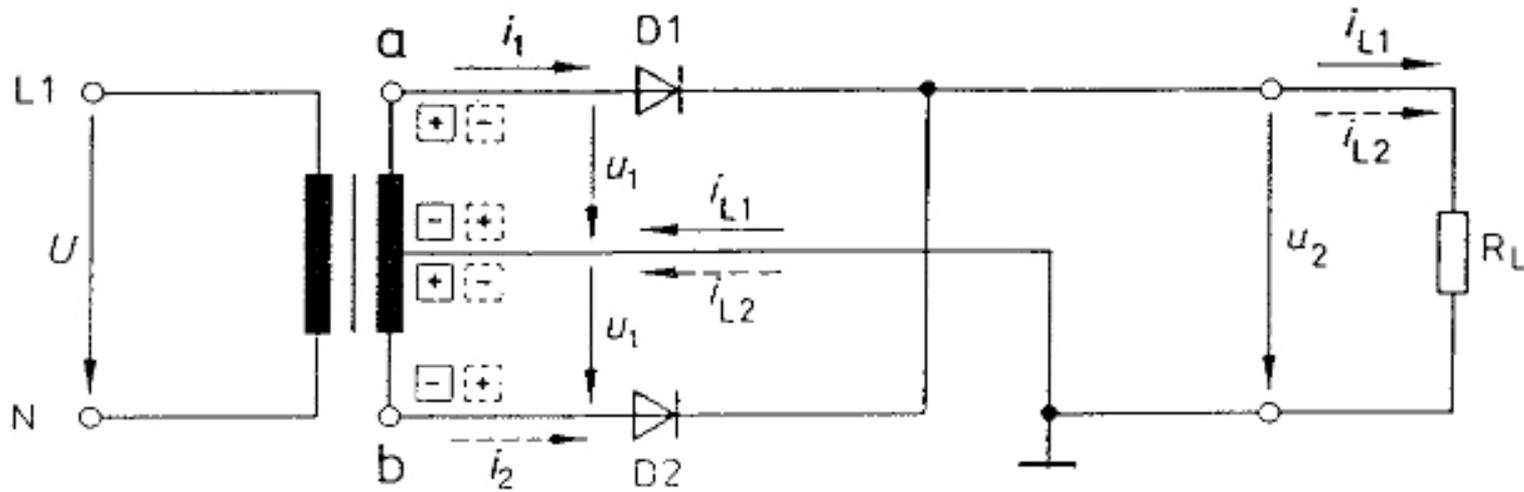
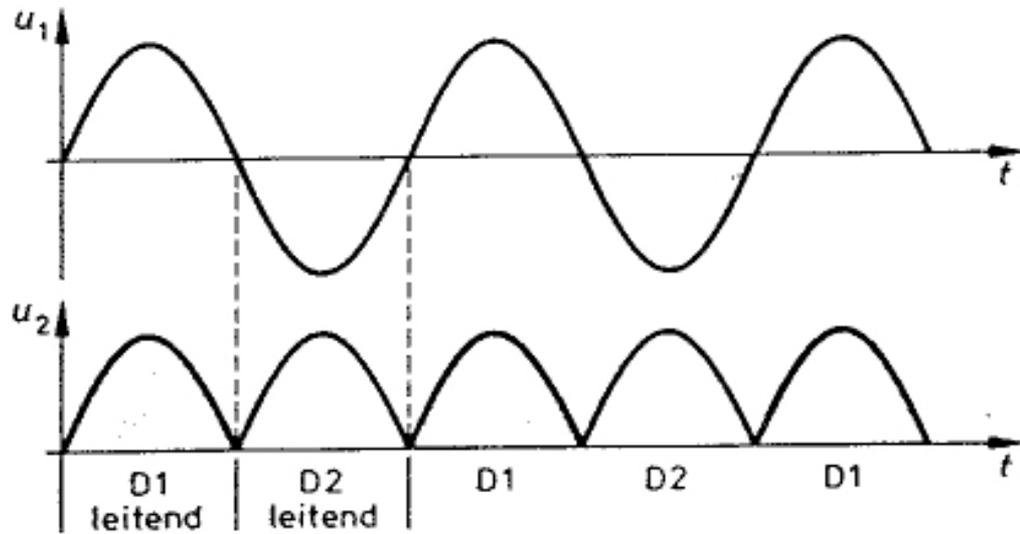


Bild 1.52 Zweipuls-Mittelpunkt-Schaltung (M2U)



**Bild 1.53** Spannungsverlauf bei einer M2U-Schaltung ohne Lade-kondensator

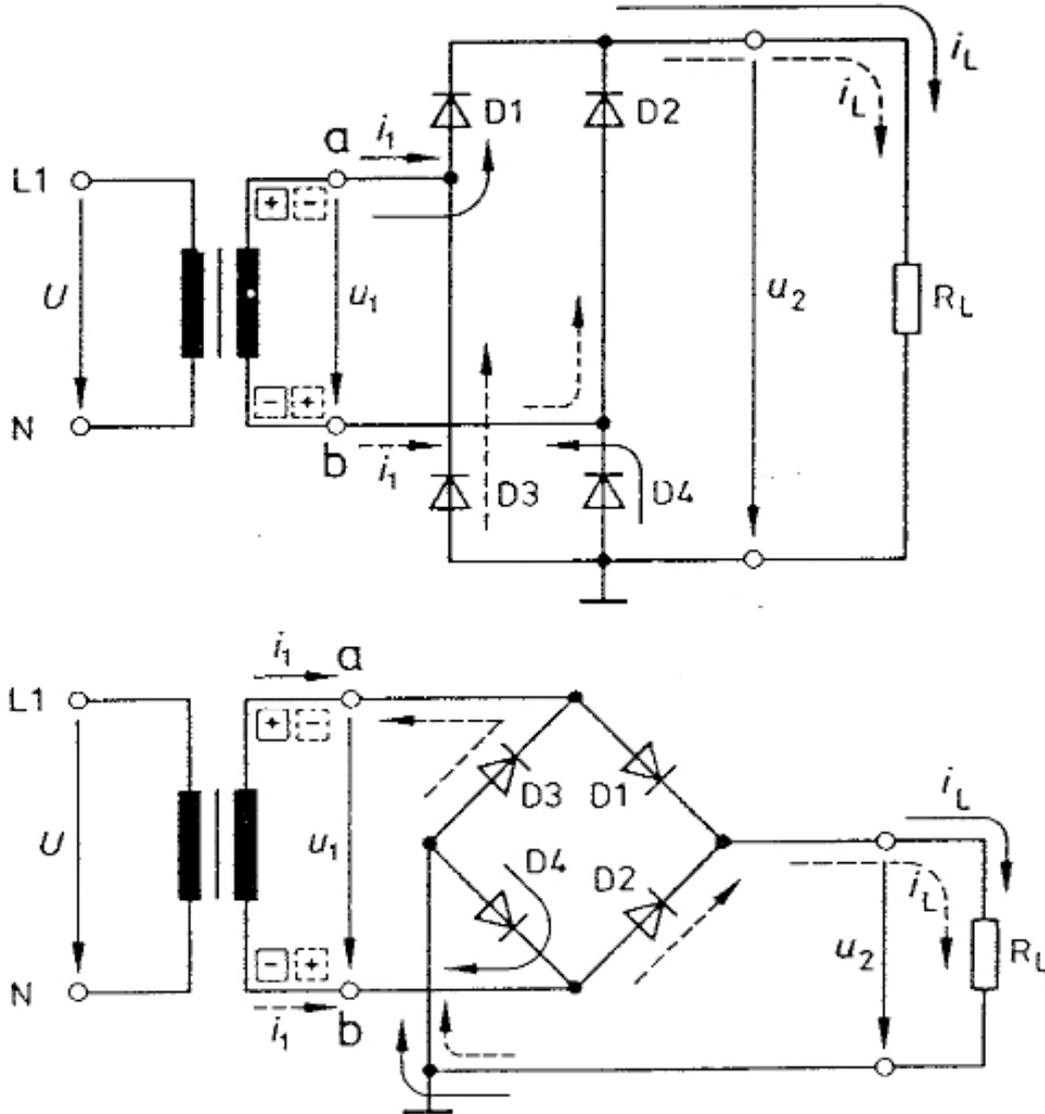
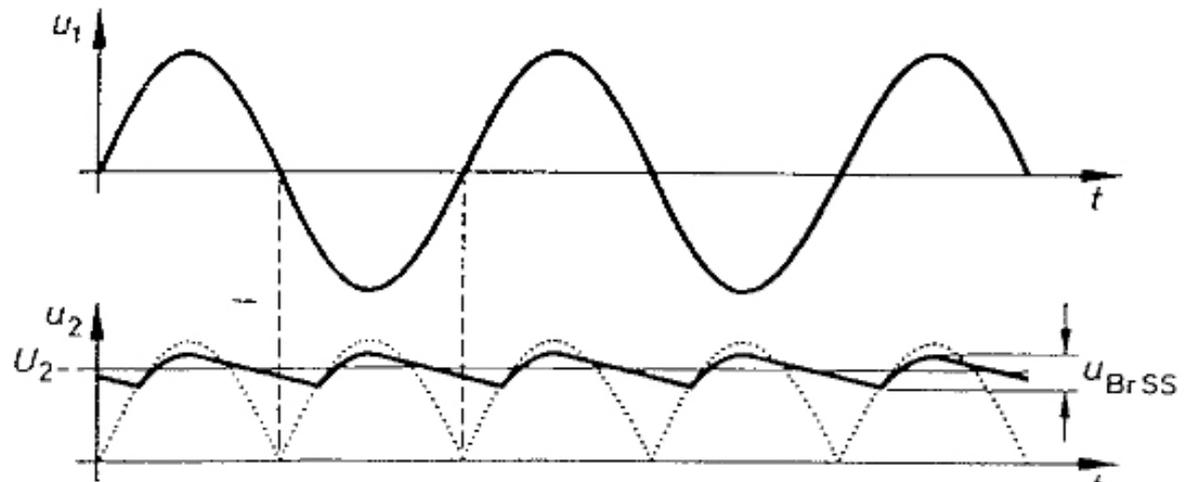
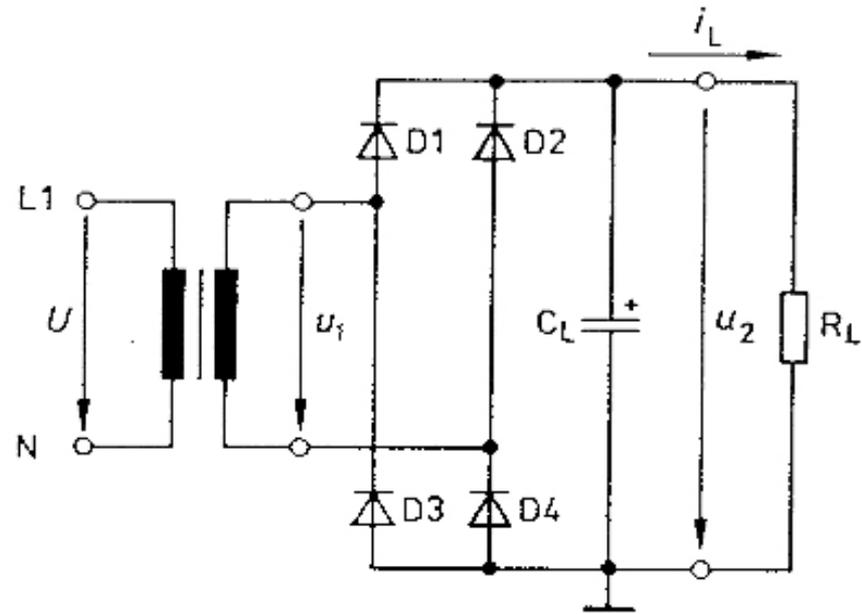


Bild 1.54 Zweipuls-Brücken-Schaltung (B2U)



**Bild 1.55** Brückenschaltung mit Ladekondensator und Verlauf der Ausgangsspannung  $u_2$

# Vorlesung - Analogelektronik

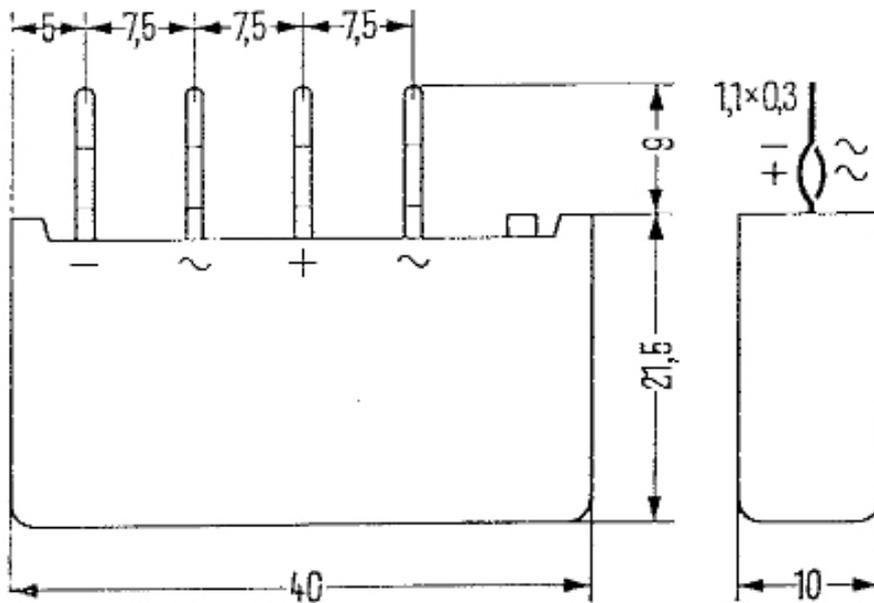
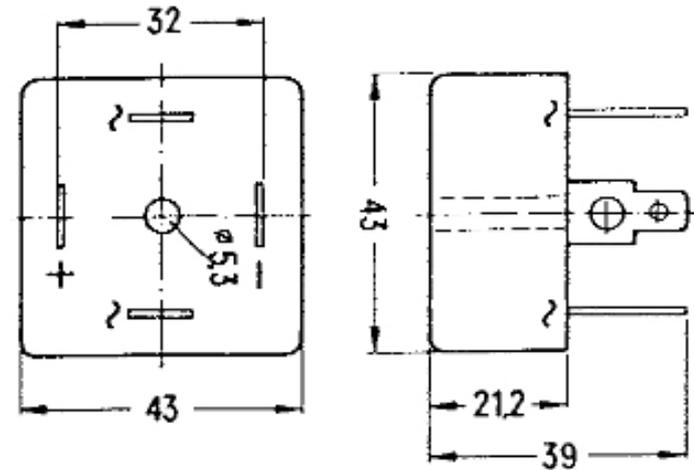


