

Operationsverstärker in Theorie und Praxis Teil 1

Sie sind die „Universal-Arbeiter“ der Elektronik - Operationsverstärker finden sich vielfältig in vielen Elektronikschaltungen.

Unsere hiermit beginnende Serie führt, mit vielen praktischen und leicht nachvollziehbaren Schaltungsbeispielen sowie SPICE-Simulationen untermauert, in die Technik und die Anwendung dieser vielseitigen Bauelemente ein.

Im ersten Teil betrachten wir die Grundlagen der Operationsverstärker.

Großrechner und Differenzen

Operationsverstärker haben bereits eine recht lange Geschichte hinter sich, denn sie wurden, als gleichspannungsgekoppelte Breitbandverstärker mit einem Differenzeingang, speziell für die Realisierung von Rechenoperationen in Analogrechnern eingesetzt. Dies reicht bis in die Generation der Röhrenrechner zurück. Die Operationsverstärker, in manchen Formelsammlungen heute noch „Rechenverstärker“ genannt, ermöglichten durch die entsprechenden Behandlungen bzw. Verknüpfungen von Spannungen die verschiedensten

Rechenoperationen wie Addition, Subtraktion, Multiplikation, Integration usw. Genau das tun sie auch heute noch. Im Gegensatz zu den Anfängen sind sie aber zu winzigen und mit am universellsten einsetzbaren Standardbauteilen geworden, die es in der Elektronik gibt. Die dabei erreichte Anwendungs- und Technologiebandbreite ist enorm. Sie reicht vom einfachen Spannungsverstärker bzw. Puffer bis hin zu komplexen Anwendungen in Filtern, Spannungsreglern oder NF-Leistungsverstärkern. Es gibt unter den Operationsverstärkern („umgangssprachlich“ OV, OP oder OPV, wir verwenden in der Folge „OP“) sowohl „Arbeitspferde“, etwa die

legendären Typen 741, 358 oder 324, als auch für hochspezialisierte Anwendungen geschaffene Typen, etwa Instrumentenverstärker. Dazu werden die Operationsverstärker auch nach der eingesetzten Halbleitertechnologie unterschieden, sie unterteilen sich in bipolare und unipolare (z. B. BiFET, zur Erhöhung des Eingangswiderstands eingesetzt) Chips.

Aufbau des Operationsverstärkers

Der prinzipielle Aufbau eines Operationsverstärkers ist in Abbildung 1 zu sehen. Als Eingangsstufe fungiert immer ein Differenzverstärker, dem eine oder mehrere

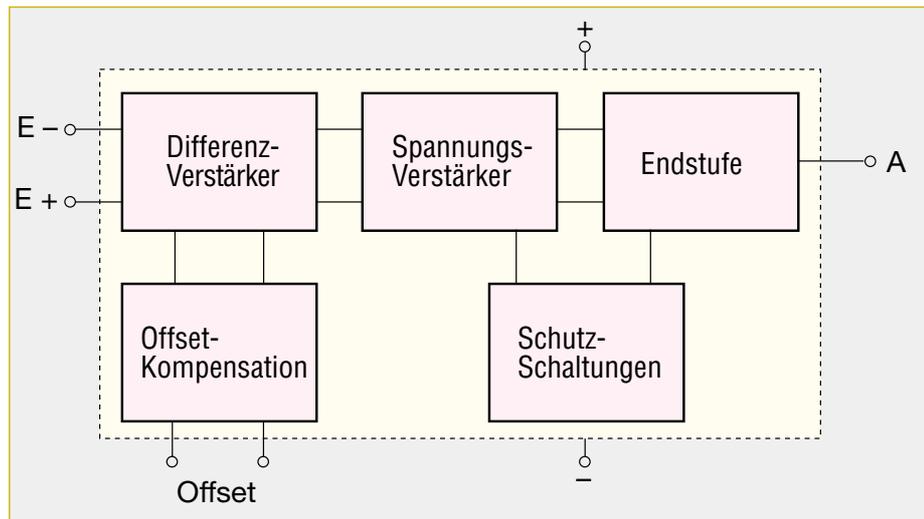


Bild 1: Blockschaltbild eines kompletten Operationsverstärkers.

Phasendrehung um 180 Grad vorgenommen, während über den nicht invertierenden Eingang die Eingangsspannung ohne diese Phasenverschiebung verstärkt wird - der OP hat einen Differenzverstärkereingang.

