

Anwendung des Operationsverstärkers

Lars Paasche
15.09.02

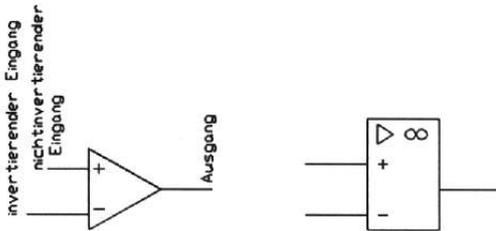
Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	1
<i>Das Schaltzeichen</i>	3
<i>Vergleich zwischen idealen OPV mit realen OPV</i>	3
<i>Das Bauelement</i>	4
Der Bezeichnungsschlüssel	4
Der Code bekannter Hersteller	4
Temperaturbereiche	4
Gehäuseformen	5
Einige Operationsverstärker mit ihrer Anschlussbelegung und Gehäuse	5
Beispiel zur Positionierung auf einer Leiterplatte bei sehr hochohmigen Eingängen	6
<i>Was bedeutet was im Datenblatt?</i>	6
Tabellarischer Überblick der wichtigsten Kenngrößen	6
Diagramme und ihre Bedeutung am Beispiel des OPV $\mu A741$	7
<i>Der Aussteuerbereich</i>	11
Der normale OPV	11
Der Single Supply OPV	11
Der Rail to Rail OPV	11
<i>Grundsaltungen</i>	12
Der invertierende Verstärker	12
Der nichtinvertierende Verstärker	12
Der Impedanzwandler	13
Die Additionsschaltung	13
Der Differenzverstärker	13
Die Konstantstromquelle	14
Der Komparator ohne Hysterese	14
Der Komparator mit Hysterese	15
Der Integrierer	15
Der Differenzierer	16
<i>Ersatzschaltbilder</i>	16
Der Operationsverstärker mit seinem Ersatzschaltbild	16
<i>Die Kompensation vom OPV</i>	16
Ruhestromkompensation	16
Offsetkompensation	16

<i>Typen von OPV's</i>	17
Verschiedene Arten von Operationsverstärkern	17
<i>Welchen OPV nehme ich jetzt?</i>	17
Standard Typen	17
Typen mit großem Eingangsstrom	17
Typen mit großer Ausgangsspannung	18
Typen mit großer Bandbreite	18
Single Supply Typen	18
Präzisionstypen	19
Rauscharme Typen	19
<i>Zusammenfassung und weitere Schaltungen mit Operationsverstärkern</i>	20
Grundsaltungen	20
Filter	21
<i>Literaturverzeichnis</i>	22

Anwendung des Operationsverstärkers

Das Schaltzeichen



altes und neues Schaltzeichen

Bedeutung der einzelnen Zeichen

- + nichtinvertierender Eingang
- invertierende Eingang
- ∞ unendlich
- ▷ Verstärker

Vergleich zwischen idealen OPV mit realen OPV

Parameter	idealer OPV	realer OPV
Eingangswiderstand	unendlich	100 kΩ ... 2 MΩ bipolarer OP bis 2 GΩ bei FET Eingang
Eingangsstrom	Null	≤ 1 μA beim bipolaren OPV ≤ 1 nA beim FET-OPV
Ausgangswiderstand	Null	bei dem meisten Typen 10 ... 100 Ω
Offsetstrom	Null	Picoampere bis 100 Nanoampere
Spannungsverstärkung	vu unendlich	90 bis 120 dB
Frequenzbandbreite	unendlich	bis 100 MHz bei Sondertypen noch höher
Offsetspannung	Null	0,1 ... 5 mV
Slewrates V _{ss}	unendlich	bis 80; typisch 1 V/μs
Ausgangsstrom	unendlich	bis 25 mA, es gibt auch Typen bis 100 mA
Temperaturdrift	Null	bei Präzisionstypen : ≤ 1 μV / °C bei Standardtypen : ≤ 3 μV / °C
Gleichtaktunterdrückung	unendlich	80 – 120 dB

Das Bauelement

Der Bezeichnungsschlüssel

μ A	741	C
Hersteller	Typ	besondere Eigenschaften

Der Code bekannter Hersteller

μ A	:	Fairchild
TL	:	Texas Instrument
MC	:	Motorola
LH, LM, LF	:	National Semiconductor
CA	:	RCA
SE, NE	:	Signetic / Valvo
TBC, TBB, TCA, TAA	:	Siemens
RC, RM	:	Raytheon
AD	:	Analog Devices
OPA	:	Burr-Brown
ICL	:	Intersil

Die Datenblätter der einzelnen Hersteller findet man am besten auf der jeweiligen Homepage des Hersteller. Eine gute Internetseite zum Auffinden dieser ist z.B. www.aufzu.de.

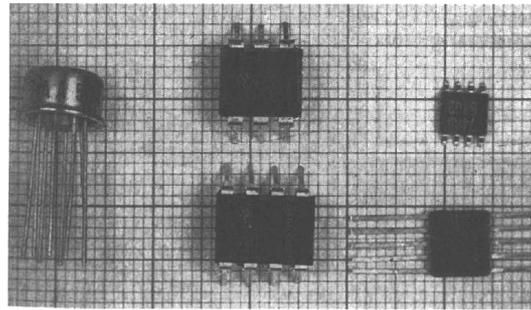
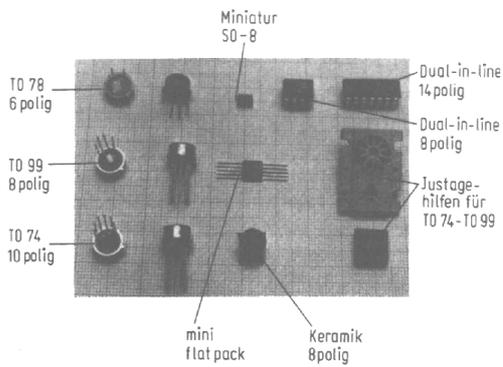
Temperaturbereiche

Die Temperaturbereiche von Bauelementen werden meist wie folgt gegliedert:

allgemeine Anwendung :	0°C ... +70°C
industrielle Anwendung:	-40°C ... + 85°C
militärische Anwendung:	-55°C ... + 125°C

Leider gibt es keine Einheitlichkeit bei der Kennzeichnung. Z.B. kann der Temperaturbereich im Zahlencode enthalten sein oder bei der Kennzeichnung der besonderen Eigenschaften.

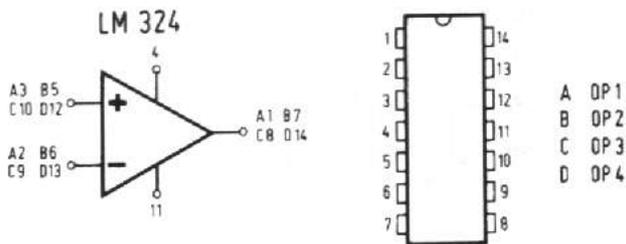
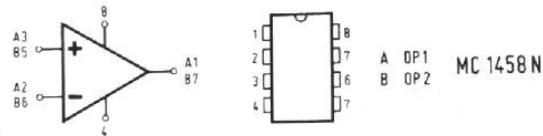
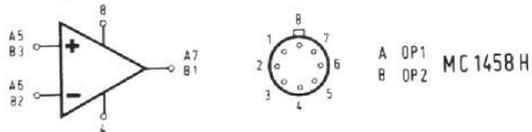
Gehäuseformen



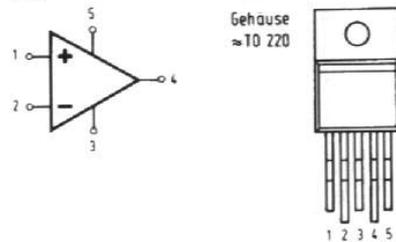
Typische OP-Gehäuseformen
 5 G 8 = TO 99
 6 pol. In line
 8 pol. In line
 SMD-Technik = SO-8
 Flat-Package

Einige Operationsverstärker mit ihrer Anschlussbelegung und Gehäuse

MC 1458

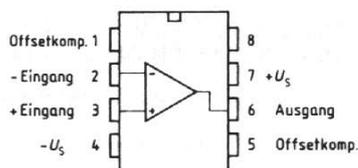


TCA 365

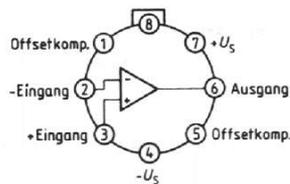


Anschlußanordnungen

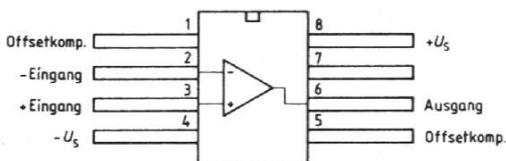
TBA 221 B



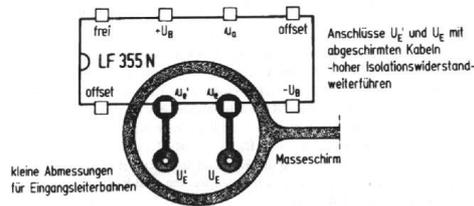
TBA 221, TBA 222, TBA 222 S1



TBA 221 W; G



Beispiel zur Positionierung auf einer Leiterplatte bei sehr hochohmigen Eingängen



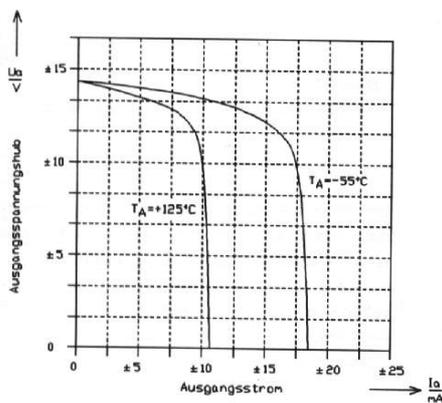
Was bedeutet was im Datenblatt?