Bild 1.56 Bauformen von Gleichrichter-sätzen



Typ	$U_i$	$I_L$	Strombegrenzungswiderstand ( $R_i$ )	$C_{Lmax}$
B 40 C 800	40V	0,8 A	1 $\Omega$	2500 $\mu$ F
B 40 C 1000	40V	1,0 A	1 $\Omega$	2500 $\mu$ F
B 40 C 1500/1000	40V	1,5 A/1 A	1 $\Omega$	2500 $\mu$ F
B 40 C 3200/2200	40V	3,2 A/2,2 A	0,6 $\Omega$	5000 $\mu$ F
B 40 C 5000/3300	40V	5,0 A/3,3 A	0,5 $\Omega$	10000 $\mu$ F

Bild 1.58 Technische Daten der Baureihe B40Cxxxx

## Vorlesung - Analogelektronik

1. Buchstabe	1. Zahl	2. Buchstabe	2. Zahl
E (= Einwegschialtung)	Effektivwert	C	Nennausgangs-
M (= Mittelpunktschialtung)	der	Kennzeichnung	gleichstrom
B (= Brückenschialtung)	Nennanschluß-	für kapazitive	in
	spannung	Belastung	mA

**Bild 1.57** Kennzeichnungsschema für Gleichrichtersätze

## Vorlesung - Analogelektronik

	M1U	M2U	B2U
Leerlaufspannung $U_{2-} = \hat{u}_1$	$\sqrt{2} \cdot U_1$	$\sqrt{2} \cdot U_1$	$\sqrt{2} \cdot U_1$
Ausgangsspannung $U_{2-}$ bei Belastung	$1,2 \cdot U_1$	$1,3 \cdot U_1$	$1,3 \cdot U_1$
Ausgleichsspannung $i_{L-}$	$0,5 \cdot I_1$	$0,9 \cdot I_1$	$0,6 \cdot I_1$
Max. Sperrspannung $U_{RM}$	$2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1$	$2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1$	$\sqrt{2} \cdot U_1$
Brummspannung $U_{Br}$	$4,8 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot \frac{I_L}{C_L}$	$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot \frac{I_L}{C_L}$	$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot \frac{I_L}{C_L}$
Frequenz von $U_{Br}$	50 Hz	100 Hz	100 Hz

**Bild 1.59** Kennwerte von Gleichrichterschaltungen

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.2. Schaltungen mit Dioden**

#### **2.2.3. Siebung der Ausgangsspannung**

## Vorlesung - Analogelektronik

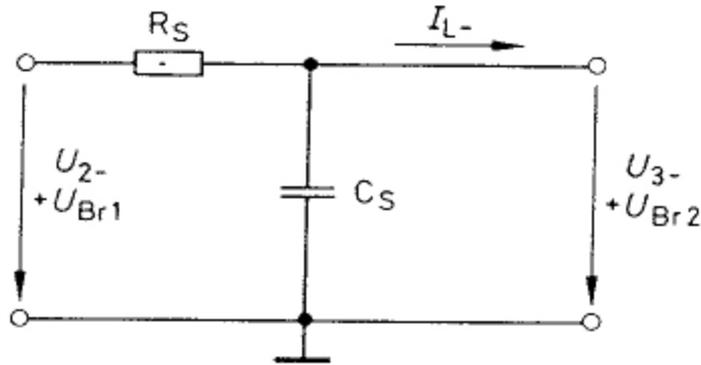


Bild 1.60 RC-Siebglied

Die Eingangsspannung des Siebgliedes liegt an einer Reihenschaltung von  $R_S$  und dem kapazitiven Widerstand  $X_C$  des Siebkondensators. Die Ausgangsspannung liegt dagegen nur an  $X_C$ . Da sich die Brummspannung  $U_{Br1}$  zu  $U_{Br2}$  wie der Gesamtwiderstand zum kapazitiven Widerstand verhält, kann für den Glättungsfaktor geschrieben werden:

$$G = \frac{U_{Br1}}{U_{Br2}} = \frac{\sqrt{R_S^2 + X_C^2}}{X_C} = \sqrt{\frac{R_S^2}{X_C^2} + 1}$$

Unter der Voraussetzung, daß bei einem Siebglied  $R_S$  groß gegenüber  $X_C$  ist, kann die Gleichung vereinfacht werden zu:

$$G \approx \frac{R_S}{X_C}$$

Mit  $X_C = \frac{1}{\omega_{Br} \cdot C_S}$  ergibt sich für den Glättungsfaktor:

$$G \approx \omega_{Br} \cdot R_S \cdot C_S$$

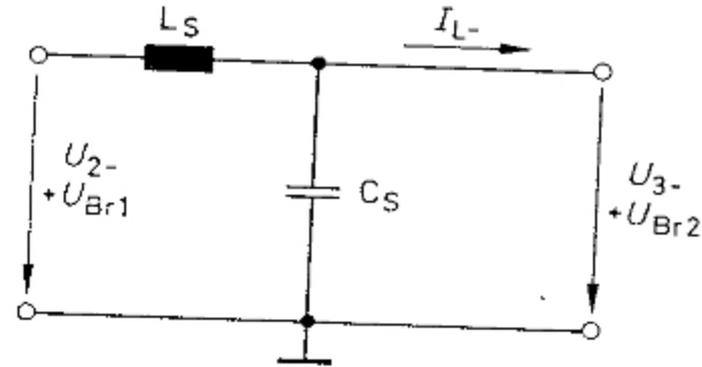


Bild 1.61 LC-Siebglied

Bei Vernachlässigung von  $R_L$  gilt für das LC-Siebglied:

$$G = \frac{U_{Br1}}{U_{Br2}} = \frac{X_L - X_C}{X_C} = \frac{X_L}{X_C} - 1$$

Da  $X_L/X_C$  bei einem Siebglied viel größer als 1 ist, kann die Gleichung vereinfacht werden zu:

$$G \approx \frac{X_L}{X_C}$$

Mit  $X_L = \omega_{Br} \cdot L_S$  und  $X_C = 1/\omega_{Br} \cdot C_S$  ergibt sich:

$$G \approx \omega_{Br}^2 \cdot L_S \cdot C_S$$

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.1. Lineare Schaltungen mit Bipolartransistoren**

##### **2.3.1.1. Einführung in die $h$ - Parameter**

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.1. Lineare Schaltungen mit Bipolartransistoren**

#### **2.3.1.2. Grundsaltungen mit Verstärkerkenngrößen**

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.1. Lineare Schaltungen mit Bipolartransistoren**

##### **2.3.1.3. Entwurf von Verstärkerschaltungen mit Bipolartransistoren**

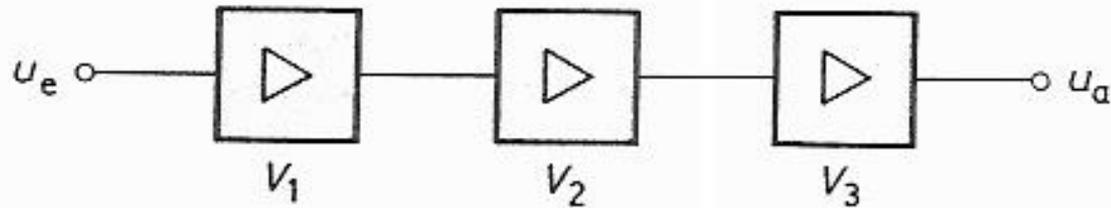
## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.1. Lineare Schaltungen mit Bipolartransistoren**

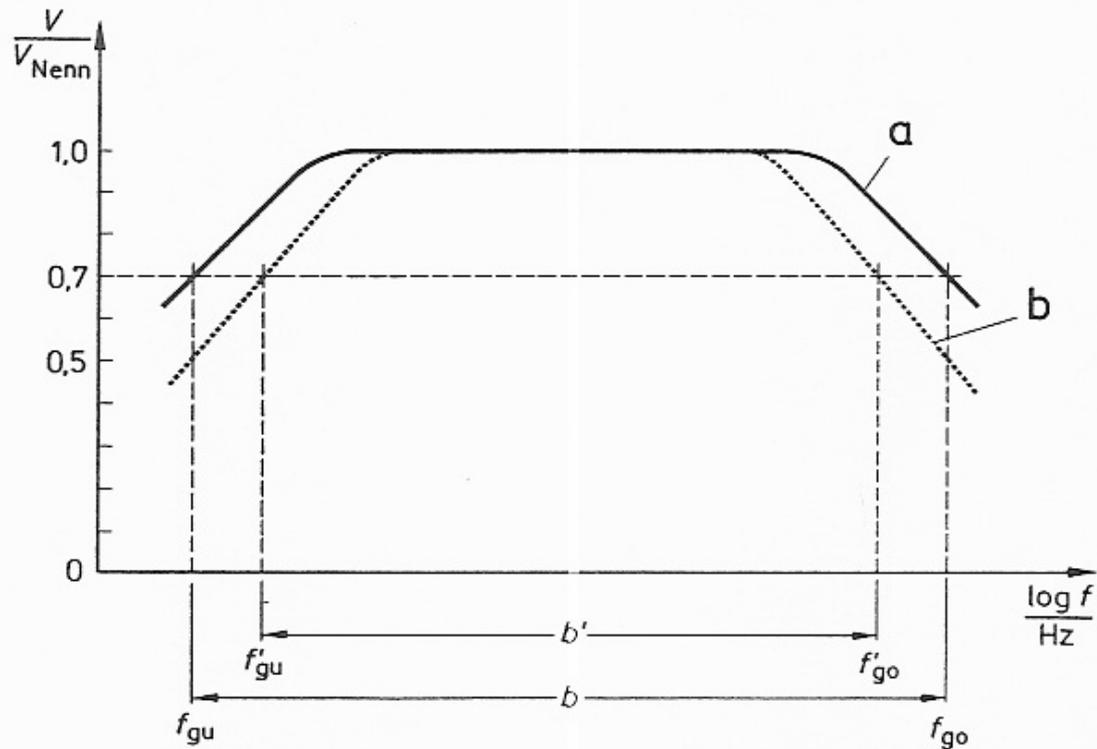
##### **2.3.1.4. Einteilung und Kennwerte von Verstärkern**