Differenzbetrieb

Dieser bewirkt, dass der Operationsverstärker nur die Differenzspannung zwischen seinen beiden Eingängen auswertet und verstärkt. Aufgrund der hohen Verstärkung des OPs führen bereits kleinste Differenzen zwischen diesen beiden Anschlüssen zu einer Reaktion am Ausgang. Da durch den Konstantstrombetrieb der beiden Transistoren (in der Praxis wird der gemeinsame Emitterwiderstand durch eine Konstantstromquelle ersetzt) die Summe beider Kollektorströme immer gleich bleibt, führt ein Basisstrom an einem der beiden Transistoren zum Ansteigen seines Kollektorstroms und gleichzeitigem (symmetrischen) Absinken des Kollektorstroms am anderen Transistor. Die aus dieser Stromänderung resultierende Spannungsänderung wird jetzt an einem Kollektor abgegriffen und entspricht der verstärkten Ausgangsspannung. Es ist also stets allein die Differenz beider Spannungen an den Eingängen relevant, nicht deren absolute Höhe! Diese Differenz, multipliziert mit der Leerlaufverstärkung des OPs, ergibt die Ausgangsspannung.

Gleichtaktbetrieb

Würde man beide Eingänge mit exakt der gleichen Spannung ansteuern (dies wird

Signalverstärkerstufen, Schutzschaltungen und schließlich eine Endstufe, je nach Ausführung des OPs als Gegentakt- oder Open-Kollektor-Stufe ausgeführt, folgen.

Je nach Funktionalität des OPs kommen zu den erwähnten Stufen noch solche zur internen Offset-Kompensation, Stromsparschaltungen usw. hinzu. Besonderes Augenmerk widmen die Chip-Designer auch der Anwenderfreundlichkeit in Form von Schutz gegen Fehlbehandlung, Kurzschlusschutz (Verlustleistungsbegrenzung) für die Endstufen ist ebenso Standard wie ein Temperaturschutz, insbesondere bei leistungsfähigeren OP-Endstufen.

Abbildung 2 zeigt eine typische Innenschaltung mit Gegentaktendstufe. Man erkennt deutlich die besprochenen Schaltungssteile.

Herausragendes Merkmal der Operationsverstärker ist ihre sehr hohe Leerlaufverstärkung (z. B. 1.000.000) der Differenzspannung zwischen den beiden Eingängen, die in der Praxis durch Begrenzung (Gegenkopplung) sehr weite Einsatzbereiche zulässt. Kennzeichnend sind ferner ein hoher Eingangswiderstand und ein geringer Ausgangswiderstand. Operationsverstärker verstärken sowohl Gleich- als auch Wechselspannungen, sie sind galvanisch gekoppelt und weisen eine hohe Übertragungsbandsbreite auf.

Grundsätzlich werden Operationsverstärker mit einer symmetrischen Betriebsspannung (gegenüber Schaltungsmasse) betrieben, aber auch einfache Spannungsversorgung ist üblich. Dies hängt vom internen Schaltungsdesign ab, das speziell

auf die Spannungsversorgungs-Philosophie abgestimmt ist.

Kommen wir nun zum Arbeitsprinzip und zu den Eigenschaften des Operationsverstärkers, die die hier bereits genannten Begriffe wie Leerlaufverstärkung, Differenzspannung, Gegenkopplung usw. näher beschreiben.

Das Arbeitsprinzip

Oft wird man auch den Namen „Differenzverstärker“ hören, wenn ein Operationsverstärker gemeint ist. Diese Bezeichnung führt direkt auf den Aufbau und das Arbeitsprinzip zurück. Denn betrachtet man die Grundschialtung des Differenzverstärkers bzw. seine Schaltungssymbolik (Abbildung 3), so fällt zunächst auf, dass er über zwei Eingänge verfügt, den invertierenden (-) und den nicht invertierenden (+), jeweils bezogen auf den Ausgang. Über den invertierenden Eingang wird eine Eingangsspannung verstärkt und dabei eine