Tabellarischer Überblick der wichtigsten Kenngrößen

Bezeichnung in deutsch	Bezeichnung in englisch	Formelzeichen	Beschreibung
Leerlaufverstärkung Gleichspannungsverstärkung	open loop voltage gain	V_{u0} V_{ud0}	Sie ist das Verhältnis von Ausgangsspannung zu Eingangsdifferenzspannung des nicht gegengekoppelten Verstärkers bei unbelastetem Ausgang Die Werte liegen zwischen $10^3 - 10^7$. (60 dB – 140 dB)
Durchtrittsfrequenz Transitfrequenz	unity gain frequency	f_T	Die Frequenz, bei der die Verstärkung 1 (0 dB) beträgt beim nicht gegengekoppelten unbelasteten OPV.
Grenzfrequenz	full power frequency	f_G	Die Frequenz, bei der die Verstärkung 3 dB kleiner ist als die Gleichspannungsleerlaufverstärkung (70,7%).
Anstiegsgeschwindigkeit Anstiegsflanke, Pulsanstieg Durchsteuerzeit	slewrate	$\Delta U_{ass}/\Delta t$ dU_a/dt	Wenn dieser Wert überschritten wird, dann kommt es zu Amplitudenreduzierung und zu einer Kurvenformverzerrung. Die maximale unverzerrte Ausgangsspannung errechnet sich: $U_{ass} = \text{Slewrate} / 4 * \pi * f_0$
Differenzeingangs- Widerstand	input resistance	R_E	Widerstand am Eingang des OPV's.
Eingangsspannungen	input voltage	U_{I1} U_{I2}	Spannungswerte am invertierenden bzw. nichtinvertierenden Eingang.
Eingangsoffsetspannung	input offset voltage	U_{EOS} U_{IO}	Ist der Wert, der als Hilfsspannung am Eingang benötigt wird, um am Ausgang des OP die Spannung Null zu erreichen bei einer symmetrischen Betriebsspannung.
Eingangsdriftspannung	input offset voltage drift	ΔU_{EOS} TK_{UIO}	Die Änderung der Eingangsoffsetspannung in Abhängigkeit der Temperatur. In den Datenangaben des Herstellers wird die Änderung meist bei 1K Temperaturänderung angeben.
Eingangsoffsetstrom Eingangsnullstrom	input offset current	I_{EOS} I_{IOS}	Ergibt sich aus der Differenz der beiden Eingangsströme, die den Eingangsruhestrom bilden zur Einstellung der Ausgangsspannung 0V.
Eingangsoffsetstromdrift	input offset current drift	dI_{EOS} TK_{IOS}	Diese ergibt sich analog zur Offsetspannungsdrift aus der Eingangsoffsetstromänderung.

Bezeichnung in deutsch	Bezeichnung in englisch	Formelzeichen	Beschreibung
Eingangsspannungsbereich Differenzeingangsspannung	differential input voltage	U_{Ediff} U_{EGI} U_{ID}	Dieser Wert gibt die maximale Differenzspannung zwischen den Eingängen an. Ein Gleichtaktsignal gegen Masse darf diesen Wert nicht überschreiten.
Gleichtakteingangsspannung	common mode voltage	U_{IC}	Der arithmetischer Mittelwert der Eingangsspannungen, wenn die Ausgangsspannung Null ist.
Gleichtaktaussteuerbereich Gleichtaktspannungsbereich	common mode voltage range	ΔU_{GL}	Bereich der Gleichtaktspannung an den Eingängen des OPV's, ohne das eine Übersteuerung des Eingangs eintritt.
Gleichtaktverstärkung Gleichtaktleerlaufspannungsverstärkung	common mode voltage gain	V_{UCM} V_{UCO}	Werden die beiden Eingänge des OPV's parallel geschaltet, sollte die Ausgangsspannung bei einer symmetrischen Betriebsspannung den Wert Null annehmen. Das ist leider beim realen OPV nicht der Fall. Dieser Wert gibt das Verhältnis der Ausgangs- zur Eingangsspannung an.
Differenzleerlaufspannungsverstärkung	open loop voltage gain	V_{UDO}	Bei der Differenzverstärkung werden die beiden Eingänge zur Ausgangsspannung betrachtet.
Gleichtaktunterdrückung	common mode rejection ratio	G CMRR CMR	Stellt das Verhältnis zwischen Differenzspannungsverstärkung und Gleichtaktspannungsverstärkung da.
Betriebsspannungsunterdrückung	supply voltage rejection ratio	k_{SVR} SVR	Durch Änderung der Betriebsspannung kommt zur Änderung der Offsetspannung. Angabe ist in dB oder $\mu V/V$.
Ausgangsimpedanz	open loop output impedance	Z_A	Ausgangsimpedanz des unbeschalteten OPV's
Ausgangsstrom	output current	I_{Amax}	Der maximale Ausgangsstrom des OPV's.
Ausgangsspannungshub	output voltage	ΔU_a	Der maximale Ausgangsspannungshub für den linearen Arbeitsbereich des OPV's.
Versorgungsspannung	supply voltage	U_B	Versorgungsspannung des OPV's
Gesamtverlustleistung	internal power dissipation	P_{tot}	Die maximale Verlustleistung des OPV's.
Arbeitstemperatur		T_A	Minimale und Maximale Arbeitstemperatur.
Lagertemperatur		T_L	Minimale und Maximale Temperatur der Lagerung.
Anschlussdrahttemperatur		$T_{Löt}$	Maximale Drahttemperatur beim Löten.

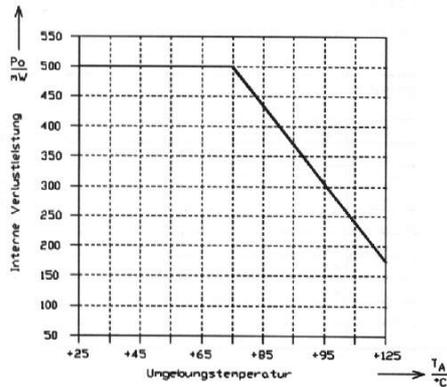
Diagramme und ihre Bedeutung am Beispiel des OPV $\mu A741$



Ausgangsspannungshub als Funktion des Ausgangsstromes mit Temperatur als Parameterangabe

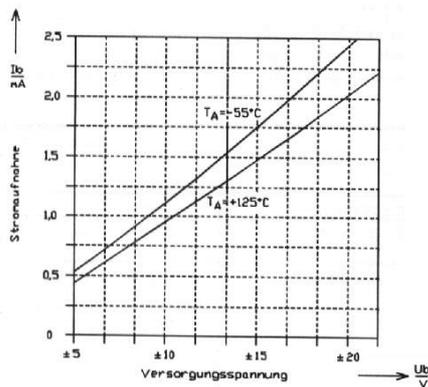
Der zu entnehmende Strom ist sehr stark von der Temperatur abhängig. Im Diagramm erkennt man das eine Laststrom Entnahme von bis zu 6 mA das Problem umgehen kann. Wichtig ist noch zu wissen ob der Ausgang kurzschlussfest ist z.B. kann man mit dem $\mu A741$ eine Last direkte ohne Vorwiderstand betreiben. Man muss natürlich dabei auch die maximale Verlustleistung beachten.