# Vorlesung - Analogelektronik



**Bild 1.10** Grundprinzip mehrstufiger Verstärker

# Vorlesung - Analogelektronik



**Bild 1.16** Idealisierter Frequenzgang von 1stufigem (a) und 2stufigem (b) Verstärker

Für die untere Grenzfrequenz eines mehrstufigen Verstärkers, der aus gleichartigen Einzelstufen aufgebaut ist, gilt:

$$f'_{gu} \approx \sqrt{n} \cdot f_{gu}$$

$n$  = Zahl der Verstärkerstufen

$f_{gu}$  = untere Grenzfrequenz der Einzelstufe

$f'_{gu}$  = untere Grenzfrequenz des Gesamtverstärkers

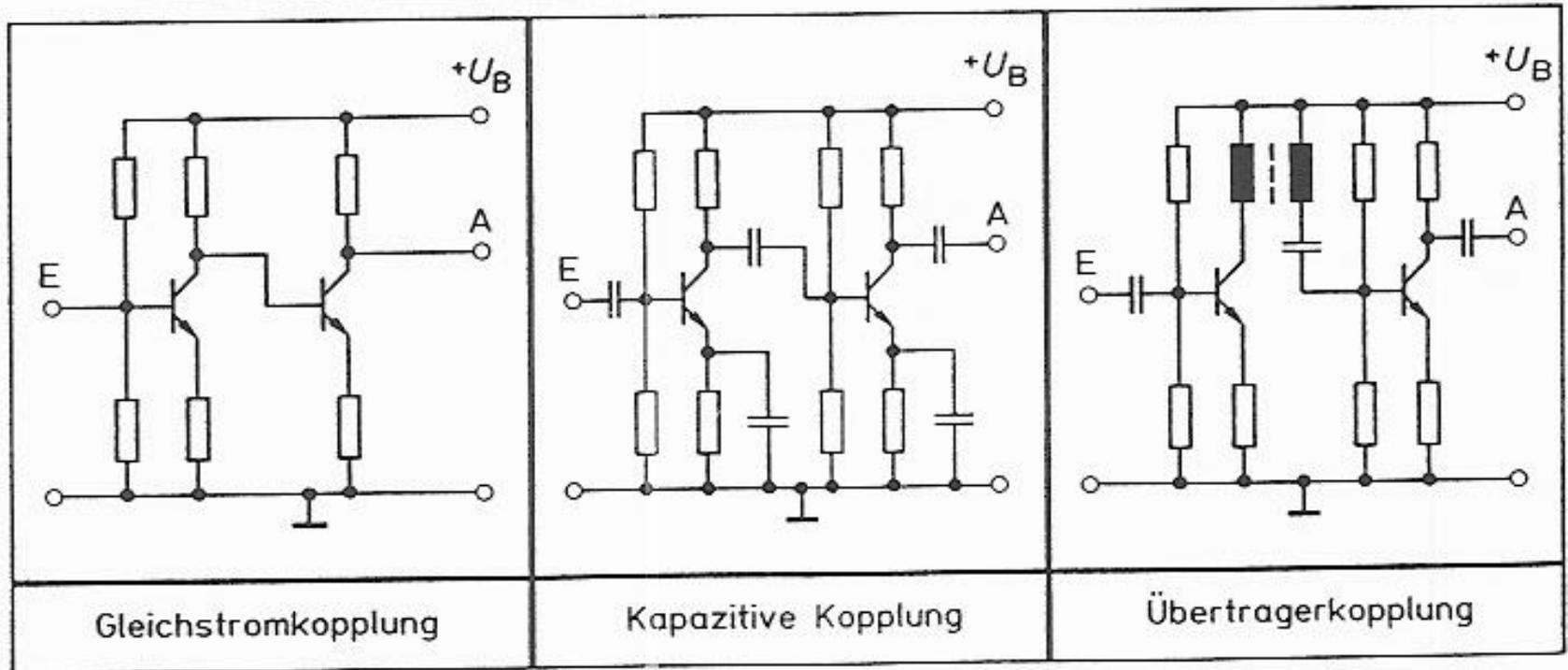
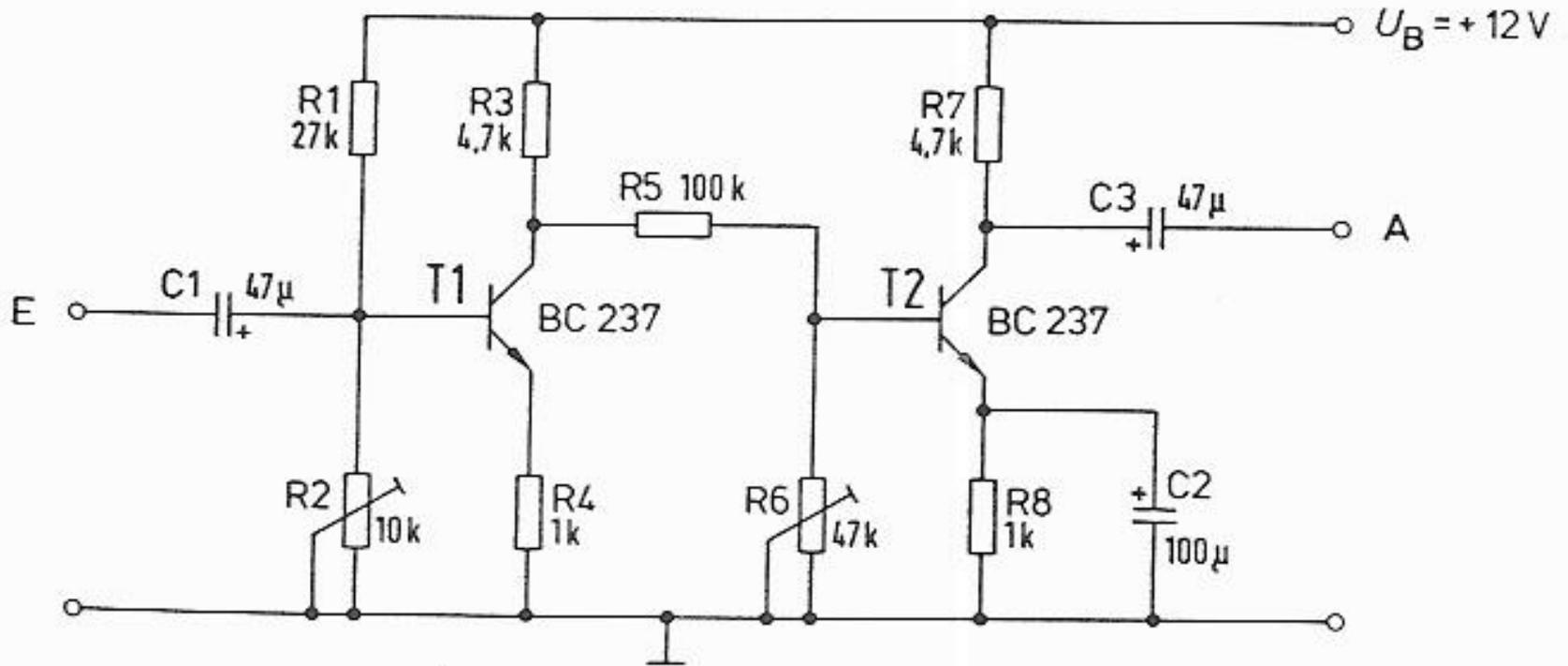
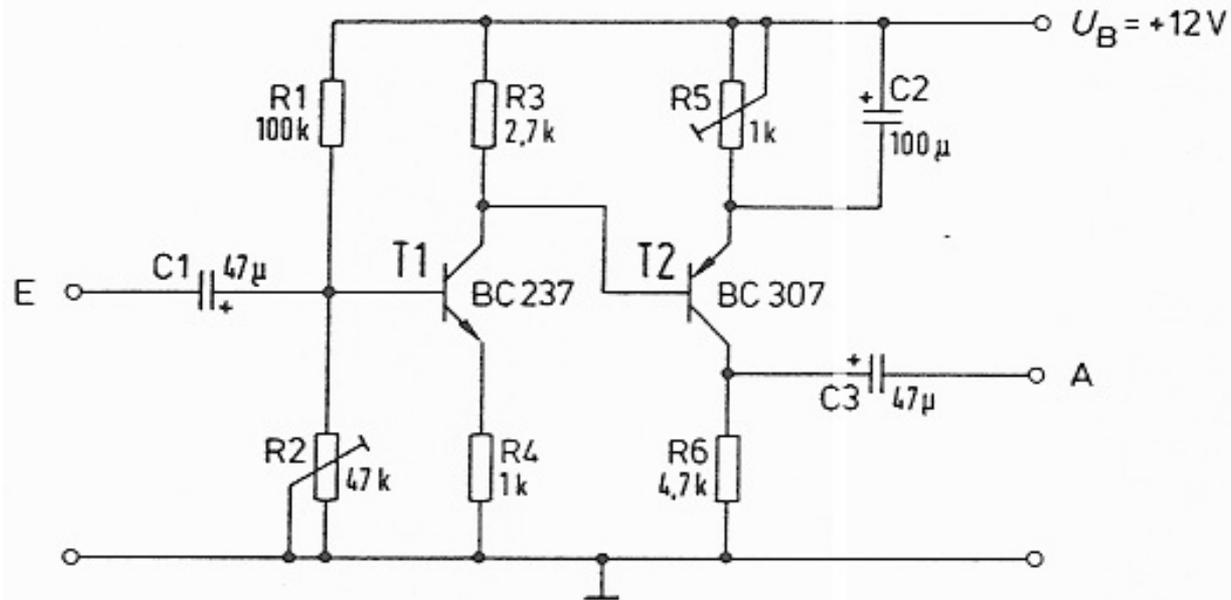


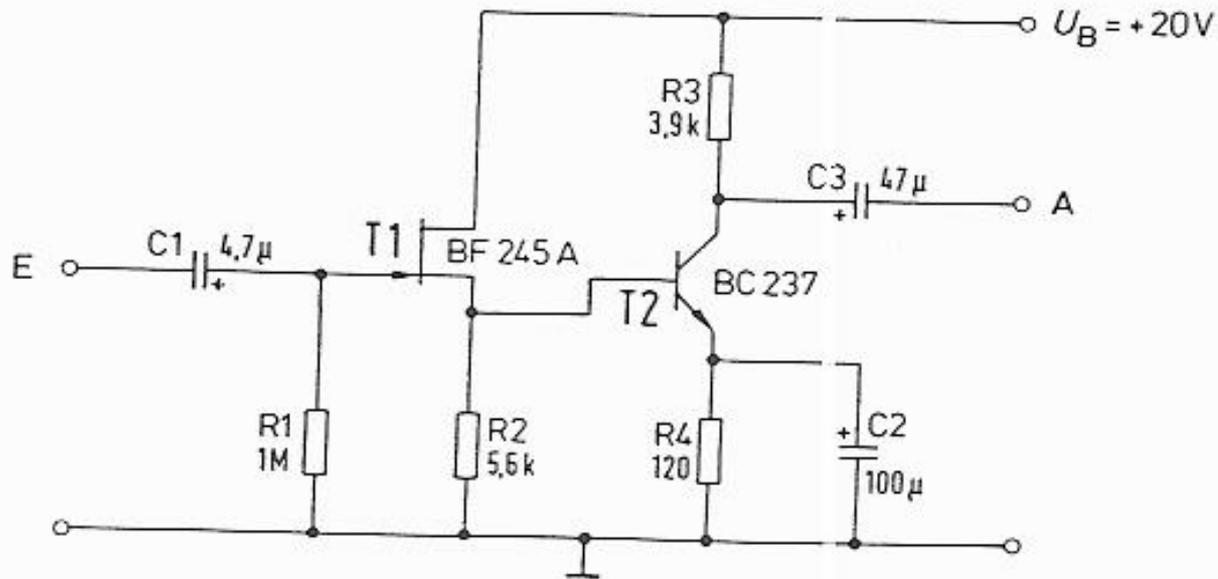
Bild 1.11 Kopplungsarten



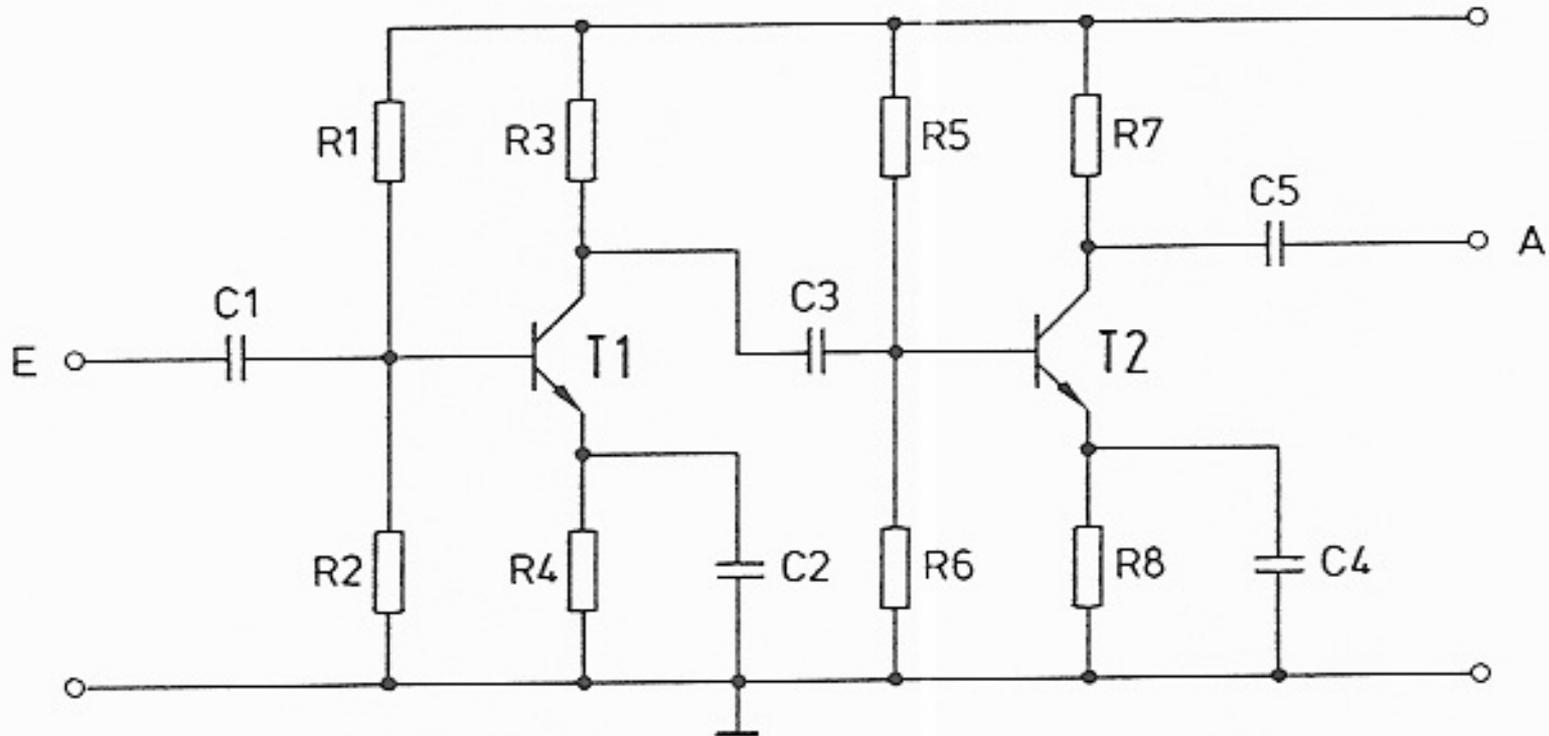
**Bild 1.12** Zweistufiger NF-Verstärker mit Gleichstromkopplung