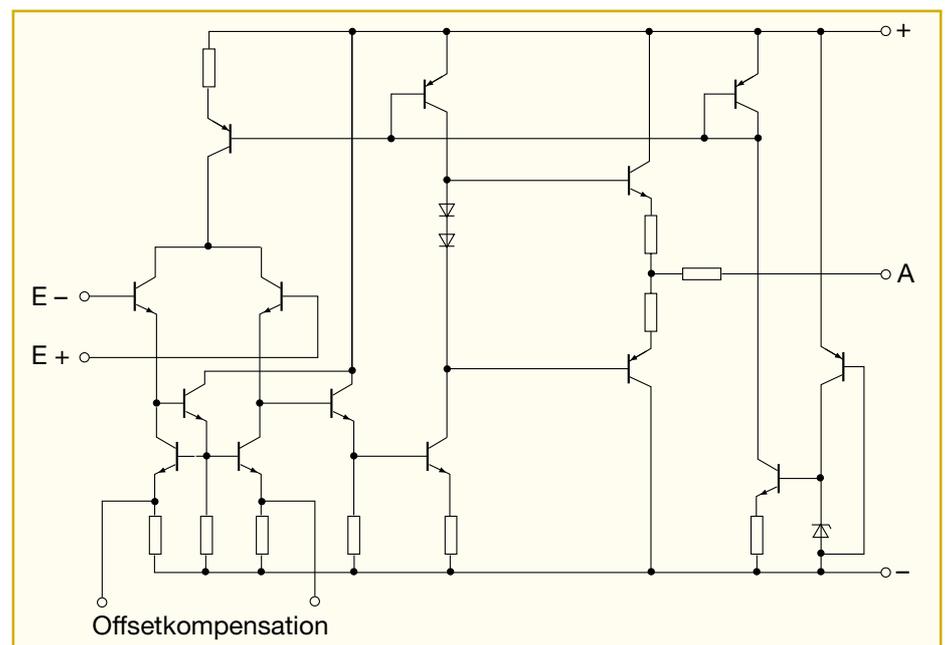


Bild 2: Innenschaltung eines Operationsverstärkers (Auszug). Man erkennt deutlich den Differenzverstärker, den Spannungsverstärker, die Endstufe, die Offset-Kompensation und die Schutzschaltungen.

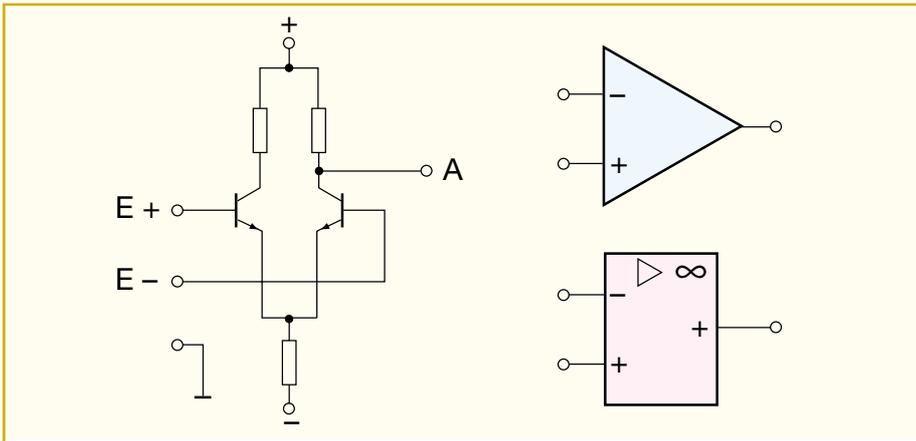


Bild 3: Der Differenzverstärker ist das Grundelement des Operationsverstärkers. Rechts die Schaltzeichen für den OP, oben alte Darstellung, unten Darstellung nach DIN.

Gleichtaktbetrieb bzw. Gleichtaktaussteuerung genannt), so betrüge die Ausgangsspannung theoretisch Null, egal, welche Höhe die Eingangsspannungen haben. Da die beiden Zweige des Differenzverstärkers aber praktisch nie exakt symmetrisch aufgebaut sind (dazu kommen immer Toleranzen, Temperaturdrift-Erscheinungen usw.), verbleibt dennoch eine Differenz, die eine Ausgangsspannung zur Folge hat. Dieser (störende) Effekt wird Gleichtaktverstärkung genannt, er verstärkt sich mit zunehmender Frequenz des Gleichtaktsignals.