Verlustleistung als Funktion der Umgebungstemperatur



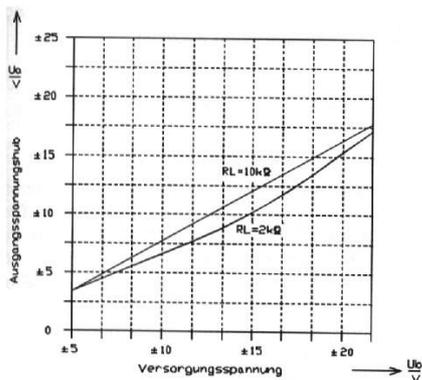
Hier ist zu erkennen, dass die maximale Verlustleistung ab 75°C sinkt, man muss sie also reduzieren, wenn man in diesen Bereich kommt. Dies ist möglich z.B. durch eine kleinere Versorgungsspannung oder kleinere Ausgangströme.

Stromaufnahme in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung und der Temperatur



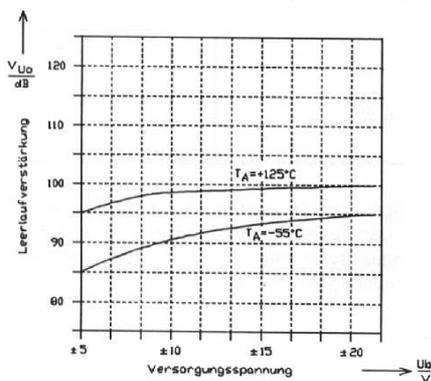
Die Stromaufnahme erhöht sich natürlich bei einer höheren Versorgungsspannung. Die Stromaufnahme ist auch von der Temperatur abhängig, ist aber meist sehr gering und nicht von großen Stellenwert.

Ausgangsspannungshub als Funktion der Versorgungsspannung und des Lastwiderstandes



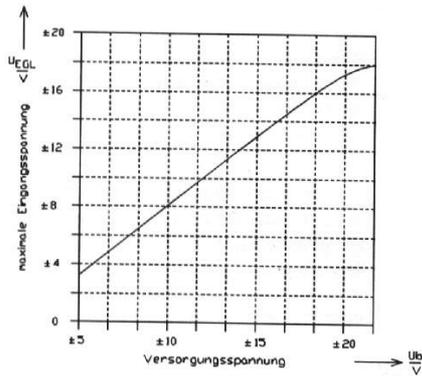
Der Ausgangsspannungshub liegt etwas niedriger als die Versorgungsspannung. Für normale OPV's setzt man ca. 1 V – 2 V niedriger als die Versorgungsspannung an. Für große Lasten ist der Ausgangsspannungshub noch etwas niedriger.

Leerlaufverstärkung in Anhängigkeit von der Versorgungsspannung und der Arbeitstemperatur



Die Leerlaufverstärkung ist sehr stark temperaturabhängig. Für einen gegengekoppelten OPV mit niedriger Verstärkung gegenüber der Leerlaufverstärkung, ist der Verstärkungsgrad alleine über das Gegenkoppelungsnetzwerk bestimmt.

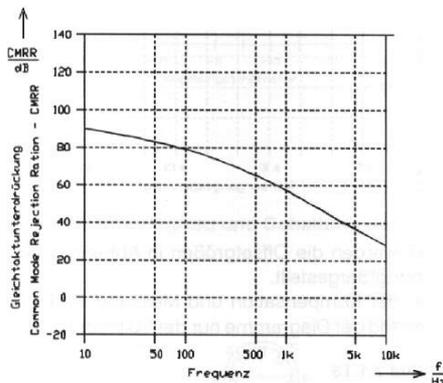
Maximale Eingangsspannung als Funktion der Versorgungsspannung



Normale OPV's sind, wenn sie kurzschlussfest sind, sehr unempfindliche Bauelemente. Durch zwei Sachen können sie jedoch schnell zerstört werden: durch Verpolung der Versorgungsspannung und durch eine Eingangsspannung, die im Potential höher liegt als die Versorgungsspannung. Bei diesem OPV darf bei einer Versorgungsspannung von ± 10 V die Eingangsspannung ± 8 V nicht überschreiten.

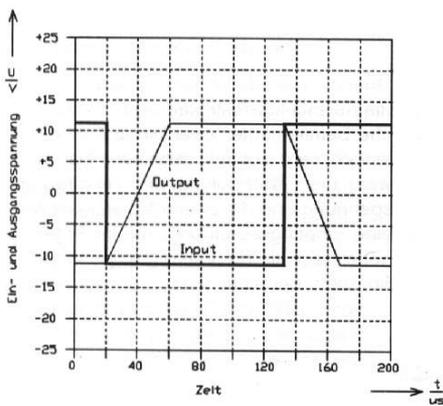
Erfahrungsgemäß werden die OPV's aber erst zerstört, wenn die Eingangsspannung 1 V höher ist als die Versorgungsspannung. Dies soll aber nicht eine Anleitung zum Überschreiten von Grenzwerten sein. Nur innerhalb der Grenzwerte ist gewährleistet, dass der OPV nicht zerstört wird.

Gleichtaktunterdrückung in Abhängigkeit von der Frequenz



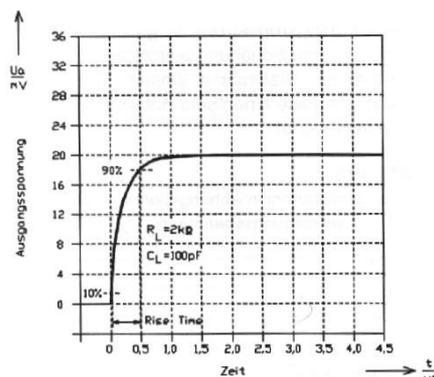
Bei einem idealen OPV würden gleiche Signale an den Eingängen nicht zu Änderungen am Ausgang führen. Da der Differenzeingangsverstärker aber nicht genau symmetrisch aufgebaut ist, kommt es dann doch zu einer Änderung der Ausgangsspannung. Die Gleichtaktunterdrückung nimmt zu hohen Frequenzen noch ab (durch parasitäre Kapazitäten).

Ausgangsspannungsverlauf als Funktion der Zeit



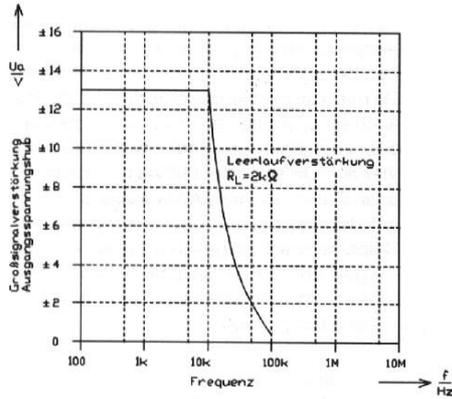
Das Diagramm zeigt die Slewrate oder Anstiegsflanke des OPV's. Sie beträgt hier ca. $0,5$ V/ μ s.

Ausgangsspannungssprung in Abhängigkeit von der Zeit



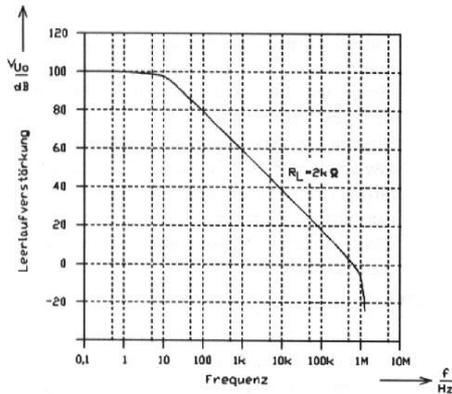
Dieses Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf des Ausgangsspannungssprung von 0 auf 20 V. Die Zeit wird dabei zwischen 10% bis 90% der Ausgangsspannung definiert.

Ausgangsspannungshub als Funktion der Frequenz



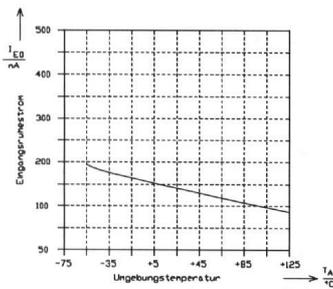
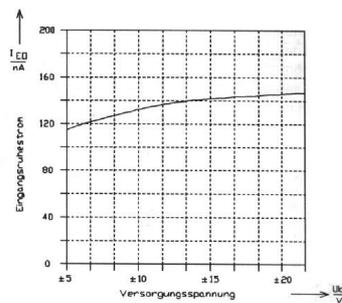
Zu erkennen ist hier, dass bis 10 kHz der maximale Ausgangsspannungshub genutzt werden kann. Bei höheren Frequenzen reicht die Anstiegsgeschwindigkeit des OPV's nicht mehr aus, um in die Aussteuerergrenze zu gelangen.

Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

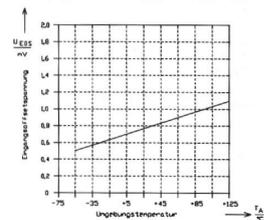
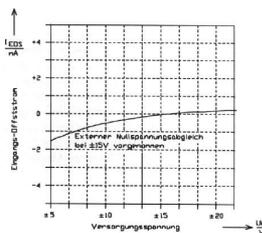
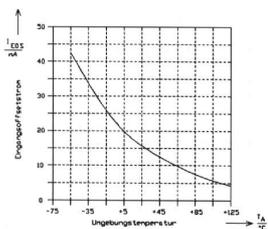
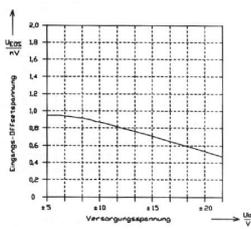


Die Verstärkung eines „offen“ betriebenen OPV's ist sehr stark von der Frequenz abhängig. Zu sehen ist bei diesem Beispiel, dass die hohe Verstärkung von 100 dB bis maximal 10 Hz zur Verfügung steht. Bei Frequenzen von 1 MHz ist das Verstärkungsmaß schon bei 0 dB.

In den folgenden Diagrammen ist der Eingangsruhestrom in Abhängigkeit zur Temperatur und zur Versorgungsspannung zu erkennen. Sie sind aber meist nicht so entscheidend. Für hochohmigen Einsatz sollte man dann lieber auf FET-OPV's zurückgreifen.



In den jetzt noch folgenden Diagrammen werden die Offsetgrößen in Abhängigkeit von der Temperatur und der Versorgungsspannung dargestellt.

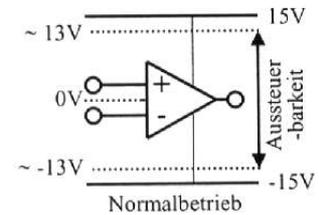


Der Aussteuerbereich

Der normale OPV

Beim normalen OPV ist der Aussteuerbereich nicht gleich der Betriebsspannung, sondern durch die Innenschaltung etwas kleiner, meist 1 V – 2 V. Dadurch verliert man natürlich eine sehr wichtige Eigenschaft, die bei manchen Einsätzen sehr wichtig ist und zwar, dass das Ausgangspotential gleich dem Eingangspotential ist. Dieses Problem ist auch bei niedrigen Betriebsspannungen sehr ungünstig z.B. bei einer Betriebsspannung von ± 5 V hätte man nur noch einen Aussteuerbereich von ± 3 V.

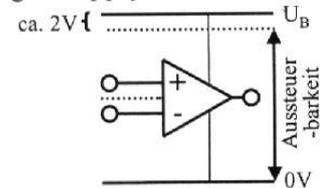
normaler Operationsverstärker:



Der Single Supply OPV

Um diese Probleme zu beheben gibt es z.B. den Single Supply OPV, der extra für den Einsatz mit nur einer Betriebsspannung gebaut wurde. Hier ist der Aussteuerbereich bis zur negativen Betriebsspannung (bzw. Nullpotential). Aber auch hier gibt es Probleme! Sollte z.B. bei einem nichtinvertierenden Verstärker die Eingangsspannung unter die negative Betriebsspannung sinken bleibt die Ausgangsspannung nicht wie man vermutet bei 0V sondern steigt auf die positive Aussteuergrenze. Dieser Vorgang wird Phasen Reversal genannt. Es gibt natürlich auch hier Typen, die diese Eigenschaft nicht haben z.B. alle CMOS Operationsverstärker.

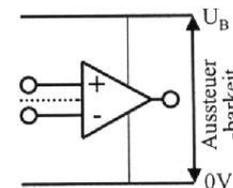
Single-Supply OPV:



Der Rail to Rail OPV

Rail to Rail OPV's sind OPV's, bei denen der Aussteuerbereich nicht nur bis zur negativen Betriebsspannung möglich ist, sondern auch bis zur positiven Betriebsspannung.

Rail-to-Rail OPV:



Grundsaltungen

Der invertierende Verstärker

Zur Vereinfachung werden hier die Operationsverstärker immer als ideal angenommen und man geht von einer symmetrischen Betriebsspannung aus, die man nicht extra mit an den OPV zeichnet. Operationsverstärker werden nur sehr selten ohne zusätzliche Beschaltung verwendet. Den Operationsverstärkern werden durch verschiedene Rückkopplungsschaltungen bestimmte Eigenschaften verliehen. Wird dabei die Ausgangsspannung so auf den Eingang zurückgeführt, dass sie sich addieren spricht man von Mitkopplung, wird sie subtrahiert von Gegenkopplung. Die Mitkopplung erhöht dabei die Instabilität des Systems im Gegensatz zur Gegenkopplung. Das klassische Beispiel zur Gegenkopplung ist der invertierende Verstärker.

Ist die Ausgangsspannung U_a nicht in der Aussteuergrenze des OPV's, so kann man die Spannung zwischen den Eingängen als 0 V annehmen ($U_{\text{diff}} = 0\text{ V}$). Da die OPV Eingangsströme null sind, muss $I_1 = I_2$ sein und da $U_{\text{diff}} = 0\text{ V}$ ist, ist also $U_{R1} = U_e$ und $U_{R2} = -U_a$.

Weiterhin folgt:

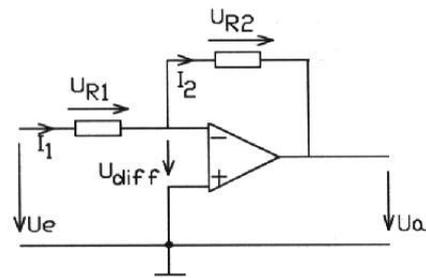
$$I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_e}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{-U_a}{R_2}$$

$$\text{da } I_1 = I_2$$

$$\frac{U_e}{R_1} = \frac{-U_a}{R_2}$$

$$v_u = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$



$$v_u = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

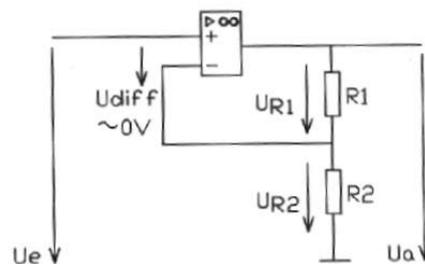
Der nichtinvertierende Verstärker

In dieser Schaltung ist auch wieder die Spannungsdifferenz zwischen den Eingängen 0 V und damit ist U_e gleich U_{R2} .

$$\frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U_e}{R_2} = \frac{U_a}{R_1 + R_2}$$

$$v = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

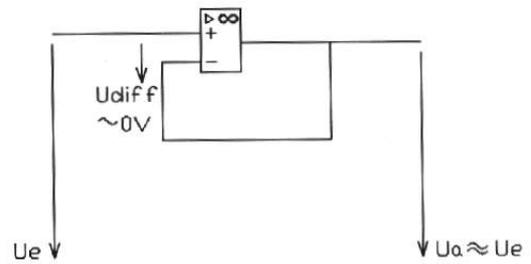
Zu erkennen ist, dass bei dieser Schaltung die Verstärkung nicht kleiner als 1 werden kann.



$$v = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Der Impedanzwandler

Schaut man sich die Schaltung des nichtinvertierenden Verstärkers und die zugehörige Formel für die Verstärkung an, erkennt man, dass, wenn man R_1 gegen 0Ω und R_2 gegen unendlich wählt, die Verstärkung $v = 1$ wird und damit die Eingangsspannung gleich der Ausgangsspannung ist. Der Vorteil bei dieser Schaltung ist, dass sie einen sehr hochohmigen Eingang und einen niederohmigen Ausgang hat. Impedanzwandler sind sehr vorteilhaft an Stellen wo eine hochohmige Signalquelle nicht belastet werden sollen.



$$U_a = U_e$$

Die Additionsschaltung

Auch bei dieser Schaltung gilt wieder, dass die Spannung zwischen den Eingängen $U_{diff} = 0 \text{ V}$ beträgt. Daraus kann man wieder folgendes ableiten:

$$U_{e1} = U_{R1}$$

$$U_{e2} = U_{R2}$$

$$U_{RG} = -U_a$$

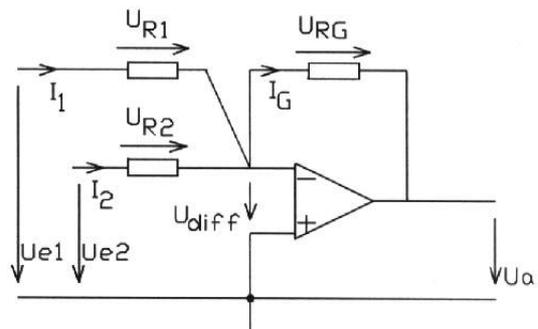
$$I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_{e1}}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U_{e2}}{R_2}$$

$$I_G = I_1 + I_2$$

$$I_G = \frac{U_{e1}}{R_1} + \frac{U_{e2}}{R_2} = \frac{U_{RG}}{R_G} = -\frac{U_a}{R_G}$$

$$U_a = -\left(\frac{U_{e1}}{R_1} + \frac{U_{e2}}{R_2}\right) \cdot R_G$$



allgemein gilt:

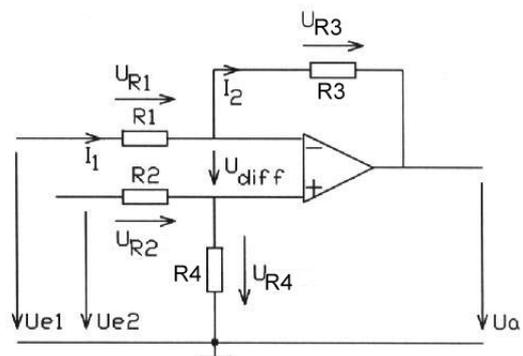
$$U_a = -\left(\frac{U_{e1}}{R_1} + \frac{U_{e2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{en}}{R_n}\right) \cdot R_G$$

Der Differenzverstärker

Im Normalfall wählt man beim Differenzverstärker die Widerstände so, dass sie wie hier immer paarweise auftreten z.B. hier $R_4=R_3$ und $R_1=R_2$. Dies ist natürlich nicht zwingend notwendig und auch hier gilt wieder dass $U_{diff} = 0 \text{ V}$ ist.

Als erstes kann man die Spannung am positiven Eingang berechnen. Da kein Strom in den OPV fließt, ist das sehr einfach:

$$U_{R4} = U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2}$$



Da wir jetzt wissen, welche Spannung am Eingang des OPV's vorliegt, können wir weiter folgen:

$$U_{R1} = U_{e1} - U_{R4} = U_{e1} - U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2}$$

$$I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_{e1} - U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2}}{R_1}$$

Weiterhin wissen wir ja, dass $I_1 = I_2$ und $U_{R3} = I_2 \cdot R_3 = I_1 \cdot R_3$ ist. Wir können schlussfolgern, dass $U_a = U_{R4} - U_{R3}$ ist.

$$U_{R3} = \frac{U_{e1} \cdot R_3}{R_1} - U_{e2} \cdot \frac{R_4 \cdot R_3}{(R_4 + R_2) \cdot R_1}$$

$$U_a = U_{e2} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_2} + U_{e2} \cdot \frac{R_4 \cdot R_3}{(R_4 + R_2) \cdot R_1} - \frac{U_{e1} \cdot R_3}{R_1}$$

$$U_a = U_{e2} \cdot \frac{R_4 \cdot (R_1 + R_3)}{R_1 \cdot (R_2 + R_4)} - U_{e1} \cdot \frac{R_3}{R_1}$$

Vereinfacht man die Schaltung wie oben mit paarweise gleichen Widerständen, vereinfacht sich natürlich auch die Formel:

$$U_a = (U_{e2} - U_{e1}) \cdot \frac{R_3}{R_1}$$

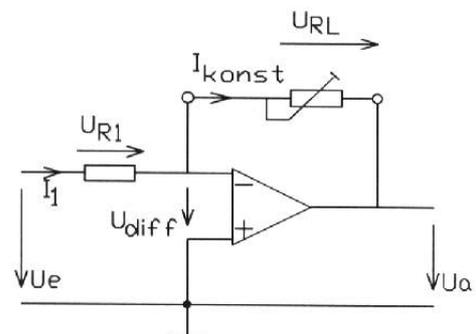
Die Konstantstromquelle

Die Konstantstromquelle ist wie der invertierende Verstärker aufgebaut, aber hier befindet sich im Gegenkopplungszweig der Lastwiderstand. Solange der Operationsverstärker nicht im Aussteuerbereich ist, ist die Differenzspannung zwischen den Eingängen des OPV's 0 V. Der Strom durch den Widerstand R_1 ist $U_{R1}/R_1 = U_e/R_1$.

I_{R1} ist gleich dem I_{const} . Man kann also den konstanten Strom über U_e oder R_1 einstellen.

Den größt möglichen Widerstand kann man errechnen mit der maximalen Spannung am Ausgang des OPV's:

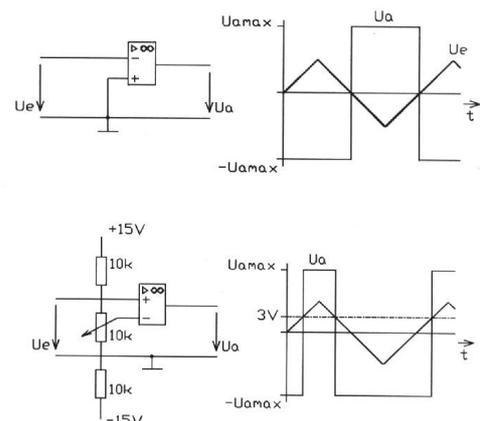
$$R_{L \max} = \frac{U_{aOPV \max}}{I_{const}}$$



$$I_{const} = \frac{U_e}{R_1}$$

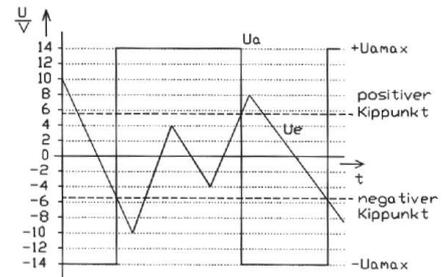
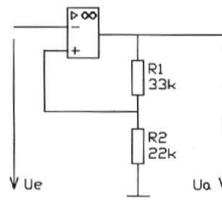
Der Komparator ohne Hysterese

Der Komparator hat keinen Rückkopplungszweig. Er vergleicht eine Eingangsspannung mit einer Referenzspannung und kippt je nach Beschaltung in die positive oder negative Aussteuergrenze. Im ersten Bild ist die Referenzspannung die Bezugsmasse und es handelt sich um einen invertierenden Komparator. Im Bild darunter ist eine Schaltung mit einstellbarem Kippunkt und einem nichtinvertierenden Komparator. Komparatorschaltungen sind sehr vielseitig einsetzbar z.B. als Alarmauslöser oder Messwertvergleicher.



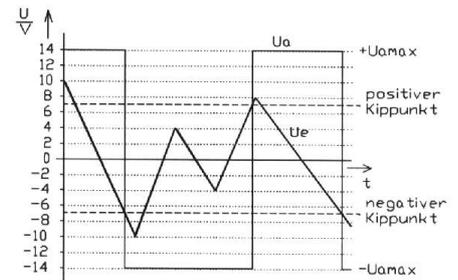
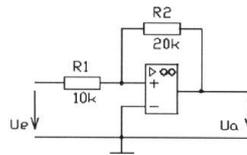
Der Komparator mit Hysterese

Der hier dargestellte invertierende Komparator mit Hysterese erinnert in seiner Grundschaltung an den nichtinvertierenden Verstärker. Nur sind hier die beiden Eingänge mit einander vertauscht, so dass hier eine Mitkopplung erreicht wird. Ein positives Eingangssignal steuert den OPV negativ aus. Der Trick bei dieser Schaltung ist, dass der OPV durch die Mitkopplung in den Aussteuer Grenzen gefahren wird und dadurch eine Differenzspannung zwischen den Eingängen entsteht, die erst überwunden werden muss, um den OPV in die andere Aussteuergrenze zu bringen. Die Spannung, bei welcher der OPV kippt, ist erreicht, wenn die Differenzspannung zwischen den Eingängen 0 V beträgt. Es gibt natürlich zwei Schaltschwellen. In der folgenden Formel muss für $U_{aOPV\max/\min}$ einmal die positive und einmal die negative Aussteuergrenze eingesetzt werden.



$$U_{ekipp} = \frac{U_{aOPV\max/\min}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

Auch diese Schaltung kann man als nichtinvertierende Komparator mit Hysterese aufbauen, wie man im nebenstehenden Bild sehen kann. Auch hier wird die Hysterese durch eine Mitkopplung erreicht, die den OPV in den Aussteuerbereich bringt und für eine Differenzspannung zwischen den Eingängen sorgt. Bei dieser Schaltung ist die Schaltschwelle erreicht, wenn die Differenzspannung zwischen den Eingängen null geworden ist. Dies geschieht, wenn über R_2 U_a abfällt und über R_1 U_e .



$$\frac{U_{aOPV\max/\min}}{R_2} = \frac{U_e}{R_1}$$

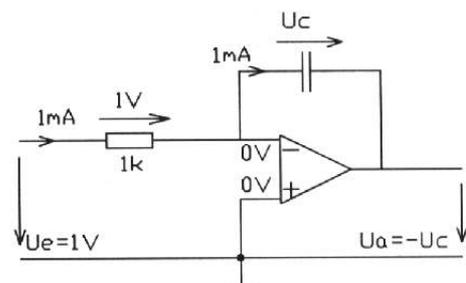
Es gibt natürlich zwei Schaltschwellen. In der folgenden Formel muss für $U_{aOPV\max/\min}$ einmal die positive und einmal die negative Aussteuergrenze eingesetzt werden.