**Bild 1.13** Zweistufiger NF-Verstärker mit komplementären Transistoren



**Bild 1.14** Gleichstromgekoppelter NF-Verstärker mit FET und bipolarem Transistor



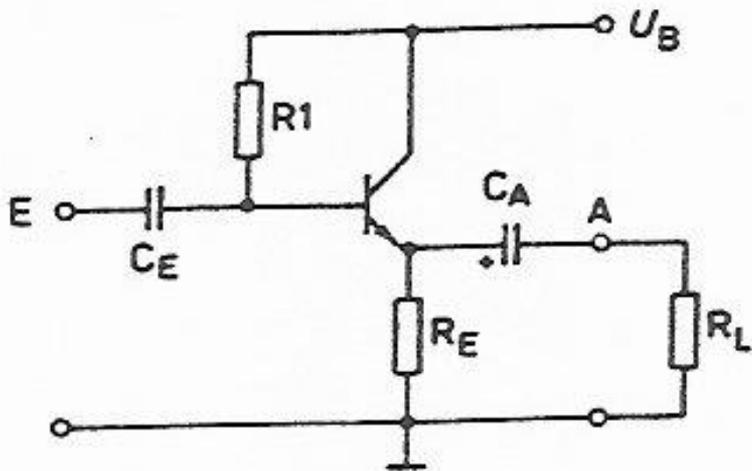
**Bild 1.15** Grundschialtung eines zweistufigen Verstärkers mit kapazitiver Kopplung

## **2. Analoge Schaltungen**

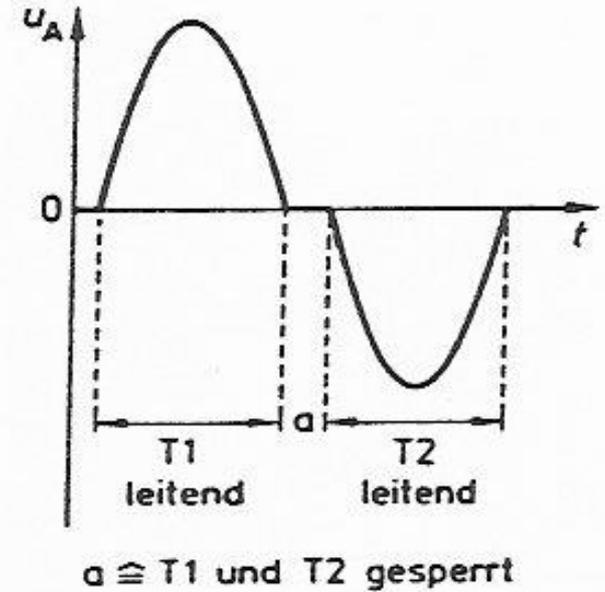
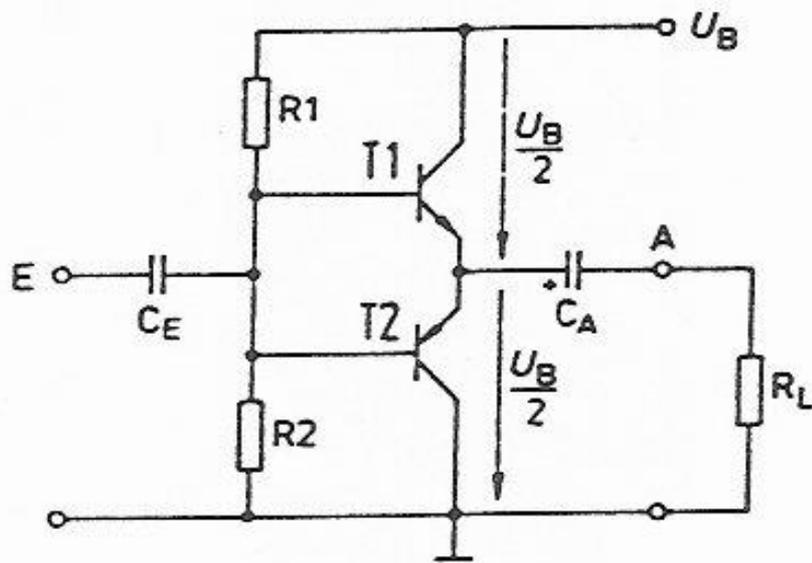
### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.1. Lineare Schaltungen mit Bipolartransistoren**

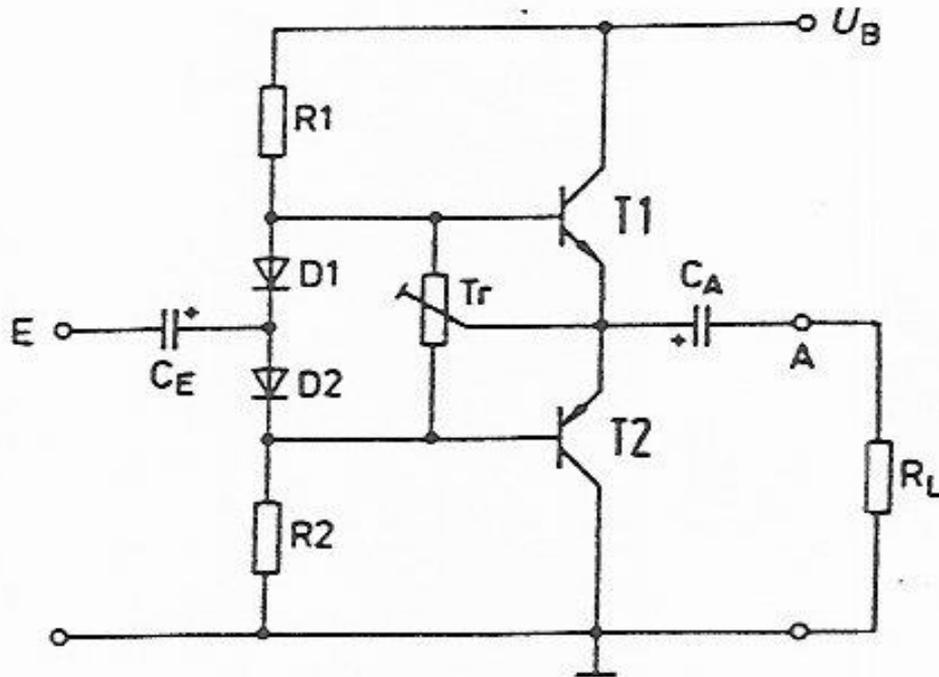
##### **2.3.1.5. Leistungsverstärker**



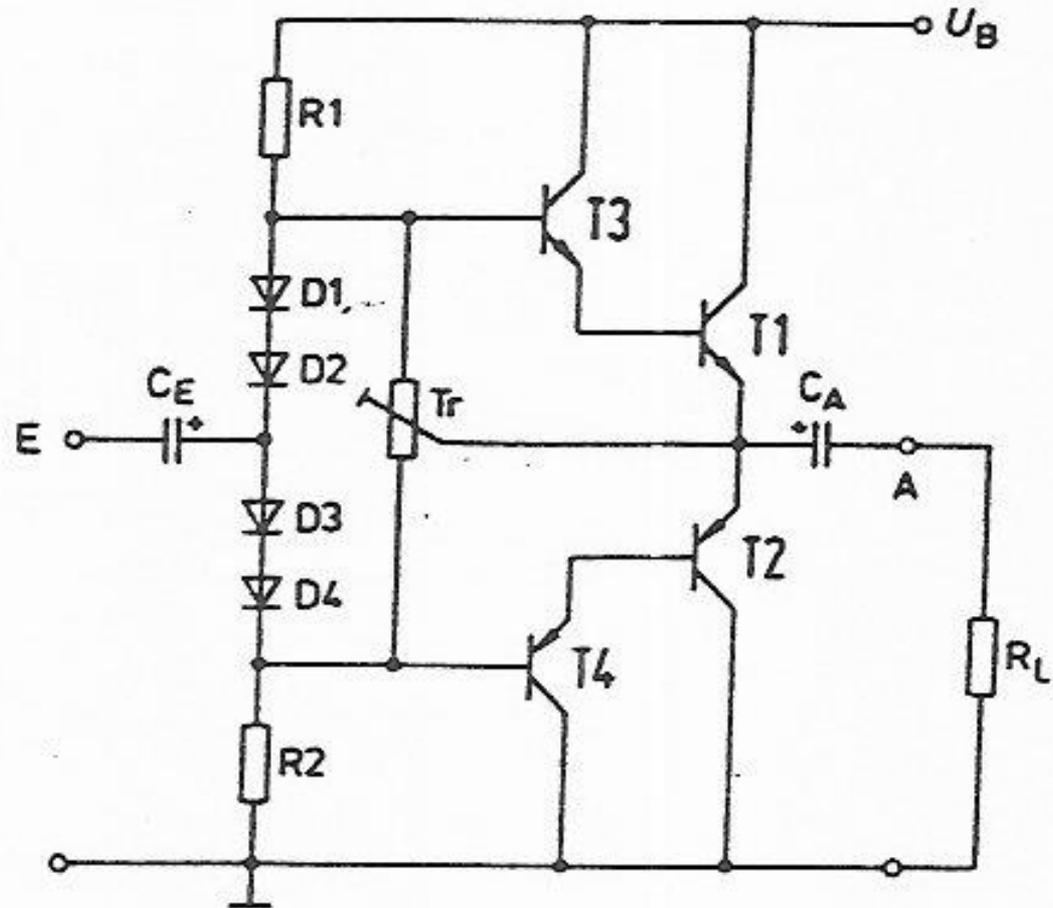
**Bild 1.19** Eintaktverstärker in Kollektorschaltung



**Bild 1.20** Gegentaktverstärker mit komplementären Transistoren



**Bild 1.21** Gegentaktverstärker für AB-Betrieb



**Bild 1.22** Gegentakt-AB-Verstärker mit Darlington-Schaltung

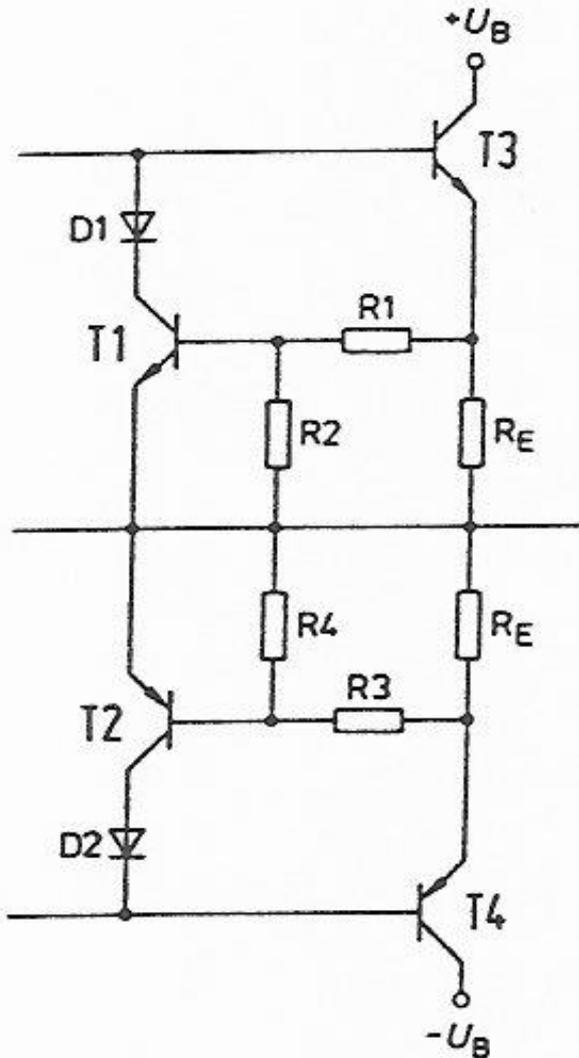
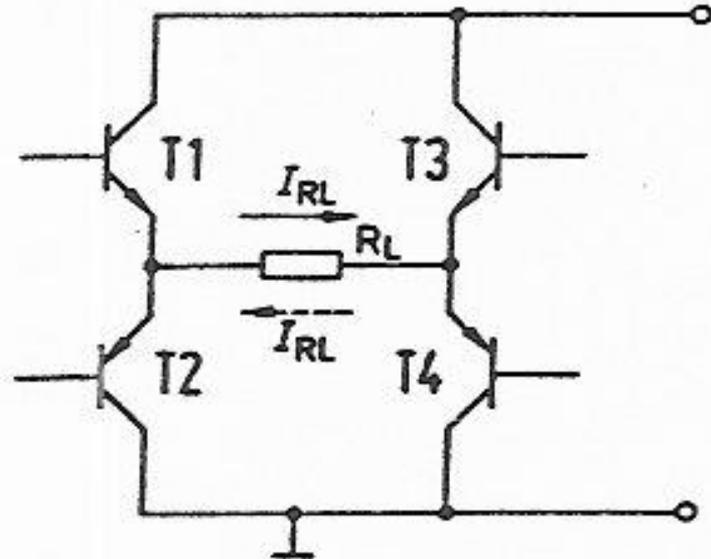