Die Gleichtaktverstärkung sollte also gegenüber der Leerlaufverstärkung möglichst gering sein, in der Praxis sind Verhältnisse ab 1:10000 üblich.

Um diese Werte zu erreichen, bemühen sich die Halbleiterhersteller um möglichst symmetrische Differenzstufen mit möglichst identischen Transistoren und umfangreichen Schaltungs- und Konstruktionsmaßnahmen zur Kompensation z. B. der Temperaturdrift der Transistoren. Je besser diese Maßnahmen ausgeführt sind, desto höher fällt der „Gütwert“ des Operationsverstärkers aus - dieser wird Gleichtaktunterdrückung genannt.

Wollen wir nun die Eigenschaften des Operationsverstärkers im Einzelnen besprechen, denn sie sind ebenso wichtig für das Verständnis des Operationsverstärkers wie das Arbeitsprinzip.

Apropos Eigenschaften - immer wieder taucht bei der Beschäftigung mit Operati-

onsverstärkern der Begriff „idealer Operationsverstärker“ auf. Er stellt mit seinen Parametern (Tabelle 1) die Wunschvorstellung des Anwenders dar, wohingegen der reale Operationsverstärker eben doch noch, trotz aller Fortentwicklung, von den Idealvorstellungen abweichende Werte hat. Dennoch orientiert man sich bei vielen Berechnungen in diesem Bereich immer wieder am idealen Operationsverstärker, etwa, um Wirkungen erklären zu können.

Die Leerlaufverstärkung

Der Begriff „Leerlaufverstärkung“ kennzeichnet die Gesamtverstärkung der Differenzspannung zwischen den beiden Eingängen über den gesamten Operationsverstärker. Diese ist typabhängig und für die Anwendung in der Praxis eher ein theoretischer Rechenwert. Denn hier wird die Verstärkung durch Gegenkopplung zwischen Ausgange und invertierendem Eingang (Abbildung 4) eingestellt - eine der wichtigsten Maßnahmen bei der Schaltungsentwicklung. Diese Gegenkopplung kann linear oder frequenzabhängig erfolgen, wie wir später bei unseren Anwendungsbeispielen sehen werden.

Die Offset-Spannung und ihre Kompensation

Wie bereits beim Gleichtaktbetrieb diskutiert, ist die Ausgangsspannung nie genau Null, wenn an beiden Eingänge exakt

die gleichen Spannungen angelegt werden. Gleiches trifft zu, wenn sie beide an Masse liegen. Um die Ausgangsspannung in diesem Fall dennoch genau auf Null bringen zu können, muss man durch schaltungstechnische Maßnahmen die Unsymmetrie (den Offset) zwischen den beiden Differenzverstärkerstufen beseitigen. Der Begriff Offset-Spannung ist also definiert als die auftretende Differenzspannung zwischen den beiden Eingängen, die zu einer Ausgangsspannung von genau 0 V führt:

$$U_{\text{offset}} = U_{E+} - U_{E-} \text{ (für } U_a = 0V\text{).}$$

Zur Kompensation dieser in vielen Fällen störenden Offsetspannung bedient man sich je nach OP unterschiedlicher Methoden. Die einfachste ist der Griff zum sehr hochwertigen OP. Zum Beispiel weist der altbewährte OP 27 einen äußerst geringen Offset auf.

Viele Typen von Operationsverstärkern verfügen bereits über Pins für den einfachen Anschluss einer externen Offset-Kompensation (siehe auch Abbildung 2). Hier wird, wie in Abbildung 5 oben dargestellt, ein Trimpoti nach Herstellervorschrift angeschlossen, das dann unter den o.g.

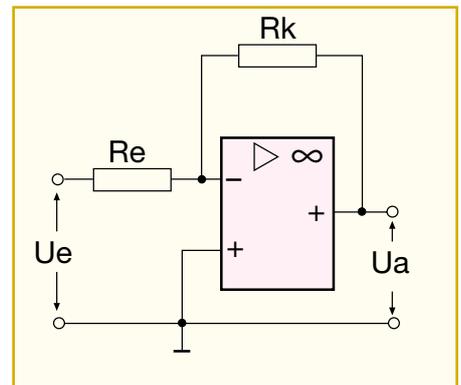


Bild 4: Die Verstärkung des OPs wird durch Gegenkopplung eingestellt.

