

3 Basic circuits of operational amplifiers I

Student Group

First Name	Surname	Matrikel Nr.

Table of Contents

3. Grundsaltungen von Operationsverstärkern I	2
Einführendes Beispiel	3
Ziele für die Grundsaltungen von Operationsverstärkern	3
3.0 Einführung	3
Historischer Abriss	4
3.1 Schaltzeichen und Grundbeschaltung	5
Merke: Operationsverstärkereingang	8
3.2 Grundgleichung / goldene Regeln	8
Merke: Grundgleichung und goldene Regeln	9
Spannungsversorgung des Operationsverstärkers	10
3.3 Spannungsfolger	10
Merke: Schritte zum Ziel	12
3.4 Nichtinvertierender Verstärker	12
Exercise 3.4.1 non-inverting amplifier	13
Merke: nichtinvertierender Verstärker	14
3.5 Invertierender Verstärker	15
Merke: Virtuelle Masse	16
Merke: Invertierender Verstärker	18
Aufgaben	18
Exercise 3.3.1 Analysis of the impedance converter circuit with different operational amplifiers	18
Exercise 3.3.2 Additional task to 3.3.1	20
Excercise 3.3.3 Use of amplifiers in microcontrollers	21
Exercise 3.4.2 Input resistor of feedback systems	22
Exercise 3.5.1 inverting amplifier	23
Exercise 3.5.2. Variations of the non-inverting amplifier	24
Exercise 3.5.3. R-2R conductor	28
Exercise 3.5.4. Conversion of a unipolar signal into a bipolar signal	30
Lernfragen	30

3. Grundsaltungen von Operationsverstärkern I

- Eine schöne Einführung bieten die [Operationsverstärker-Grundsaltungen auf Microcontroller.net](#)
- [Lehr- und Arbeitsbuch Operationsverstärker \(Joachim Federau\)](#) (über das Hochschulnetz einsehbar)
- Auf Youtube sind folgende zwei Videos von Prof. Griesbauer empfehlenswert: [Operationsverstärker Eigenschaften](#), [Operationsverstärker Schaltungen](#)
- interaktive Animation eines invertierten Verstärkers ist im [iPES Kurs der ETH Zürich](#) einsehbar (Login als Gast!)

Fig. 1: unverzerrtes Signal
[hallo.mp3](#)

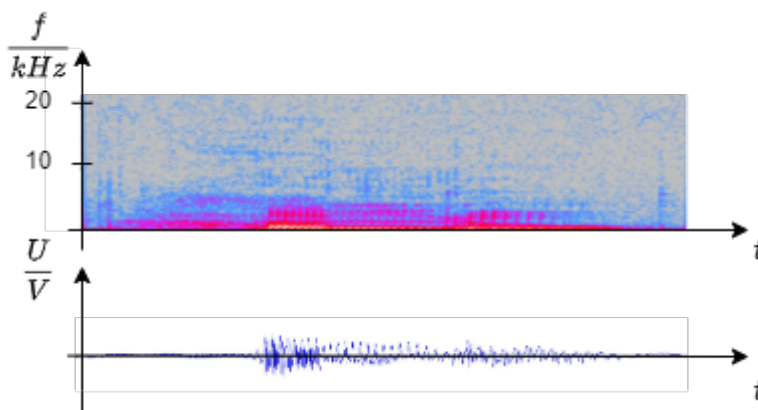
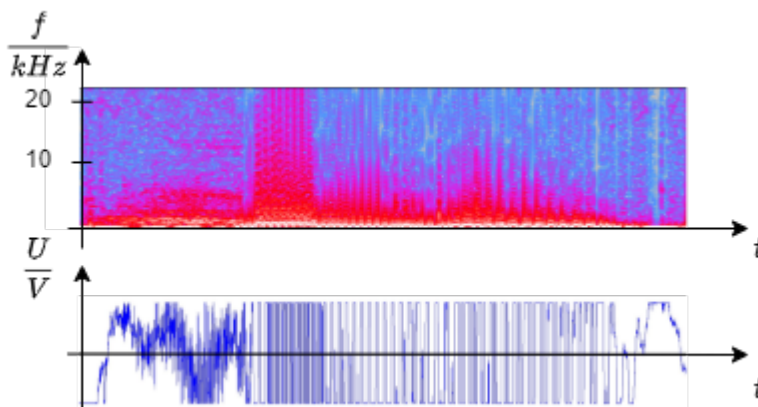


Fig. 2: übersteuertes Signal
[hallo_verzerrt.mp3](#)



Einführendes Beispiel

Akustische Verstärker, wie sie zum Beispiel in Mobiltelefonen, Laptops oder HiFi-Anlagen vorkommen, zeigen bei starker Verstärkung häufig eine unangenehme Eigenschaft: Das vorher unverzerrte Signal wird nicht mehr wie gewohnt weitergegeben, sondern **klirrt**. Es wird also so verzerrt, dass es sich nicht mehr angenehm anhört.