Bild 1.23 Gegentaktverstärker mit Strombegrenzung

**Bild 1.24** Prinzipschaltung eines Brückenverstärkers



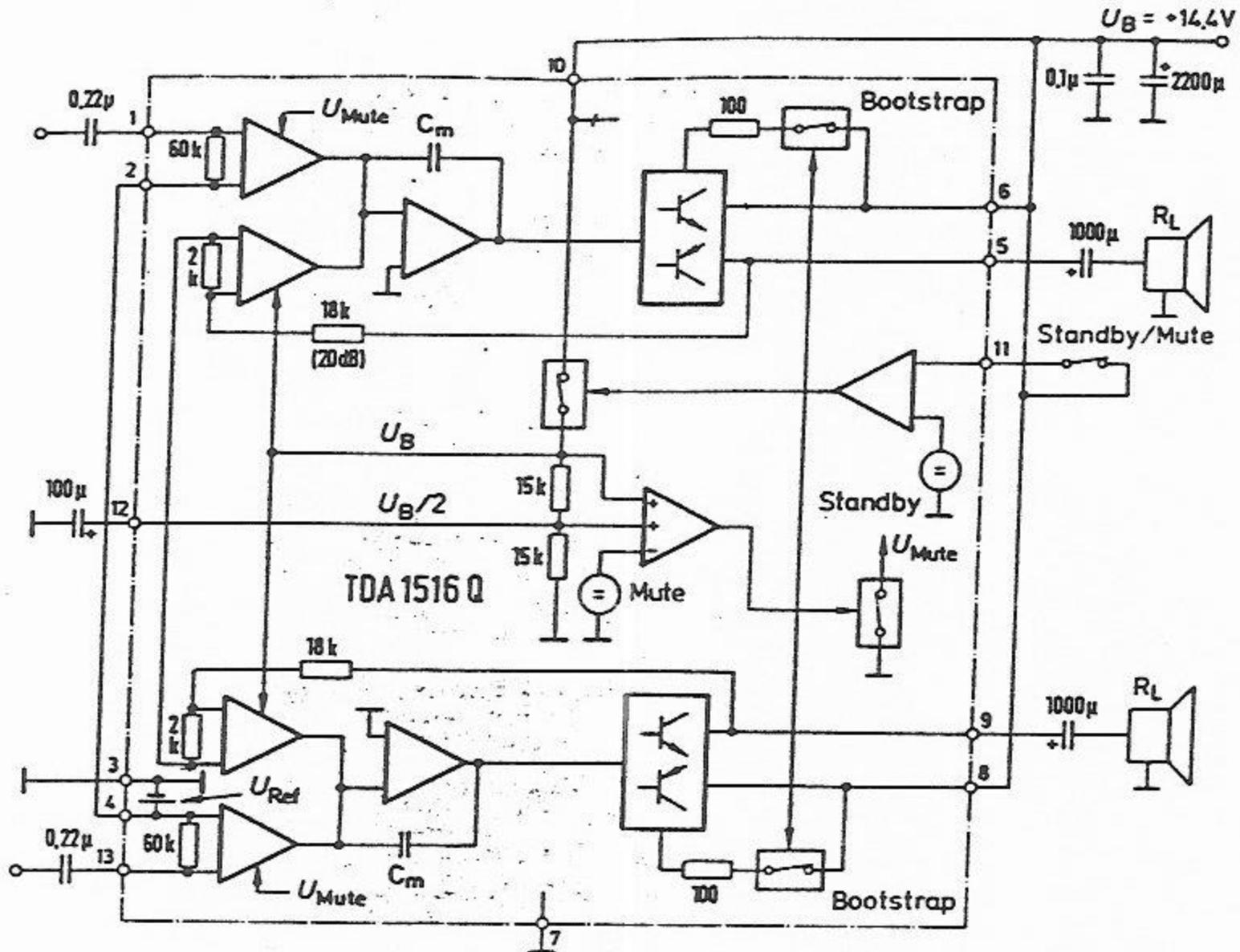


Bild 1.41 Blockschaltbild des TDA 1516Q mit Stereo-Beschaltung

Die wichtigsten Kennwerte des Leistungsverstärkers TDA 1516Q sind:

Betriebsspannung	$U_B = 14,4 \text{ V}$ (8,1 V bis 18 V)
Ausgangsleistung/Kanal	$P_0 = 8,5 \text{ W}$ bei $R_L = 2 \Omega$ und $k = 0,5 \%$
	$P_0 = 11 \text{ W}$ bei $R_L = 2 \Omega$ und $k = 10 \%$
	$P_0 = 5 \text{ W}$ bei $R_L = 4 \Omega$ und $k = 0,5 \%$
	$P_0 = 6 \text{ W}$ bei $R_L = 4 \Omega$ und $k = 10 \%$
Ausgangsleistung/Brücke	$P_0 = 17 \text{ W}$ bei $k = 0,5 \%$
	$P_0 = 22 \text{ W}$ bei $k = 10 \%$
Spannungsverstärkung fest	$V_U = 20 \text{ dB}$
Eingangswiderstand	$r_e = 60 \text{ k}\Omega$ bei Stereo-Betrieb
	$r_e = 30 \text{ k}\Omega$ bei Brückenschaltung

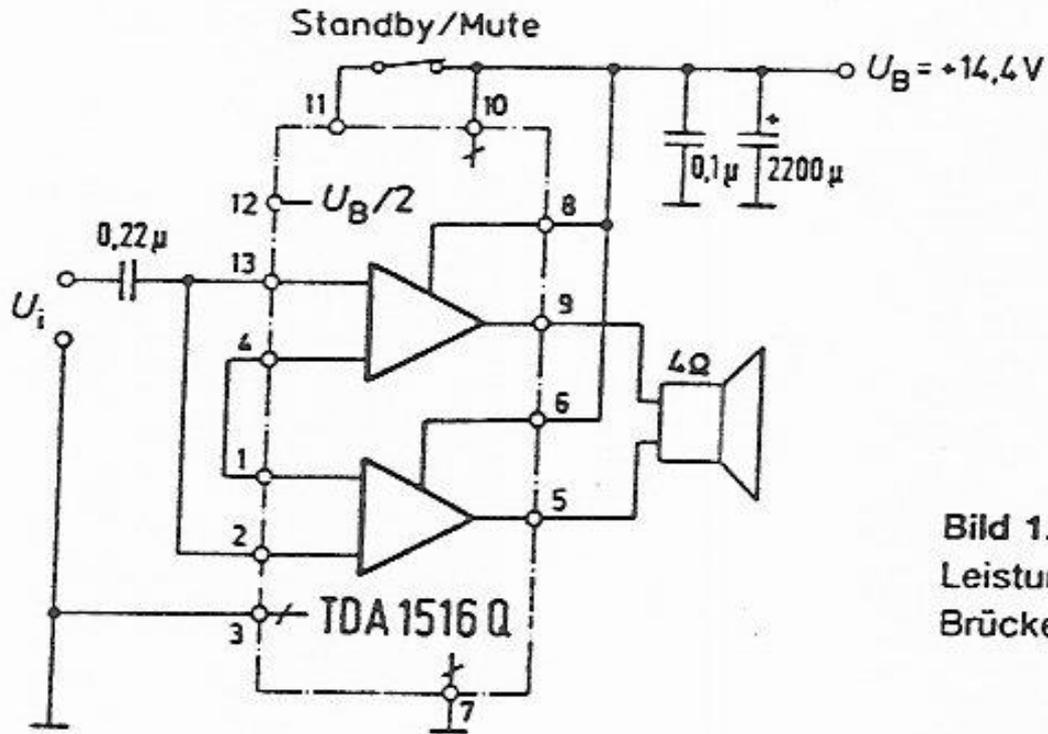
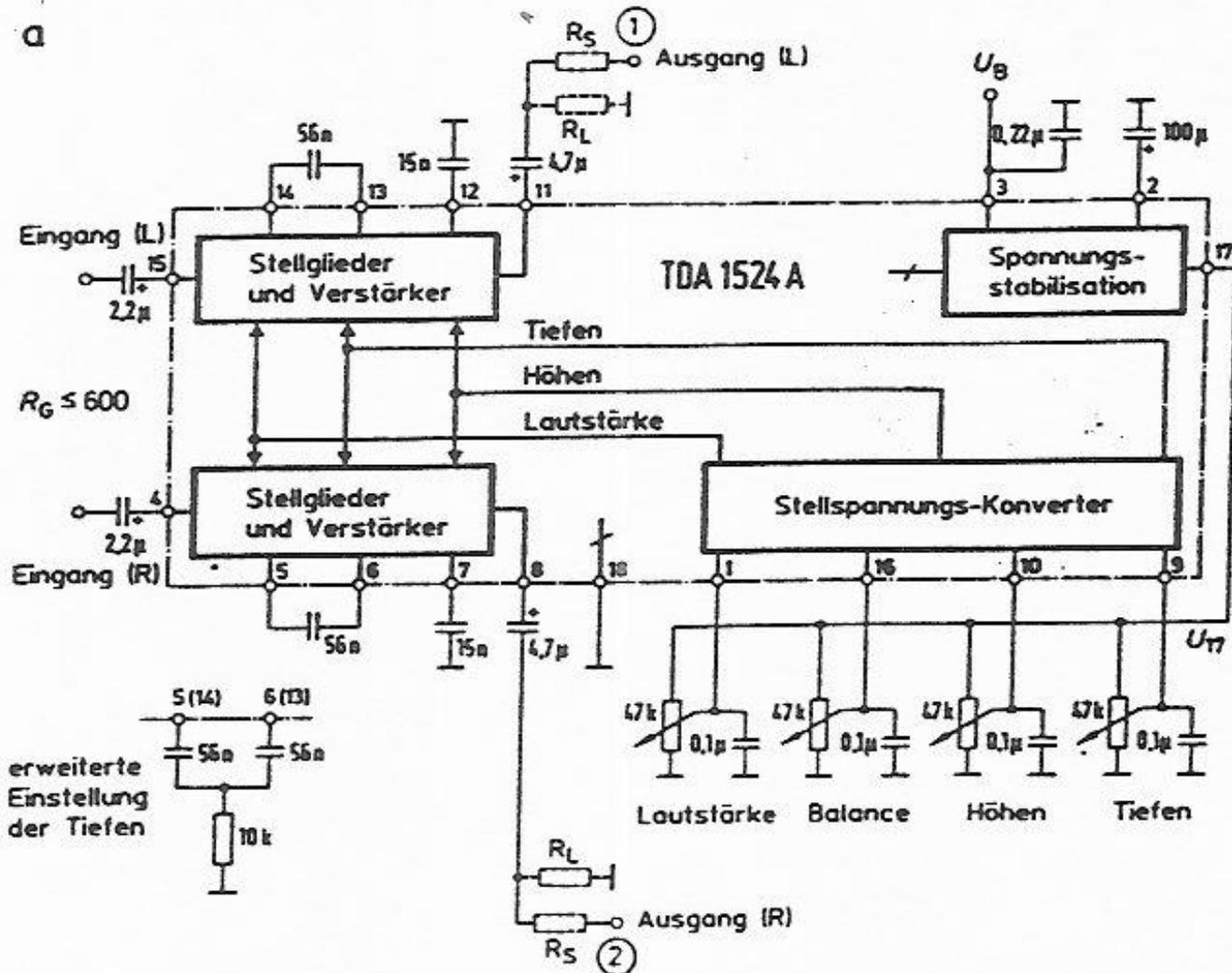


Bild 1.42 Schaltungsvorschlag für den Leistungsverstärker TDA 1516Q in Brückenschaltung.

In Bild 1.43 ist die Gehäuseform des TDA 1516Q dargestellt. Es handelt sich um ein montagegünstiges QUIL-13-Gehäuse mit flexiblen Beinchen.