Tabelle 1: Eigenschaften eines idealen und eines realen Operationsverstärkers		
	Idealer OP	Realer OP (Beispiel μA 741)
Spannungsverstärkung (Leerlauf)	unendlich	106 dB (entspricht ca. 200.000)
Eingangswiderstand	unendlich	2 M Ω
Ausgangswiderstand	0 Ω	75 Ω
Transitfrequenz	unendlich	1 MHz (Differenzverstärkung = 1)
Gleichtaktunterdrückung	unendlich	90 dB (entspricht ca. 90.000)
Eingangsoffsetspannung	0	\pm 1 mV
Temperaturkoeffizient	nicht vorhanden	3 μ V/K
Eingangs-Ruhestrom	0	80 nA

Zusätzlich beim realen OP zu beachten: die generelle Frequenzabhängigkeit aller Parameter.

Bedingungen einzustellen ist (Eingänge an Masse, Ausgangsspannung mit Poti auf 0 V einstellen).

Verfügt der Operationsverstärker nicht über eine interne Kompensation, so ist diese durch eine externe Beschaltung vorzunehmen, indem am Eingang E+ eine definierte, positive oder negative Spannung eingespeist wird, die die Offset-Spannung kompensiert. Wie eine solche Beschaltung prinzipiell aussieht, ist in Abbildung 5 unten zu sehen. Damit die Offset-Kompensation nicht durch schwankende Betriebsspannungen des Operationsverstärkers ad absurdum geführt wird, muss die Offsetspannung in den Fällen, wo eine Betriebsspannungsschwankung zu befürchten ist, stabilisiert werden.

Das Frequenzverhalten und die Frequenzkompensation

Wie alle Verstärker, weist auch der Operationsverstärker ein frequenzabhängiges Verstärkungsverhalten auf. Um die untere Grenzfrequenz muss man sich hier nur wenige Gedanken machen, der OP verstärkt auch Gleichspannungen und somit beginnt der Frequenzgang bei 0 Hz. Durch die inneren Halbleiterkapazitäten sowie die inneren Widerstände ergibt sich aber über die gesamte Schaltung des OPs ein Tiefpassverhalten, d.h., mit steigender Signalfrequenz sinkt die Verstärkung. Als signifikant gilt bei Operationsverstärkern die so genannte Transitfrequenz, auch Verstär-

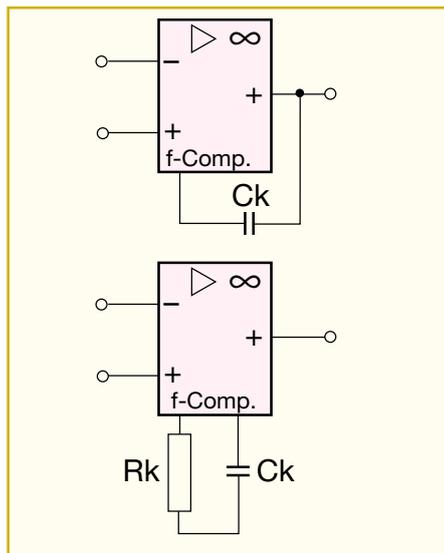
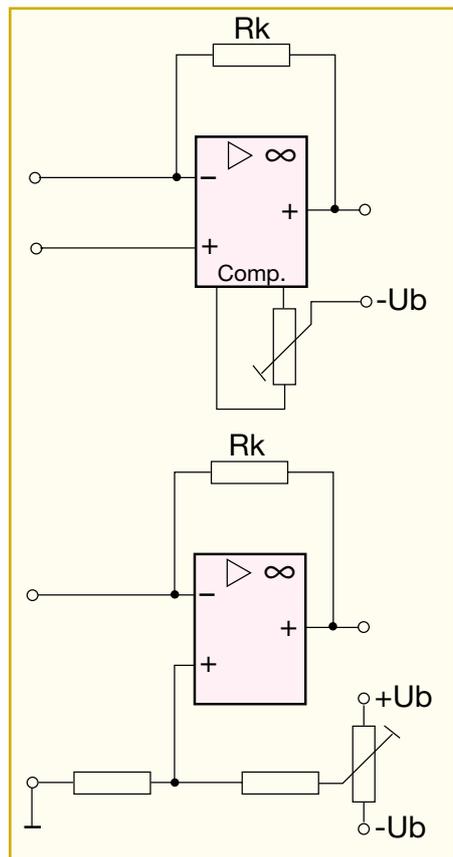


Bild 6: Standardvarianten für die externe Frequenzkompensation

kungs-Bandbreite-Produkt genannt. Dies ist die Signalfrequenz, bei der die Differenzverstärkung (Leerlaufverstärkung) des OPs auf 1 abgesunken ist.