Dazu finden Sie in **figure 1** und **figure 2** jeweils ein akustisches Beispiel mit Bildern. Im jeweiligen Bild ist unten der Zeitverlauf der an einen Lautsprecher ausgegebenen Spannung zu sehen (x-Achse: Zeit, y-Achse: Frequenz). Das obere Bild hat drei Dimensionen: Es zeigt in der Farbintensität an, welche Frequenzen zu welcher Zeit genutzt werden. Die Frequenzen in grauen Bereichen werden nicht benötigt. Wenn eine Frequenz zu einem Zeitpunkt rot dargestellt werden, so hat diese eine relativ große Amplitude.

Es ist zu sehen, dass das verzerrte Signal sowohl im Zeitverlauf der Spannung große Amplituden aufweist, als auch eine breite Verteilung an Frequenzen (= ein breites Spektrum). Gerade die hohen Frequenzen können bei Lautsprechern den Verschleiß der Membran fördern.

Die Signalverzerrung ist auf den Aufbau des Verstärkers zurückzuführen, welcher nur eine maximal mögliche Spannung ausgeben kann und ansonsten **übersteuert**. Der Aufbau eines akustischen Verstärkers gleicht dem eines rückgekoppelten Operationsverstärkers, so wie er in der Simulation rechts zu sehen ist.

Akustische Verstärker sind meist wie Operationsverstärker aufgebaut, welche in diesem Kapitel betrachtet werden sollen.

Ziele für die Grundsaltungen von Operationsverstärkern

Nach dieser Lektion sollten Sie:

1. die Grundgleichung von Operationsverstärkern und die goldenen Regeln gelernt haben.
2. wissen, wie die Grundsaltungen (invertierender und nichtinvertierender Verstärker) aufgebaut sind, wie deren Spannungsverstärkung lautet und wie sich deren Ein- und Ausgangswiderstände verhalten.
3. bei einfachen Verstärkerschaltungen die Spannungsverstärkung berechnen können.
4. das Konzept der virtuellen Masse verstanden haben.

3.0 Einführung

Fig. 3: Operationsverstärker



Historischer Abriss

Um die Herkunft des Operationsverstärkers zu verstehen, soll hier ein kurzer Abriss der Microprozessorhistorie dargestellt werden. Der erste Mikroprozessor wurde 1971 von INTEL als [Intel 4004](#) kommerziell vertrieben, welcher mit einem Word nur einen 4-Bit Zahlenraum darstellen konnte und eine Taktfrequenz von 500 kHz hatte. Dieser wurde bereits nach einem halben Jahr als [8008](#) auf ein 8-Bit Word erweitert, sodass Rechnungen wesentlich schneller durchgeführt werden konnten. Aus dieser zweiten Generation wurde 1978 der [8086](#) entwickelt, welcher mit einem 16-Bit Word sehr lange die Grundlage von vielen PCs und anderen Elektronikkomponenten dargestellt hatte. 1985 wurde dieser Prozessor als 80386 auf ein 32-Bit Word erweitert. Aus dieser Zeit stammt auch die vielleicht bekannte Frage, ob Software als x86 oder x64 Code installiert werden soll. Bereits seit 1999 sind Prozessoren mit 64-Bit Word verfügbar, welche aber noch nicht alle Nischen durchdrungen haben.