$$U_{ekipp} = U_{aOPV\max/\min} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Der Integrierer

Der Integrierer stellt eine analoge Rechenschaltung zum Integrieren dar. Die Eingangsspannung U_e wird im Bezug zur Zeit t integriert. Vorausgesetzt, dass $U_a = 0$ V zur Zeit $t = 0$ ist, gilt:

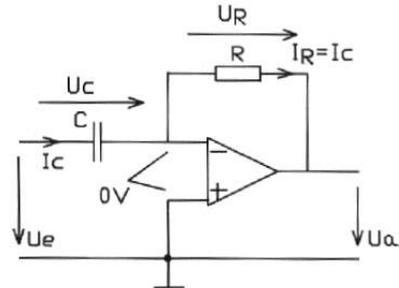
$$U_a = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int_0^t U_e dt$$



Der Differenzierer

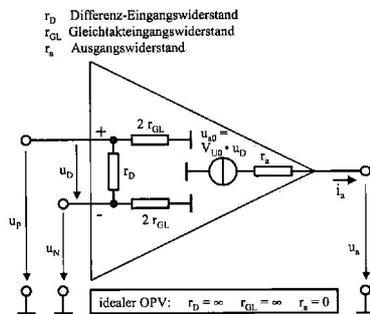
Mit dieser Schaltung kann man die Eingangsspannung U_e im Bezug auf die Zeit differenzieren. Vorausgesetzt, dass $U_a = 0$ V zum Zeitpunkt $t = 0$ ist, gilt:

$$U_a = R \cdot C \cdot \frac{dU_e}{dt}$$



Ersatzschaltbilder

Der Operationsverstärker mit seinem Ersatzschaltbild

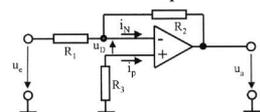


Die Kompensation vom OPV

Ruhestromkompensation

Meistens befinden sich in den Datenblättern der Hersteller Schaltungsbeispiele zur Kompensation von verschiedenen Störgrößen. Hier sind nur zwei Beispiele für typische Schaltungen angeben. Dieses Beispiel sorgt dafür, dass keine zusätzliche Differenzspannung entsteht.

Ruhestromkompensation

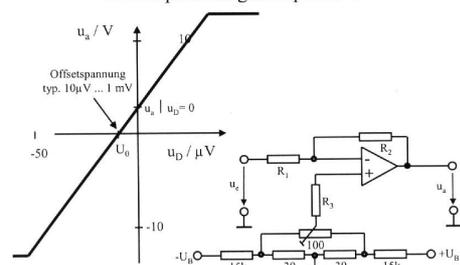


Eingangswiderstand ist endlich
 \Rightarrow Eingangsströme i_p in E+ und i_n in E-
 Annahme: Eingangswiderstände beider Eingänge sind gleich
 $\Rightarrow i_p = i_n$
 Eingangsströme dürfen keine zusätzliche Differenzspannung u_D verursachen
 \Rightarrow Potential an beiden Eingängen muß gleich sein
 $\Rightarrow i_p \cdot R_3 = i_n \cdot (R_1 \parallel R_2)$
 Kompensationsbedingung: $R_3 = R_1 \parallel R_2$

Offsetkompensation

Der Vorteil dieser Schaltung ist, das man hier durch das Potentiometer eine Offsetkompensation in negativer als auch in positiver Richtung vollziehen kann. Dies kann z.B. wichtig werden, wenn der OPV durch einen anderen ersetzt werden muss.

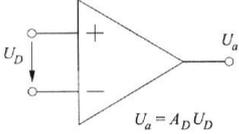
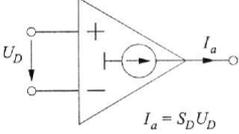
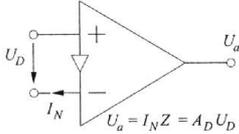
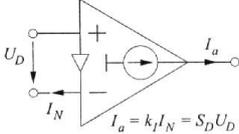
Offsetspannungskompensation



Typen von OPV's

Verschiedene Arten von Operationsverstärkern

Es gibt nicht nur Operationsverstärker, die mit Spannungsein- und Ausgang arbeiten, sondern auch noch andere Typen, die in dem unterem Bild zusammen gefasst sind. Diese haben natürliche alle ihre Vor- und Nachteile.

	Spannungs-Ausgang	Strom-Ausgang
Spannungs-Eingang	VV Normaler OPV  $U_a = A_D U_D$	VC Transkonduktanz-Verstärker  $I_a = S_D U_D$
Strom-Eingang	CV Transimpedanz-Verstärker  $U_a = I_N Z = A_D U_D$	CC Strom-Verstärker  $I_a = k_I I_N = S_D U_D$

Welchen OPV nehme ich jetzt?

Standard Typen

Die Listen, die hier zusehen sind stellen natürlich keine vollständige Listen mit allen OPV's da, die es gibt. Es handelt sich hier nur um Beispiele in der Praxis oft benutzter OPV's.

Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsrubestrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsgeschwindigkeit	Betriebsspannung min/max	Aufbau
VV-OPVs: Universaltypen							
...741	viele	1 mV	80 nA	1,5 MHz	0,6 V/μs	6/36 V	Bipolar
...324	viele	2 mV	45 nA	1 MHz	0,6 V/μs	6/32 V	Bipolar
AD8054	Analog D.	2 mV	2 μA	150 MHz	170 V/μs	3/12 V	Bipolar
OP467	Analog D.	0,2 mV	150 nA	28 MHz	300 V/μs	10/30 V	Bipolar
LT1356	Lin. Tech.	0,3 mV	80 nA	12 MHz	400 V/μs	8/32 V	Bipolar
MAX4044	Maxim	0,2 mV	2 nA	90 MHz	40 V/ms	2,4/5,5 V	Bipolar
MAX4329	Maxim	1 mV	50 nA	5 MHz	2 V/μs	2,4/6,5 V	Bipolar
LF356	National	1 mV	30 pA	4,5 MHz	12 V/μs	8/36 V	Bifet
LMV324	National	2 mV	11 nA	1 MHz	1 V/μs	2,7/5,5 V	Bipolar
TS274	SGS-Th.	5 mV	10 pA	3,5 MHz	5,5 V/μs	3/16 V	CMOS
OPA2244	Texas I.	1 mV	10 nA	0,3 MHz	0,1 V/μs	2,2/36 V	Bipolar
OPA4343	Texas I.	2 mV	0,2 pA	5,5 MHz	6 V/μs	2,5/5,5 V	CMOS
OPA4134	Texas I.	0,5 mV	5 pA	8 MHz	20 V/μs	5/36 V	Bifet
LTC2274	Texas I.	0,3 mV	1 pA	2 MHz	3,6 V/μs	3/16 V	CMOS
TL074	Texas I.	3 mV	65 pA	3 MHz	13 V/μs	8/36 V	Bifet
TLE2084	Texas I.	2 mV	20 pA	10 MHz	35 V/μs	5/38 V	Bifet

Typen mit großem Eingangsstrom

VV-OPVs: Hoher Ausgangsstrom

PA05*	Apex	5 mV	10 pA	3 MHz	100 V/μs	30/ 100 V
PA16*	Apex	1 mV	50 pA	4,5 MHz	20 V/μs	14/ 40 V
PA19*	Apex	0,5 mV	10 pA	100 MHz	900 V/μs	30/ 80 V
PA45	Apex	5 mV	20 pA	4,5 MHz	27 V/μs	30/ 150 V
PA93*	Apex	2 mV	200 pA	12 MHz	50 V/μs	80/ 400 V
LM12	National	2 mV	150 nA	700 kHz	9 V/μs	20/ 60 V
LM675	National	1 mV	200 nA	5,5 MHz	8 V/μs	16/ 60 V
OPA512	Texas I.	2 mV	12 nA	4 MHz	4 V/μs	20/ 100 V
OPA548	Texas I.	3 mV	500 nA	1 MHz	6 V/μs	8/ 60 V
OPA549	Texas I.			1 MHz	10 V/μs	8/ 60 V
OPA2544	Texas I.	1 mV	15 pA	1,4 MHz	8 V/μs	20/ 70 V