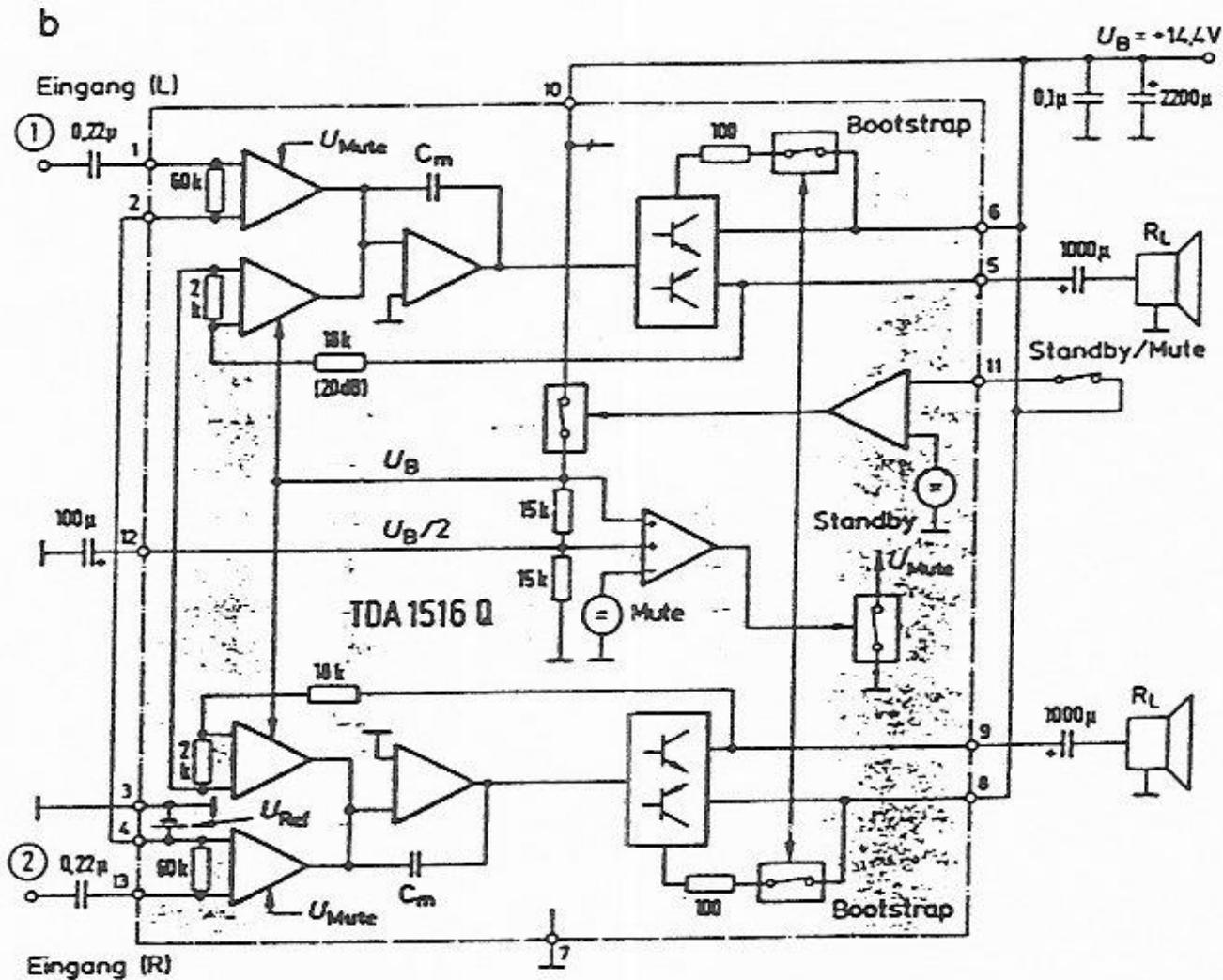
# Vorlesung - Analogelektronik

**Bild 1.44** Zusammenschaltung eines Vorverstärkers TDA 1524A (a) und eines Leistungsverstärkers TDA 1516Q (b) zu einem kompletten Stereo-Verstärker



# Vorlesung - Analogelektronik

**Bild 1.44** Zusammenschaltung eines Vorverstärkers TDA 1524A (a) und eines Leistungsverstärkers TDA 1516Q (b) zu einem kompletten Stereo-Verstärker



## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.2. Lineare Schaltungen mit Unipolartransistoren**

##### **2.3.2.1. Lineare Ersatzschaltbilder von Unipolartransistoren**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.2. Lineare Schaltungen mit Unipolartransistoren**

##### **2.3.2.2. Entwurf von Verstärkerschaltungen mit Unipolartransistoren**

###### **2.3.2.2.a) mit SFET ( JFET )**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.2. Lineare Schaltungen mit Unipolartransistoren**

##### **2.3.2.2. Entwurf von Verstärkerschaltungen mit Unipolartransistoren**

##### **2.3.2.2.b) mit MOSFET**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.3. Lineare Schaltungen mit Transistoren**

#### **2.3.2. Lineare Schaltungen mit Unipolartransistoren**

#### **2.3.2.3. Entwurf von Stromquellen mit SFET ( JFET )**

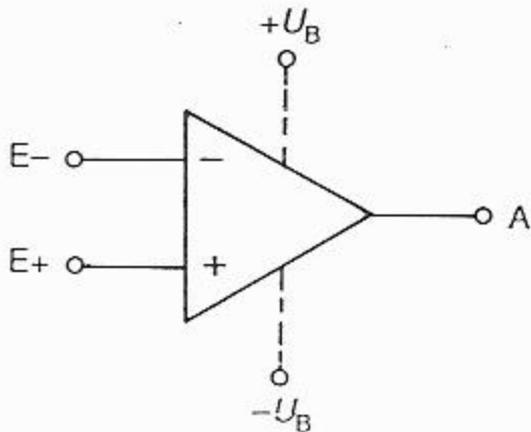
# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

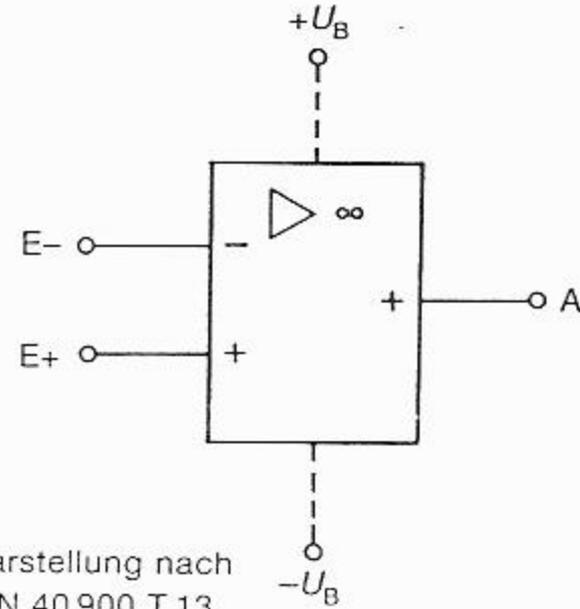
### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.1. Einführung / Übersicht**

# Vorlesung - Analogelektronik



a) übliche Darstellung  
(ähnlich DIN 40 900 T 10)



b) Darstellung nach  
DIN 40 900 T 13

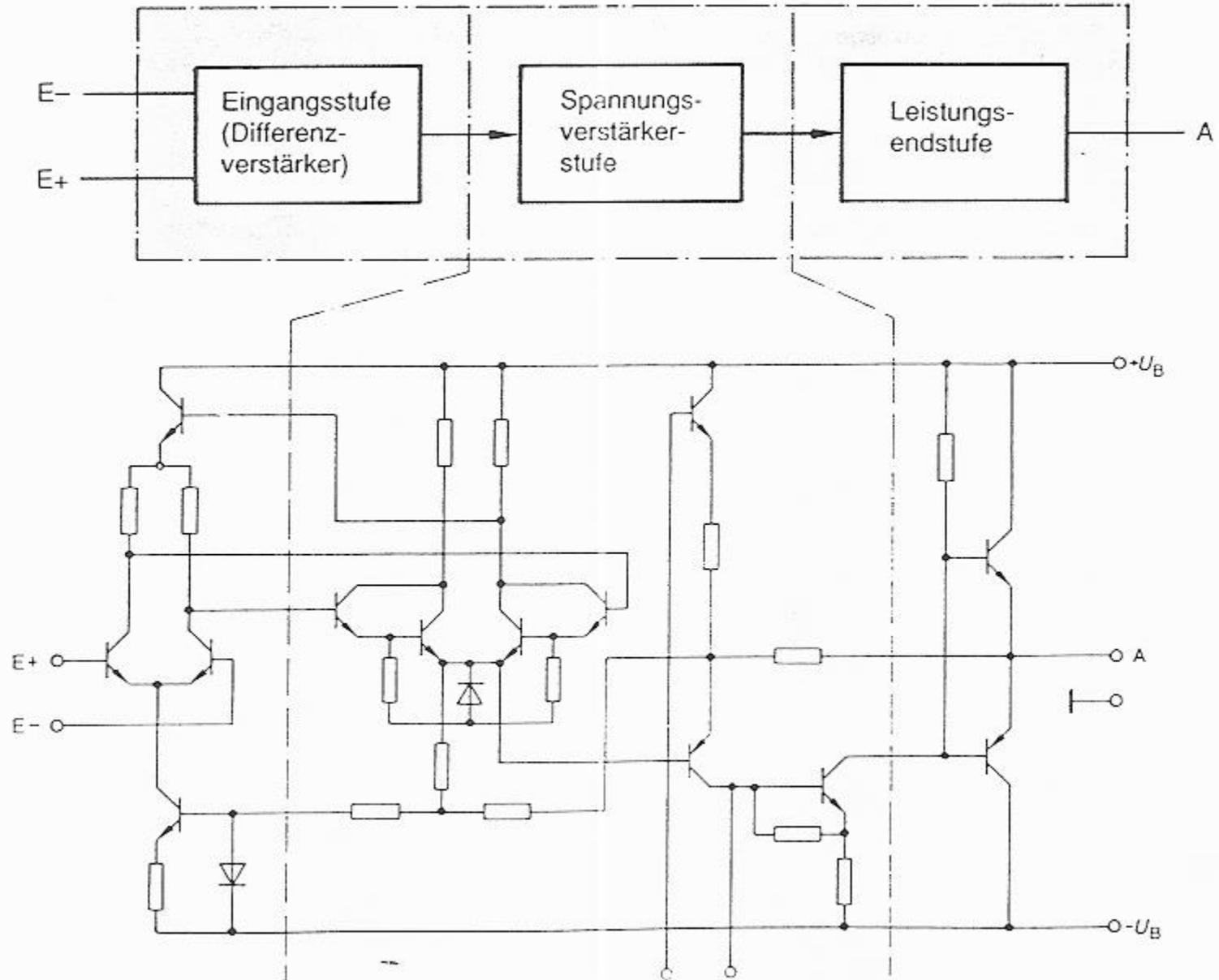
**Bild 4.1** Schaltzeichen eines OPs

## Vorlesung - Analogelektronik

Charakteristische Eigenschaft	Idealer OP	Realer OP
Leerlaufverstärkung $V_o = \frac{U_A}{U_D}$	$V_o = \infty$	$V_o = 20 \cdot 10^3 \dots 100 \cdot 10^3$
Eingangswiderstand $r_e = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_E}$	$r_e = \infty \Omega$	$r_e = 10^5 \Omega \dots 10^{15} \Omega$
Ausgangswiderstand $r_a = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$	$r_a = 0 \Omega$	$r_a = 30 \Omega \dots 1 \text{ k}\Omega$
Temperatureinfluß $\Delta U = f(\vartheta)$	Nicht vorhanden	Im Bereich von -50 °C ... +75 °C vernachlässigbar gering
Übertragungsbandbreite	$B = \infty \text{ Hz}$	Von $V$ abhängig, $10^4 \dots 10^7 \text{ Hz}$
Aussteuerbereich $U_A = f(U_E)$	$-\infty \text{ V} \dots +\infty \text{ V}$	$-U_B \dots +U_B$