Mit Blick auf diesen historischen Abriss stellt sich die Frage, wie Apollo 11 die erste Mondmission sowohl die Mondfähre steuern und wie die Bahn so genau berechnet werden konnte, dass dies kein Risiko darstellt. Die Entwicklung des [Apollo Guidance Computer](#) wurde bereits 1961 gestartet, also 10 Jahre vor dem ersten kommerziellen Mikroprozessor. Dieser Prozessor konnte mit etwa 1MHz Frequenz und 16-Bit Wordbreite bereits 1966 eine Leistung bereitstellen, welche kommerziell erst 15 Jahre später zur Verfügung war. Trotzdem konnten diese Rechner nicht in vertretbarer Zeit die Differentialgleichungssysteme lösen, welche für die Trajektorienplanung notwendig waren. Dies war nur durch die Vereinigung von dem bekannten digitalen Prozessoren und den schon seit den 1920er Jahren verwendeten [Analogrechnern](#) möglich. Analogrechner erinnern nur wenig an das klassische Bild des Rechners. Sie bestehen zwar auch aus einem Netzwerk an Komponenten, besitzen aber keine Software. Vielmehr werden zur Berechnung verschiedene Eigenschaften elektronischer Komponenten genutzt (z.B. das exponentielle Verhalten der Shockley-Gleichung der Diode). Für die Apollomissionen wurde der [EAI 380 Hybridrechner](#) verwendet. Dieser und ähnliche Hybridrechner wurden noch bis in die 1990er Jahre eingesetzt um Differentialgleichungssysteme für Luft- und Raumfahrt, Baubranche und (unter etwas anderer Gestalt) auch als Synthesizer in der Musikindustrie eingesetzt. Der interessierte Leser sei auf den Vortrag von [Hr. Ulmann über Analogrechner](#) verwiesen, in welchem erklärt wird, warum diese selbst den modernsten Computern überlegen sind.

Fig. 4: Operational Amplifier Module (OPA) in einem PIC-Microcontroller des Herstellers Microchip (c) Microchip



Der Kernbaustein von Analogrechnern ist der Operationsverstärker. Mit diesem ist es möglich Addierer, Subtrahierer, Multiplizierer, Exponentierer, Integratoren und Differentiatoren aufzubauen und zusammenzufügen. Die "Berechnung" geschieht, dann fast instantan nach Einstellen der gewünschten Eingangsspannungen.

Der Operationsverstärker hat diese Zeit überdauert und bietet heutzutage eine Ausgangsbasis für unterschiedlichste Signalaufbereitung, wie aktive Filter, Verstärkerstufen, Anpassung von Eingangs-/Ausgangswiderstand und verschiedene (integrierte) Regelkreise. Bei verschiedenen Mikrocontrollern sind Operationsverstärker direkt eingebaut und können durch geeigneten Code konfiguriert werden. In [figure 4](#) ist ein PIC Mikroprozessor zu sehen, welcher einen integrierten Operationsverstärker enthält.

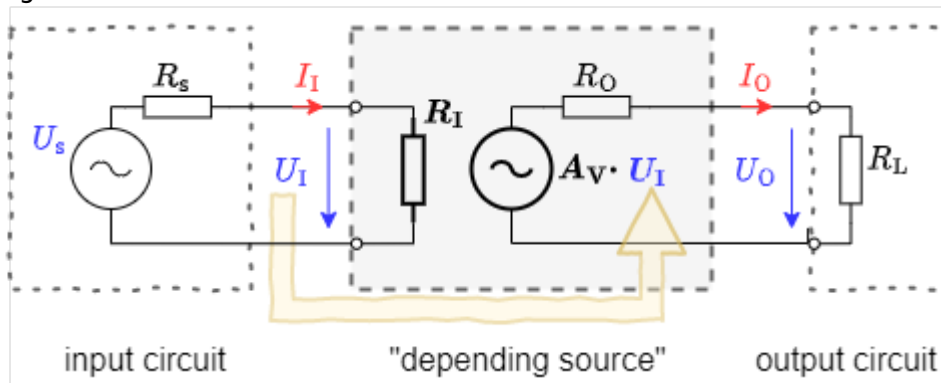
3.1 Schaltzeichen und Grundbeschaltung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit Operationsverstärkern bzw. im Allgemeinen mit Messverstärkern. Eine Anwendung dafür ist die Messung von Spannungen, Strömen und Widerständen. Diese müssen in einigen Anwendungen sehr genau bestimmt werden, beispielsweise für eine genaue Temperaturmessung. In diesem Fall ist eine Verstärkung der Messsignale sinnvoll und notwendig.