Typen mit großer Ausgangsspannung

Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsruehestrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsge- schwindigkeit	Betriebsspan- nung min/max
VV-OPVs: Hohe Ausgangsspannung						
PA42	Apex	35 mV	2,5 pA	1,6 MHz	40 V/ μ s	100/ 350 V
PA85*	Apex	0,5 mV	5 pA	100 MHz	1000 V/ μ s	30/ 450 V
PA89*	Apex	0,5 mV	5 pA	10 MHz	16 V/ μ s	150/1200 V
PA90*	Apex	0,5 mV	200 pA	100 MHz	300 V/ μ s	80/ 400 V
PA93*	Apex	2 mV	200 pA	12 MHz	50 V/ μ s	80/ 400 V
HA2645	Harris	2 mV	12 nA	4 MHz	2,5 V/ μ s	20/ 80 V
OPA445	Texas I.	0,5 mV	20 pA	2 MHz	10 V/ μ s	20/ 90 V

Typen mit großer Bandbreite

Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsruehestrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsge- schwindigkeit	Betriebsspan- nung min/max
VV-OPVs: Hohe Bandbreite						
AD829	Analog D.	0,2 mV	3 μ A	600 MHz	200 V/ μ s	8/30 V
AD8036	Analog D.	2 mV	4 μ A	240 MHz	1500 V/ μ s	6/12 V
AD8056	Analog D.	3 mV	0,4 μ A	300 MHz	1400 V/ μ s	8/12 V
AD9631	Analog D.	3 mV	2 μ A	320 MHz	1300 V/ μ s	6/11 V
EL2073	Elantec	0,2 mV	2 μ A	300 MHz	250 V/ μ s	6/12 V
EL2444	Elantec	0,5 mV	3 μ A	120 MHz	320 V/ μ s	4/36 V
HA2840	Harris	0,6 mV	5 μ A	600 MHz	600 V/ μ s	7/32 V
HFA1405	Harris	2 mV	6 μ A	400 MHz	1700 V/ μ s	9/11 V
LT1365	Lin. Tech.	1,5 mV	2 μ A	70 MHz	1000 V/ μ s	5/30 V
LT1812	Lin. Tech.	0,4 mV	1 μ A	100 MHz	750 V/ μ s	4/12 V
MAX4101	Maxim	1 mV	3 μ A	200 MHz	250 V/ μ s	7/11 V
MAX4104	Maxim	1 mV	32 μ A	800 MHz	400 V/ μ s	7/11 V
MAX4454	Maxim	0,4 mV	0,8 μ A	200 MHz	240 V/ μ s	3/ 5 V
CLC420	National	1 mV	3 μ A	300 MHz	1100 V/ μ s	5/12 V
CLC425	National	0,1 mV	12 μ A	2000 MHz	350 V/ μ s	6/12 V
CLC440	National	1 mV	10 μ A	200 MHz	1500 V/ μ s	5/12 V
LM6171	National	1,5 mV	1 μ A	100 MHz	3600 V/ μ s	10/32 V
LMH6655	National	1 mV	5 μ A	250 MHz	200 V/ μ s	5/12 V
OPA620	Texas I.	0,2 mV	15 μ A	300 MHz	250 V/ μ s	8/12 V
OPA640	Texas I.	2 mV	15 μ A	1300 MHz	350 V/ μ s	9/11 V
OPA643	Texas I.	2 mV	20 μ A	1500 MHz	1000 V/ μ s	9/11 V
OPA650	Texas I.	1 mV	5 μ A	560 MHz	240 V/ μ s	9/11 V
OPA655	Texas I.	1 mV	5 pA	400 MHz	290 V/ μ s	9/11 V
OPA2680	Texas I.	1 mV	8 μ A	300 MHz	1400 V/ μ s	9/12 V

Single Supply Typen

Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsruehestrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsge- schwindigkeit	Betriebsspan- nung min/max
VV-OPVs: Single Supply						
...324	viele	2 mV	45 nA	1 MHz	0,6 V/ μ s	4/32 V
AD8054	Analog D.	1,7 mV	2 μ A	150 MHz	150 V/ μ s	3/10 V
OP481	Analog D.	500 μ V	3 nA	100 kHz	250 V/ms	2,7/12 V
EL5444	Elantec	3 mV	2 nA	100 MHz	200 V/ μ s	4/6 V
LT1635	Lin. Tech.	300 μ V	2 nA	175 kHz	45 V/ms	1,2/14 V
LT2079	Lin. Tech.	30 μ V	6 nA	200 kHz	70 V/ms	2,3/44 V
MAX418	Maxim	250 μ V	100 fA	8 kHz	5 V/ms	2,5/10 V
MAX4220	Maxim	4 mV	5 μ A	200 MHz	600 V/ μ s	3/11 V
MAX4254	Maxim	100 μ V	1 pA	3 MHz	300 V/ms	2,4/5,5 V
LMC6442	National	1 mV	5 fA	10 kHz	4 V/ms	1,8/11 V
LMH6643	National	1 mV	2 μ A	130 MHz	130 V/ μ s	3/12 V
LMV722	National	20 μ V	260 nA	10 MHz	5 V/ μ s	2,2/5,5 V
LMV824	National	1 mV	30 nA	5 MHz	2 V/ μ s	2,7/5,5 V
OPA2244	Texas I.	200 μ V	2 nA	300 kHz	100 V/ms	2,7/36 V
OPA3355	Texas I.	2 mV	3 pA	450 MHz	360 V/ μ s	2,5/5,5 V
OPA4336	Texas I.	100 μ V	10 pA	100 kHz	30 V/ms	2,3/5,5 V
TLV2442	Texas I.	300 μ V	1 pA	2 MHz	1 V/ μ s	2,7/10 V

Rail to Rail Typen

Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsruehstrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsge- schwindigkeit	Betriebsspan- nung min/max
VV-OPVs: Rail-to-Rail Input and Output						
AD8527	Analog D.	1 mV	200 nA	7 MHz	8 V/ μ s	1,8/ 6V
AD8534	Analog D.	5 mV	5 pA	3 MHz	5 V/ μ s	2,7/ 6V
LT1367	Lin. Tech.	200 μ V	15 nA	400 kHz	130 V/ms	1,8/ 30V
LT1496	Lin. Tech.	200 μ V	250 pA	2,7 kHz	1 V/ms	2,2/ 36V
LT1499	Lin. Tech.	150 μ V	250 nA	10 MHz	4 V/ μ s	2,2/ 30V
LT1633	Lin. Tech.	500 μ V	1 μ A	45 MHz	45 V/ μ s	2,7/ 30V
LT1636	Lin. Tech.	100 μ V	5 nA	220 kHz	70 V/ms	2,7/ 44V
LT1639	Lin. Tech.	200 μ V	15 nA	1,2 MHz	0,5 V/ μ s	2,5/ 44V
LTC1152	Lin. Tech.	1 μ V	10 pA	700 kHz	500 V/ms	2,7/ 14V
MAX4164	Maxim	500 μ V	1 pA	200 kHz	115 V/ms	3/ 5V
MAX4169	Maxim	250 μ V	50 nA	5 MHz	2 V/ μ s	2,7/6,5V
MAX4244	Maxim	200 μ V	2 nA	90 kHz	40 V/ms	1,5/5,5V
MAX4334	Maxim	650 μ V	25 nA	3 MHz	1,5 V/ μ s	2,3/6,5V
MAX4492	Maxim	2 mV	50 pA	8 MHz	12 V/ μ s	2,5/5,5V
MC33502	Motorola	500 μ V	40 fA	4 MHz	3 V/ μ s	1/ 7V
LM8261	National	700 μ V	1 μ A	21 MHz	12 V/ μ s	2,5/ 30V
LMC6464	National	300 μ V	100 fA	50 kHz	23 V/ms	3/ 15V
LMC6484	National	100 μ V	20 fA	1,5 MHz	1 V/ μ s	3/ 15V
LMC6684	National	500 μ V	80 fA	1,2 MHz	1,2 V/ μ s	1,8/ 10V
LMC7111	National	900 μ V	100 fA	25 kHz	15 V/ms	1,8/ 10V
LMH6646	National	1 mV	400 nA	55 MHz	22 V/ μ s	2,5/ 12V
LMV924	National	2 mV	12 nA	1 MHz	0,4 V/ μ s	1,8/ 5V
TS925	SGS-Th.	1 mV	15 nA	4 MHz	1 V/ μ s	2,7/ 12V
TS944	SGS-Th.	3 mV	1 pA	10 kHz	4 V/ms	2,6/ 10V
OPA2349	Texas I.	2 mV	1 pA	70 kHz	20 V/ms	1,8/5,5V
OPA4340	Texas I.	500 μ V	10 pA	5,5 MHz	6 V/ μ s	2,5/ 5V