**Bild 4.2** Charakteristische Eigenschaften von idealen und realen Operationsverstärkern

# Vorlesung - Analogelektronik



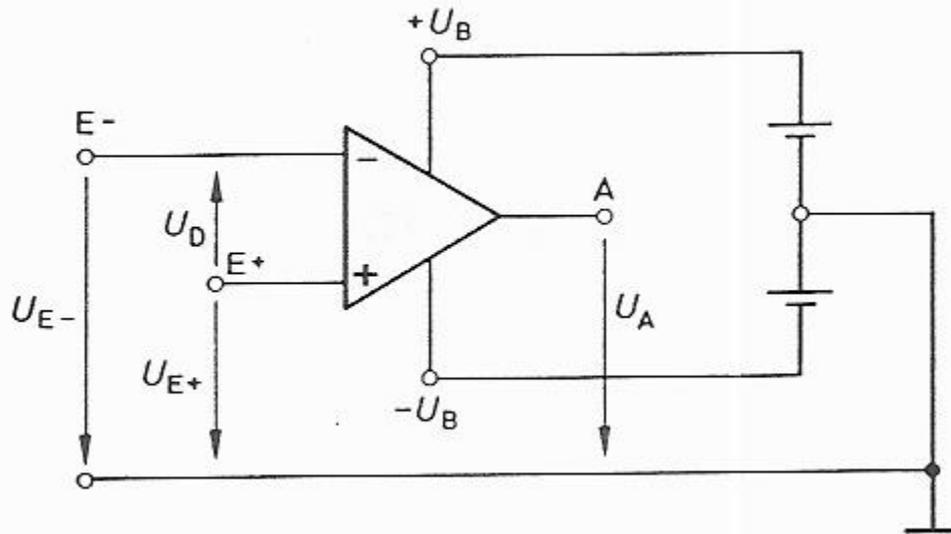
**Bild 4.3** Aufbau eines OPs

## **2. Analoge Schaltungen**

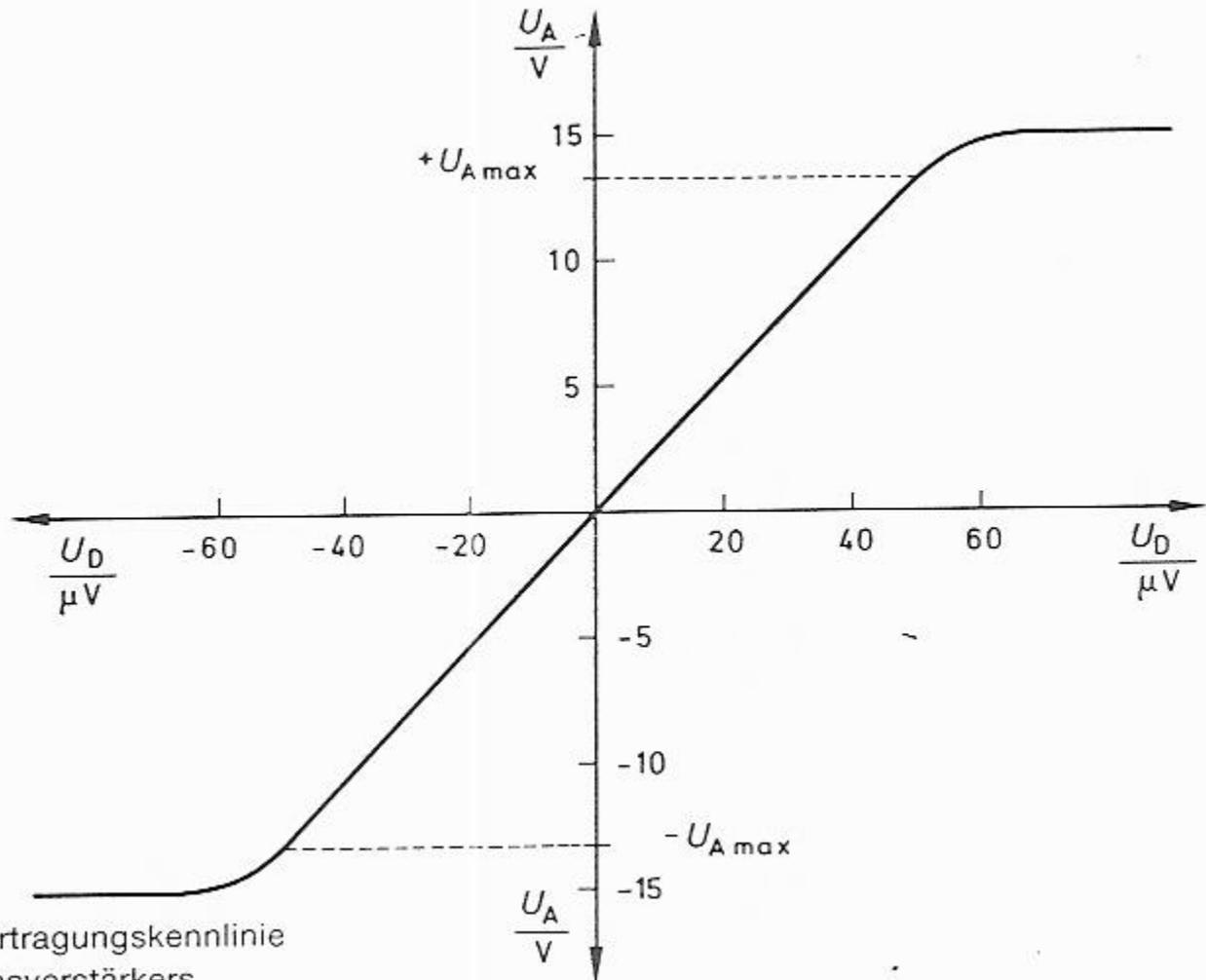
### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.2. Funktion und Kennwerte**

# Vorlesung - Analogelektronik



**Bild 4.9** Spannungen beim Operationsverstärker



**Bild 4.10** Übertragungskennlinie eines Operationsverstärkers

## Vorlesung - Analogelektronik

Bezeichnung	Symbol	Bipolare Eingänge			J-FET-Eingänge	
		TBA 221 - 741	TAA 521 - 709	TAA 761	LF 355	LF 357
<b>Grenzwerte</b>						
Betriebsspannung	$U_{B \max}$	$\pm 18 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$
Diff.-Eing.-Spg.	$U_{D \max}$	$\pm 30 \text{ V}$	$\pm 5 \text{ V}$	$\pm 18 \text{ V}$	$\pm 30 \text{ V}$	$\pm 30 \text{ V}$
Kurzschlußdauer	$t_z$	$\infty \text{ s}$	5 s	o. K.*	$\infty \text{ s}$	$\infty \text{ s}$
Sperrschichttemp.	$\vartheta_{J \max}$	150 °C	150 °C	150 °C	100 °C	100 °C
Wärmewiderstand (Kunststoff-Geh.)						
System-Umgebung	$R_{\text{thSu}}$	120 K/W	120 K/W	120 K/W	175 K/W	175 K/W
System Gehäuse	$R_{\text{thSG}}$	80 K/W	80 K/W	80 K/W	-	-
<b>Kenndaten</b>						
$U_B = \pm 15 \text{ V}$						
$\vartheta_U = 25 \text{ °C}$						
Leerlaufverst.	$V_o$	100 dB (100.000)	93 dB	85 dB	80 dB	80 dB
Offsetspg.	$U_o$	$\pm 6 \text{ mV}$	$\pm 2 \text{ mV}$	$\pm 6 \text{ mV}$	$\pm 3 \text{ mV}$	$\pm 3 \text{ mV}$
Gleichtaktunterdrückung	$G$	90 dB	90 dB	79 dB	100 dB	100 dB
Eingangswiderstand	$r_e$	2 M $\Omega$	250 k $\Omega$	200 k $\Omega$	10 <sup>12</sup> $\Omega$	10 <sup>12</sup> $\Omega$
Eingangsruhestrom	$I_E$	80 nA	300 nA	500 nA	30 pA	30 pA
Ausgangswiderstand	$r_a$	75 $\Omega$	150 $\Omega$	o. K.*	50 $\Omega$	-
Ausgangsstrom (max)	$I_A$	20 mA	10 mA	70 mA	25 mA	-
Grenzfrequenz (3 dB)	$f_g$	5 Hz	abhängig von Fre- quenzkom- pensation	10 Hz	25 Hz	-
Transitfrequenz	$f_T$	500 kHz	5 MHz	200 kHz	2,5 MHz	25 MHz
Ausgangssteuerbarkeit	$U_{A \max}$	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 13 \text{ V}$
Gleichtakt-Aussteuerbarkeit	$U_{Gl \max}$	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 10 \text{ V}$	$\pm 9 \text{ V}$	+ 15 V - 12 V	-

Die Daten sind Mittelwerte der Angaben verschiedener Hersteller. \* = offener Kollektor

**Bild 4.7** Grenzwerte und Kenndaten von vier verschiedenen OP-Typen

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.3. Grundsaltungen**

##### **2.4.3.1. Invertierender Verstärker**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.3. Grundsaltungen**

##### **2.4.3.2. Nichtinvertierender Verstärker**

# Vorlesung - Analogelektronik

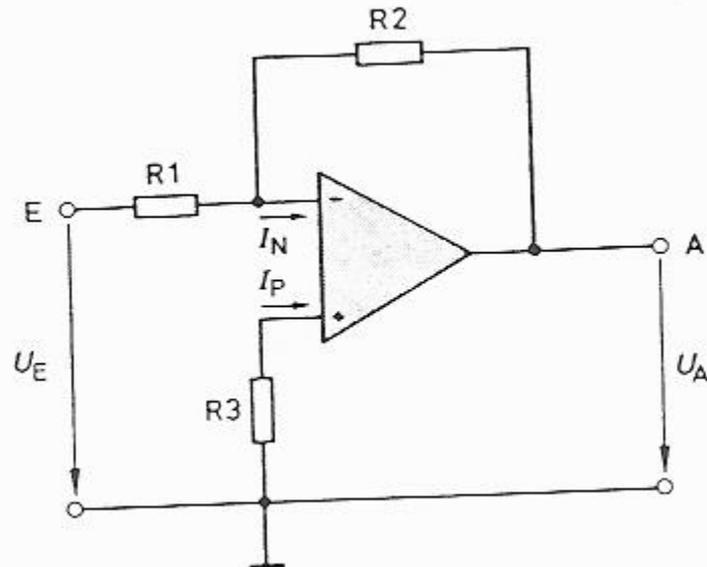
## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

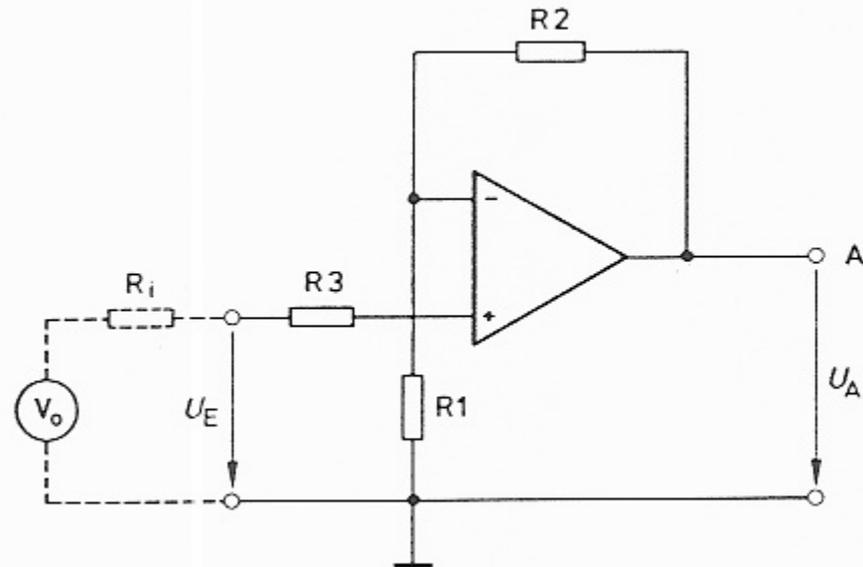
#### **2.4.4. Kompensation von Störgrößen**

##### **2.4.4.1. Eingangsruheströme**

**Bild 4.20** Kompensation der Eingangsruhestrome des OPs bei einem invertierenden Verstärker



**Bild 4.21** Kompensation der Eingangsruheströme bei einem nichtinvertierenden Operationsverstärker



## **2. Analoge Schaltungen**

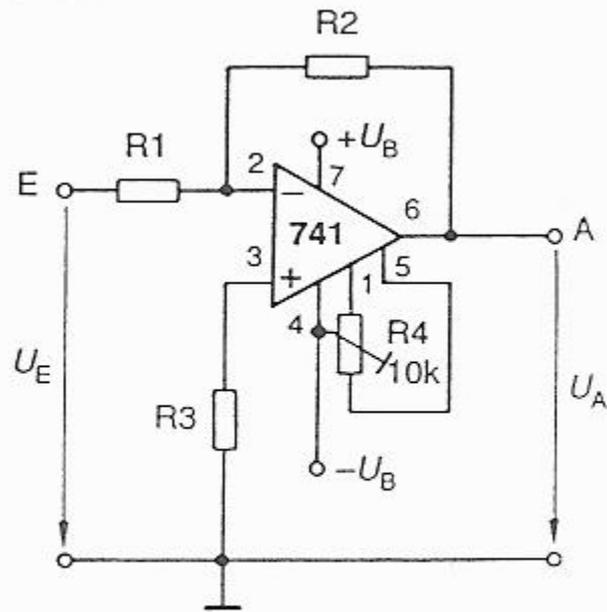
### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.4. Kompensation von Störgrößen**

##### **2.4.4.2. Offsetspannungen**

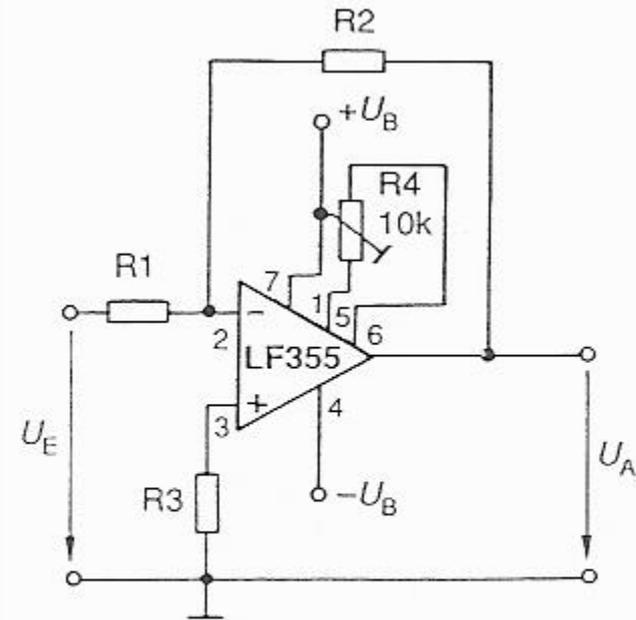
# Vorlesung - Analogelektronik

www.vde.com



a) OP mit bipolaren Eingängen

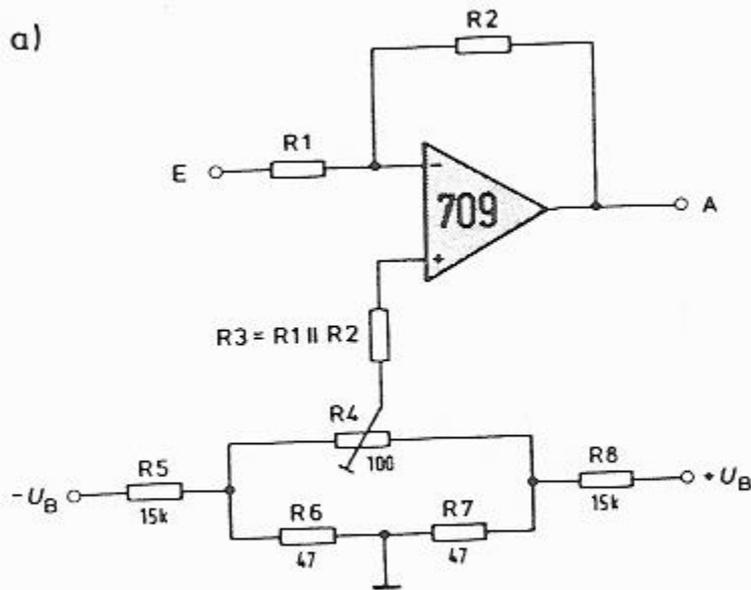
**Bild 4.23** OP mit interner Offset-Kompensation