Auch die Phasenverschiebung zwischen Ein- und Ausgangsspannung ist frequenzabhängig. Der unangenehme Effekt ist hierbei der, dass der gegengekoppelte OP bei bestimmten Frequenzen zum mitgekoppelten OP wird und anfängt, zu schwingen. Er arbeitet also als Oszillator.

Um diesen Effekt zu kompensieren, ist der OP nach Herstellervorschrift, sofern vorgesehen, mit einem Kondensator oder einem RC-Glied zu beschalten - der Frequenzkompensation (Abbildung 6). Viele OPs enthalten bereits eine interne Frequenzkompensation, sodass hier eine externe Beschaltung entfallen kann.

Anstiegsgeschwindigkeit

Aufgrund der eben beschriebenen internen Widerstände und Kapazitäten tritt zwischen der Änderung des Eingangssignals und des Ausgangssignals eine gewisse Verzögerung ein - bei einem „digitalen“ Spannungsprung von 0 auf 100% einer Signalamplitude am Eingang kann das Ausgangssignal dieser Anstiegsgeschwindigkeit zeitlich nicht folgen. Seine Anstiegs-

geschwindigkeit (Slew-Rate) ist begrenzt und wird in V/ μ s angegeben. Der hier vom Hersteller genannte Wert bezeichnet die Spanne, in der die Ausgangsspannung von 10% auf 90% der maximalen Amplitude (nicht übersteuert) steigt (Abbildung 7).

Eingangsruhestrom (Bias) und seine Kompensation

Die Transistoren in der Differenzstufe benötigen einen Basisstrom, um die jeweilige Basis anzusteuern. Dieser Strom wird durch das Eingangssignal geliefert. Aber auch ohne Eingangssignal fließt ein gerin-

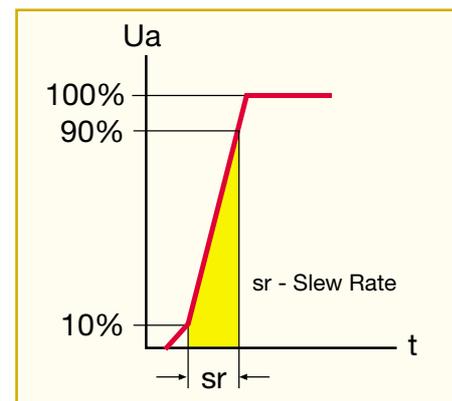


Bild 7: Die Anstiegsgeschwindigkeit des Ausgangssignals

ger Basisstrom, der Eingangsruhestrom. Er erzeugt einen Spannungsabfall über die äußeren Widerstände und ist eine Störgröße wie die Offset-Spannung und die Gleichtaktverstärkung. Denn auf diese Weise wird wieder eine Differenzspannung an den Eingängen erzeugt und die Ausgangsspannung aus ihrer Nulllage gebracht. Die Kompensation dieses Stroms erfolgt wie in Abbildung 8 gezeigt.

Damit haben wir die wichtigsten Eigenschaften des Operationsverstärkers aufgezeigt und widmen uns im zweiten Teil den Grundschaltungen und ihrer praktischen Anwendung. ELV

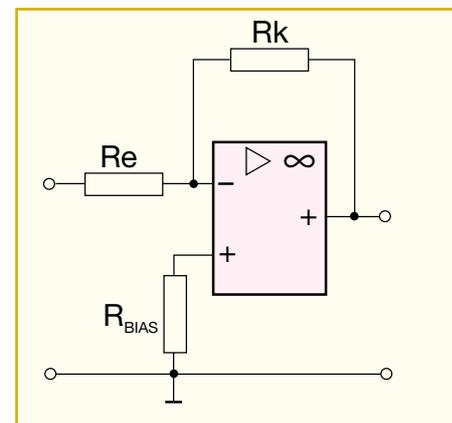


Bild 8: Kompensation des Eingangsruhestroms beim invertierenden OP