Präzisionstypen

Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsruehstrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsge- schwindigkeit	Betriebsspan- nung min/max
VV-OPVs: Präzisionstypen						
AD8574	Analog D.	1 μ V	10 pA	1,5 MHz	0,4 V/ μ s	3/ 5V
OP177	Analog D.	10 μ V	0,3 nA	0,6 MHz	0,3 V/ μ s	6/36V
HA5147	Harris	30 μ V	15 nA	130 MHz	35 V/ μ s	8/36V
LT1028	Lin. Tech.	10 μ V	25 nA	75 MHz	15 V/ μ s	8/32V
LT1114	Lin. Tech.	30 μ V	50 pA	750 kHz	0,3 V/ μ s	9/32V
LT1125	Lin. Tech.	20 μ V	5 nA	12 MHz	4 V/ μ s	8/40V
LT1218	Lin. Tech.	25 μ V	30 nA	0,3 MHz	0,1 V/ μ s	2/30V
LT1882	Lin. Tech.	30 μ V	150 pA	1 MHz	0,3 V/ μ s	3/36V
LT2078	Lin. Tech.	30 μ V	6 nA	0,2 MHz	0,1 V/ μ s	5/40V
LTC2052	Lin. Tech.	0,5 μ V	8 pA	3 MHz	2 V/ μ s	3/11V
MAX430	Maxim	1 μ V	10 pA	0,5 MHz	0,5 V/ μ s	5/32V
LMC2001	National	40 μ V	3 pA	6 MHz	5 V/ μ s	3/ 6V
OPA4277	Texas I.	10 μ V	1 nA	1 MHz	0,8 V/ μ s	6/36V
OPA627	Texas I.	40 μ V	1 pA	16 MHz	55 V/ μ s	9/36V

Rauscharme Typen

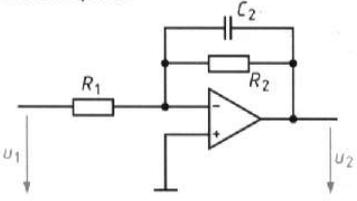
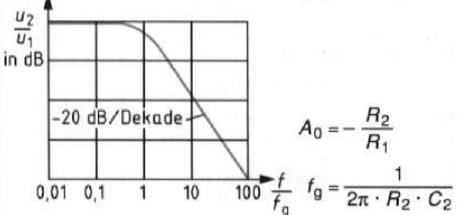
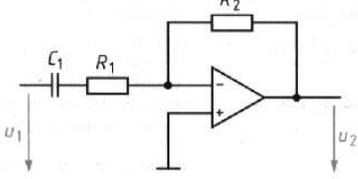
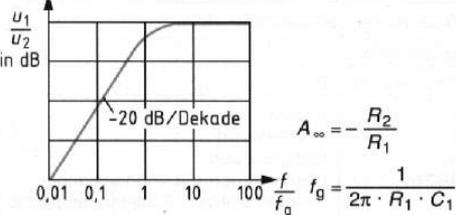
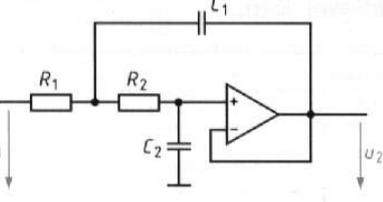
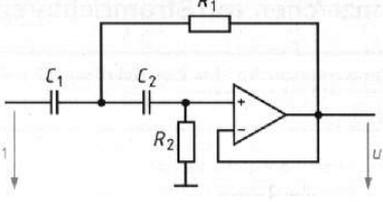
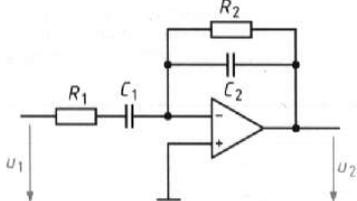
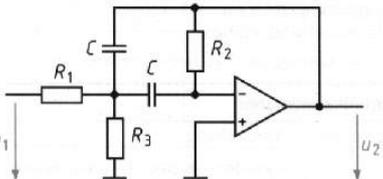
Typ	Hersteller	Offsetspannung	Eingangsruehstrom	Verst. Bandbr. Produkt	Anstiegsge- schwindigkeit	Betriebsspan- nung min/max
VV-OPVs: Rauscharme Typen						
AD797	Analog D.	25 μ V	300 nA	8 MHz	20 V/ μ s	10/36V
LT1028	Lin. Tech.	30 μ V	40 nA	75 MHz	15 V/ μ s	8/32V
LT1113	Lin. Tech.	500 μ V	300 pA	6 MHz	4 V/ μ s	8/36V
MAX4106	Maxim	300 μ V	18 μ A	300 MHz	275 V/ μ s	5/11V
CLC425	National	100 μ V	12 μ A	2000 MHz	350 V/ μ s	6/14V
LMC6001	National	200 μ V	25 fA	1 MHz	1 V/ μ s	5/14V
LMV751	National	50 μ V	2 pA	5 MHz	2 V/ μ s	3/ 5V
OPA128	Texas I.	200 μ V	75 fA	1 MHz	3 V/ μ s	10/30V
OPA627	Texas I.	40 μ V	1 pA	16 MHz	55 V/ μ s	9/36V
OPA686	Texas I.	400 μ V	10 μ A	300 MHz	600 V/ μ s	8/12V

Zusammenfassung und weitere Schaltungen mit Operationsverstärkern

Grundsaltungen

<p>Invertierer</p> <p>$U_A = -U_E \frac{R_2}{R_1}$</p>	<p>Impedanzwandler</p> <p>$U_A = U_E$</p>
<p>Nichtinvertierer</p> <p>$U_A = U_E \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$</p>	<p>Strom-Spannungswandler</p> <p>$U_A = -I_E \cdot R_2$</p>
<p>Differenzierer Differenzierer als Hochpass</p> <p>$U_E \text{ } \square \text{ } : U_A = -\frac{\Delta U_E}{\Delta t} \cdot R_2 \cdot C_1$ $U_E \sim \text{ } : U_A = -U_E \cdot R_2 \cdot \omega \cdot C_1$</p>	<p>Spannungs-Stromwandler</p> <p>$I_A = \frac{U_E}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$</p>
<p>Integrierer Integrierer als Tiefpass</p> <p>$U_E \text{ } \square \text{ } : \Delta U_A = -U_E \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{R_1 \cdot C_1}$ $U_E \sim \text{ } : U_A = -U_E \cdot R_1 \cdot \omega \cdot C_1$</p>	<p>Spannungs-Komparator, mit und ohne Hysterese</p> <p>$U_{Hy} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot \Delta U_A$</p>
<p>Summierverstärker</p> <p>$U_A = -R_3 \left(\frac{U_{E1}}{R_1} + \frac{U_{E2}}{R_2}\right)$</p>	<p>Bistabiler Multivibrator</p> <p>Setzen : an U_{E1} Rücksetzen : an U_{E2}</p>
<p>Differenzverstärker</p> <p>$U_A = U_{E2} \frac{R_4 (R_1 + R_3)}{R_1 (R_2 + R_4)} - U_{E1} \frac{R_3}{R_1}$</p>	<p>Astabiler Multivibrator</p> <p>$t_1 = t_2$ $T = t_1 + t_2$ $T = 2R_1 C_1 \ln \left(1 + \frac{2R_3}{R_2}\right)$ $R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$</p>

Filter

<p>Tiefpaß 1. Ordnung</p> <p>A_0: Verstärkung bei $f = 0$ Hz f_g: Grenzfrequenz</p>   <p>$A_0 = -\frac{R_2}{R_1}$ $f_g = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_2}$</p>	<p>Hochpaß 1. Ordnung</p> <p>A_∞: Verstärkung bei $f \gg f_g$ f_g: Grenzfrequenz</p>   <p>$A_\infty = -\frac{R_2}{R_1}$ $f_g = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1}$</p>
<p>Tiefpaß 2. Ordnung</p>  <p>$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$ $A_0 = 1$</p> <p>Abfall: -40 dB/Dekade</p>	<p>Hochpaß 2. Ordnung</p>  <p>$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$ $A_\infty = 1$</p> <p>Anstieg: 40 dB/Dekade</p>
<p>Bandpaß aus Tief- und Hochpaß</p>  <p>$f_{g1} = f_{g2}$</p> <p>Resonanzfrequenz: $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1}$ $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_2}$</p> <p>Verstärkung bei f_0: $A = -\frac{R_2}{2R_1}$</p>	<p>Bandpaß mit Mehrfachgegenkopplung</p>  <p>Resonanzfrequenz: $f_0 = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}$</p> <p>Verstärkung bei f_0: $A = -\frac{R_2}{2R_1}$</p>

Literaturverzeichnis

Joachim Federau
Operationsverstärker
Viewegs
ISBN 3-528-13857-2

U. Tietze, Ch. Schenk
Halbleiterschaltungstechnik
Springer
ISBN 3-540-42849-6

Brechmann
Elektrotechnik Tabellen Kommunikationselektronik
Westermann
ISBN 3-14-225037-9

Dieter Nährmann
Das große Werkbuch Elektronik
Franzis
ISBN 3-7723-6547-7