b) OP mit FET-Eingängen

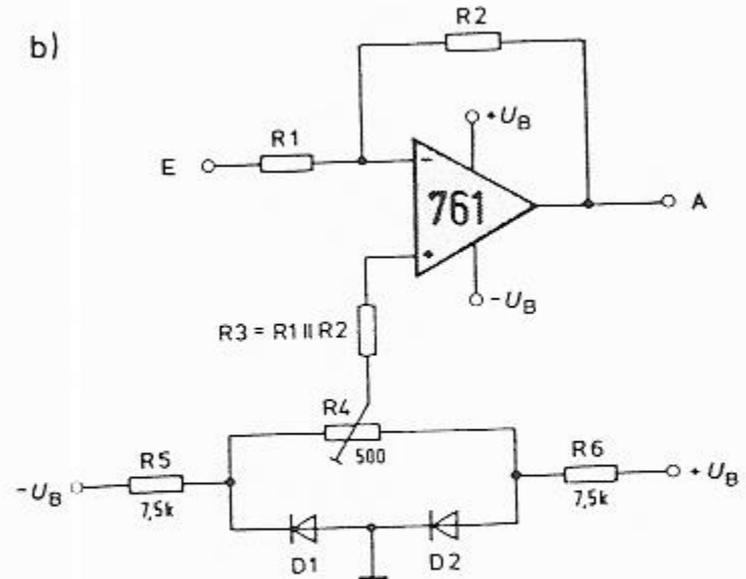
# Vorlesung - Analogelektronik

a)



**Bild 4.22 a** Offset-Kompensation beim Operationsverstärker-Typ 709

b)



**Bild 4.22 b** Offset-Kompensation beim Operationsverstärker-Typ 761

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.4. Kompensation von Störgrößen**

##### **2.4.4.3. Frequenzgang**

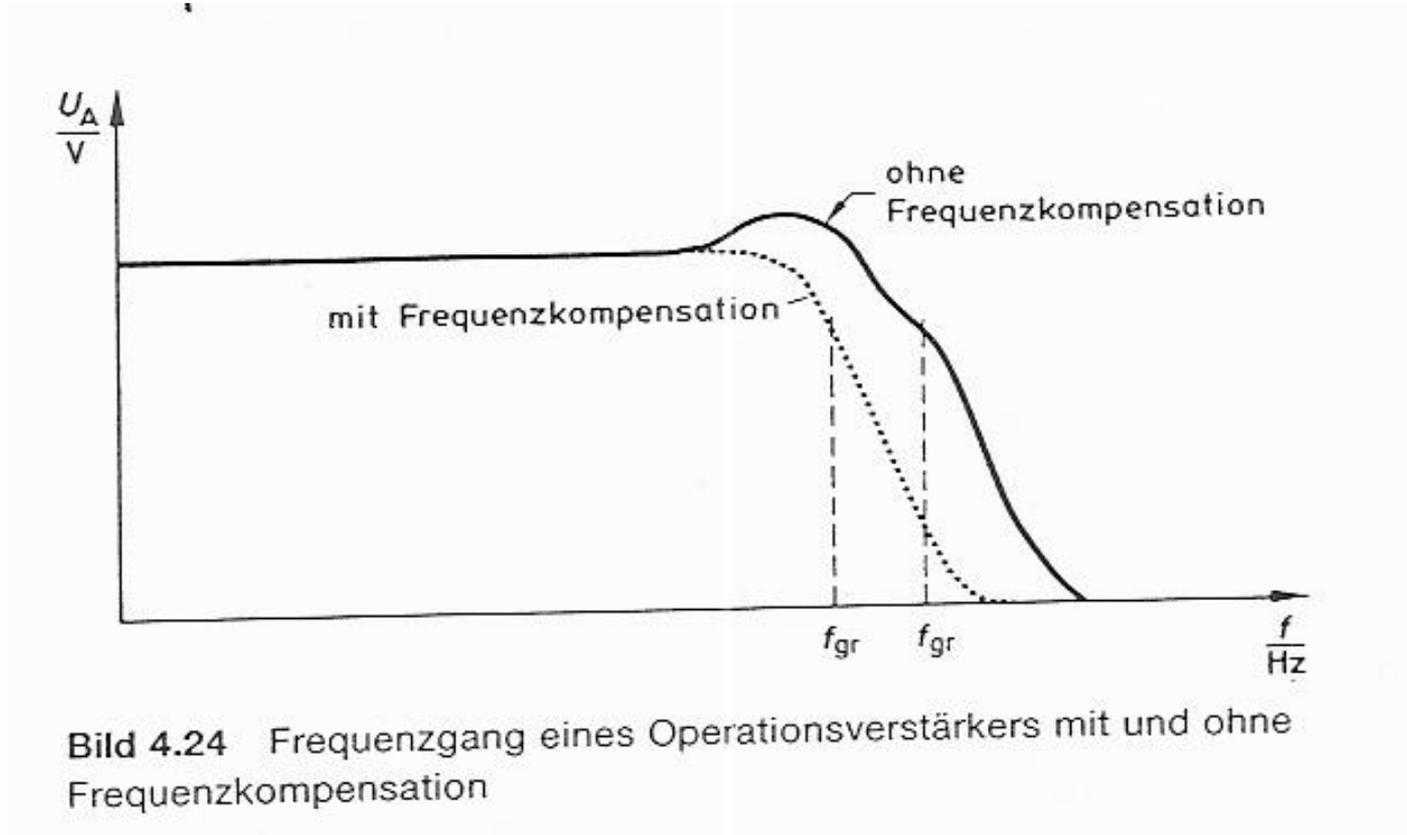
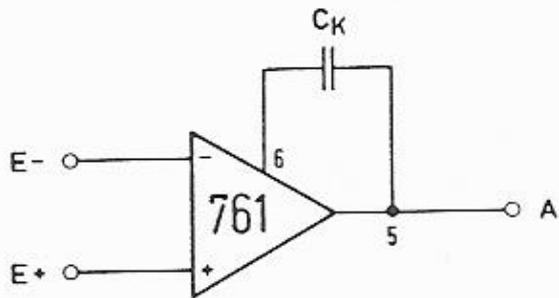
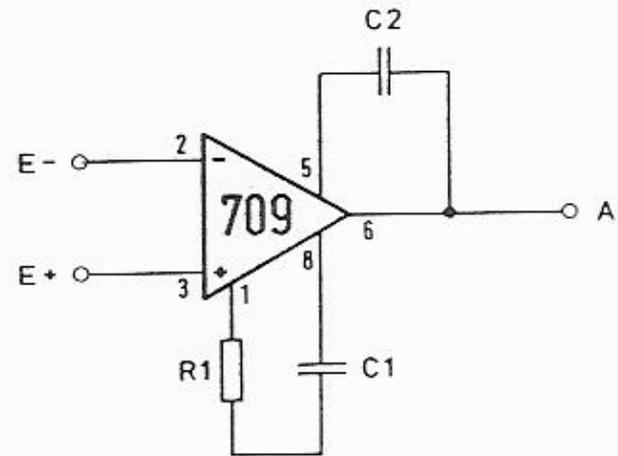


Bild 4.24 Frequenzgang eines Operationsverstärkers mit und ohne Frequenzkompensation

# Vorlesung - Analogelektronik



**Bild 4.25 a** Frequenzkompensation beim Operationsverstärker-Typ 761



**Bild 4.25 b** Frequenzkompensation beim Operationsverstärker-Typ 709

Verstärkers ab. Die Hersteller geben für unterschiedliche Verstärkungsfaktoren Richtwerte an (**Bild 4.26**).

Verstärkung $V$	$R_1/\Omega$	$C_1/\text{pF}$	$C_2/\text{pF}$
1000	0	10	3
100	1,5 k	100	3
10	1,5 k	500	20
1	1,5 k	5000	200

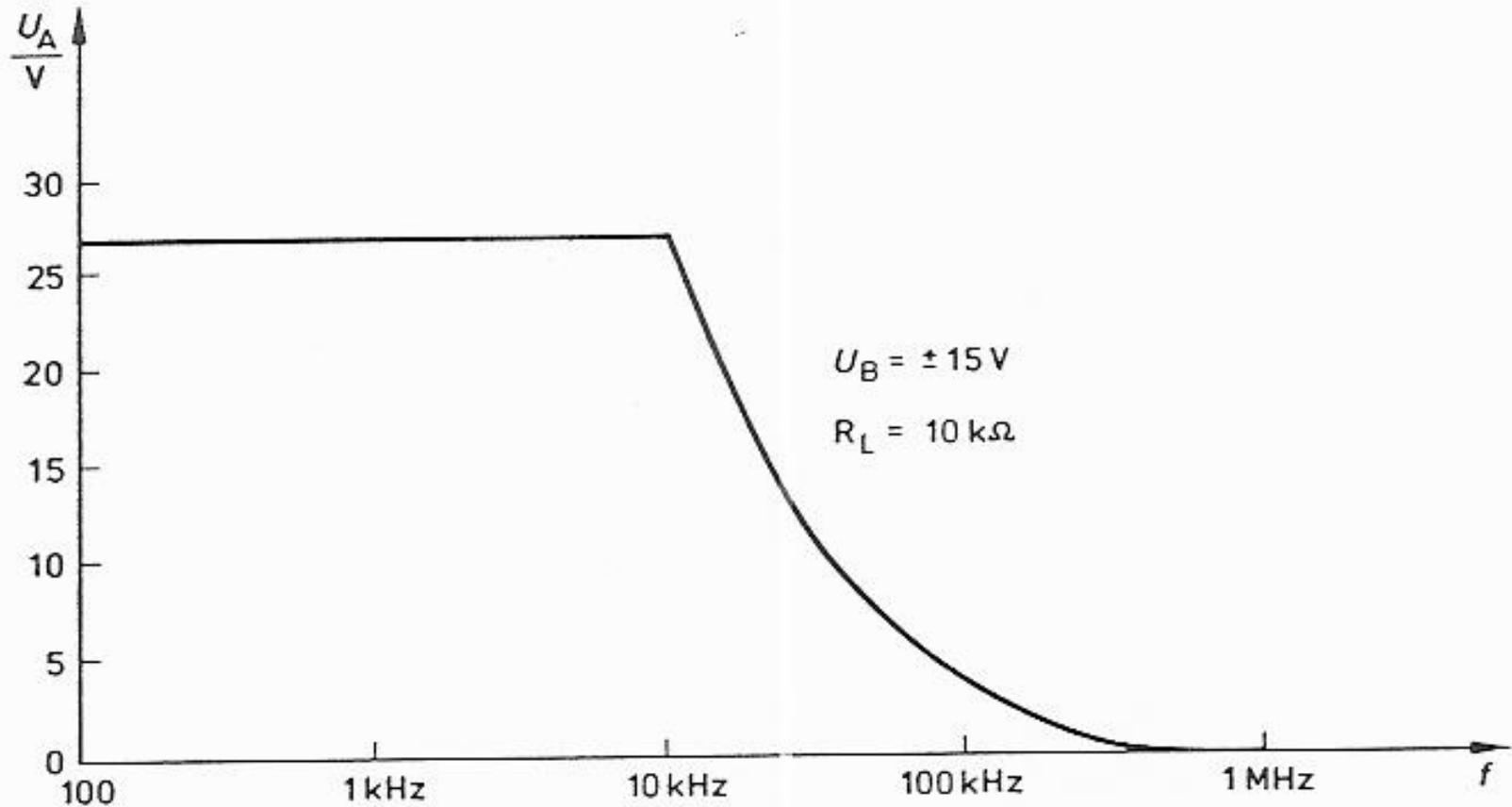
**Bild 4.26** Richtwerte für die Frequenzgangkorrektur beim OP 709

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.4. Kompensation von Störgrößen**

##### **2.4.4.4. Slew Rate**



**Bild 4.27** Amplitude von  $U_A$  in Abhängigkeit von der Frequenz beim Operationsverstärker-Typ 741

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.5. Rechenschaltungen**

##### **2.4.5.1. Addierer**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.5. Rechenschaltungen**

##### **2.4.5.2. Subtrahierer (Differenz-/Brückenverstärker)**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.5. Rechenschaltungen**

##### **2.4.5.3. Integrierer**

# Vorlesung - Analogelektronik

## **2. Analoge Schaltungen**

### **2.4. Operationsverstärker**

#### **2.4.5. Rechenschaltungen**

##### **2.4.5.4. Differenzierer**

# Vorlesung - Analogelektronik