Diese Verstärkung geschieht durch Messverstärker. Messverstärker müssen einige Eigenschaften erfüllen:

- Messverstärker sollen keine Rückwirkung auf die Messgröße ausüben. Ein Operationsverstärker konkret soll einen möglichst großen Eingangswiderstand besitzen. Damit bricht die zu verstärkende Spannung nicht ein.
- Messverstärker sollen eine hohe Empfindlichkeit besitzen. Ein Operationsverstärker konkret soll eine große Differenzverstärkung A_D aufweisen.
- Messverstärker sollen ein definiertes Übertragungsverhalten zeigen, das heißt das Ausgangssignal soll eindeutig mit dem Eingangssignal zusammenhängen. Ein Operationsverstärker konkret soll einen linearen Zusammenhang zeigen.
- Messverstärker sollen ein gutes dynamisches Verhalten zeigen. Beim Operationsverstärker konkret soll das Ausgangssignal dem Eingangssignal ohne zeitliche Verzögerung folgen.
- Messverstärker sollen ein "eingepprägtes Ausgangssignal" erzeugen. Das bedeutet, dass die Komponenten am Verstärkerausgang das ausgegebene Signal nicht verändern können. Ein Operationsverstärker konkret soll das gewünschte Ausgangssignal mit dem dafür notwendigen Strom aufrecht erhalten können. Da der Strom I_A (für elektronische Verhältnisse) sehr groß werden kann, bedeutet dies, dass ein Operationsverstärker einen geringen Ausgangswiderstand $R_A = \frac{U_A}{I_A}$ besitzen muss.

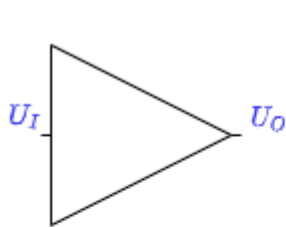
Fig. 5: Ersatzschaltbild eines Verstärkers



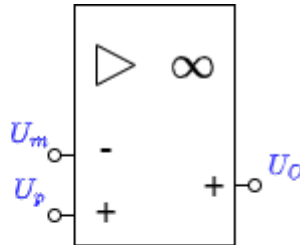
Allgemein ist ein Messverstärker wie in [figure 5](#) aufgebaut. Dies wurde bereits im Kapitel [1 Grundlagen zu Verstärkern](#) beschrieben. Im Folgenden werden nur noch Operationsverstärker betrachtet. Ein Operationsverstärker ist ein Messverstärker, welcher häufig in der Elektrotechnik Anwendung findet.

Das Schaltsymbol des Verstärkers ist ein gleichschenkliges Dreieck, an dessen Spitze das Ausgangssignal herrührt und in dessen Basis das Eingangssignal eintritt. In [figure 6](#) sind verschiedene Schaltsymbole zu sehen:

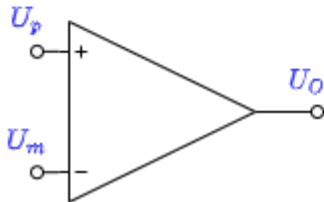
Fig. 6: Schaltsymbole von Verstärkern



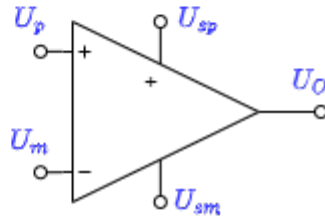
(1)



(2)

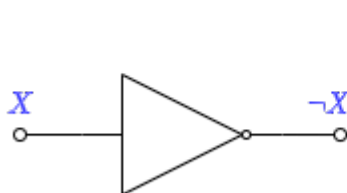


(3)

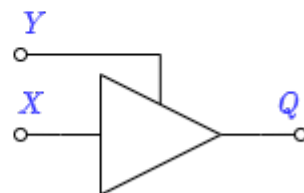


(4)

Be aware!



(5)

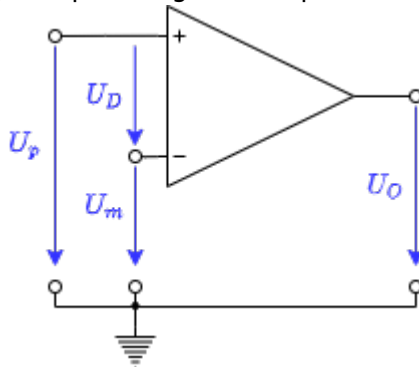


(6)

- Schaltsymbol (1): In Blockschaltbildern (nicht zu verwechseln mit Schaltplänen, siehe [Kapitel 1](#)) wird dieses Schaltsymbol für allgemeine Verstärker verwendet. Das Eingangssignal tritt in einen Eingang ein und über einen Eingang aus. Dieses Zeichen wird erst wieder in Kapitel 5. zu finden sein.
- Schaltsymbol (2): Nach DIN EN 60617 ist dieses Schaltbild für Operationsverstärker zu nutzen. Es weist mit dem Unendlichzeichen auf die idealerweise unendlich hohe Verstärkung hin. im Folgenden wird dieses Symbol nicht verwendet, da dieses in allen internationalen Schaltungen und Werkzeugen nicht verwendet wird.
- Schaltsymbol (3): Das Schaltsymbol (3) ist das am häufigsten genutzte Symbol für einen Operationsverstärker. Links sind dabei der **invertierende Eingang** mit der Spannung U_m (minus) und der **nicht-invertierende Eingang** mit U_p (plus) zu finden. Rechts ist der Ausgang mit der Spannung U_A dargestellt.
- Schaltsymbol (4): Das Schaltsymbol (4) sind zusätzlich die Versorgungsspannungen U_{sp} (supply plus) und U_{sm} (supply minus) mit eingezeichnet. Aus der Versorgung wird die Leistung für die ausgegebene Spannung des Operationsverstärkers bereitgestellt.
- Schaltsymbol (5) und (6): Diese Symbole zeigen **keine** Operationsverstärker. Diese Symbole zeigen das NOT-Gatter und das Tri-State-Gatter. Beide Komponenten sind bereits in [Grundlagen der Digitaltechnik](#) besprochen worden. Leider ist die Darstellung dieser Digitalkomponenten in verschiedenen Schaltungen dem Operationsverstärker nicht unähnlich. Ein Beispiel dazu sind die Transceiver¹⁾ [SP3481](#) oder [SP3485](#). Wenn digitale Eingangswerte betrachtet werden, ist davon auszugehen, dass das Schaltsymbol keinen Operationsverstärker darstellt.

Merke: Operationsverstärkereingang

Fig. 7: Spannungen am Operationsverstärker



Die Eingänge des Operationsverstärker sind als **invertierende Eingang** U_m und **nicht-invertierende Eingang** U_p bezeichnet.

Die Spannung $U_D = U_p - U_m$ wird Differenzspannung genannt (siehe [figure 7](#)).

3.2 Grundgleichung / goldene Regeln

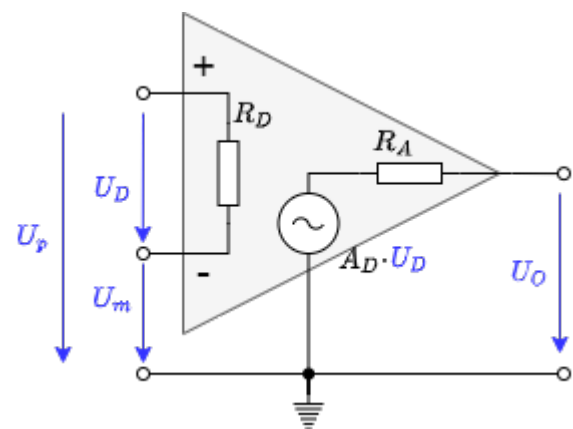


Fig. 8: Ersatzschaltbild des Operationsverstärker

Der Operationsverstärker ist ein Spannungsverstärker. Damit ergeben sich aus Kapitel [idealisierte Verstärkergrundtypen](#), dass für den idealen Fall der Eingangswiderstand unendlich und der Ausgangswiderstand $R_A=0$ sein muss.

Die [figure 8](#) zeigt einen idealen Spannungsverstärker. Diese ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- **Eingangswiderstand:** In der Abbildung ist die Eingangsseite eingezeichnet. Als Widerstand wird hier der Differenzwiderstand R_D angegeben, an dem die Differenzspannung U_D abfällt. Es gilt also $R_D \rightarrow \infty$. Damit gehen die Eingangsströme $I_p \rightarrow 0$ und $I_m \rightarrow 0$.
- **Ausgangswiderstand, Grundgleichung:** Auf der Ausgangsseite ergibt sich mit $R_A=0$, dass $U_A = A_D \cdot U_D$ ist. Dies ist die Grundgleichung der Verstärkerschaltung. Im

Idealfall verstärkt der Operationsverstärker linear, wie in der Gleichung angegeben. Speziell für eine Differenzspannung von $0V$ ergibt sich eine Ausgangsspannung von $0V$

- **Spannungsverstärkung:** Aus dem Kapitel [Rückkopplung](#) ist bekannt, dass A_D sehr groß sein muss. Im Idealfall gilt: $A_D \rightarrow \infty$

Merke: Grundgleichung und goldene Regeln

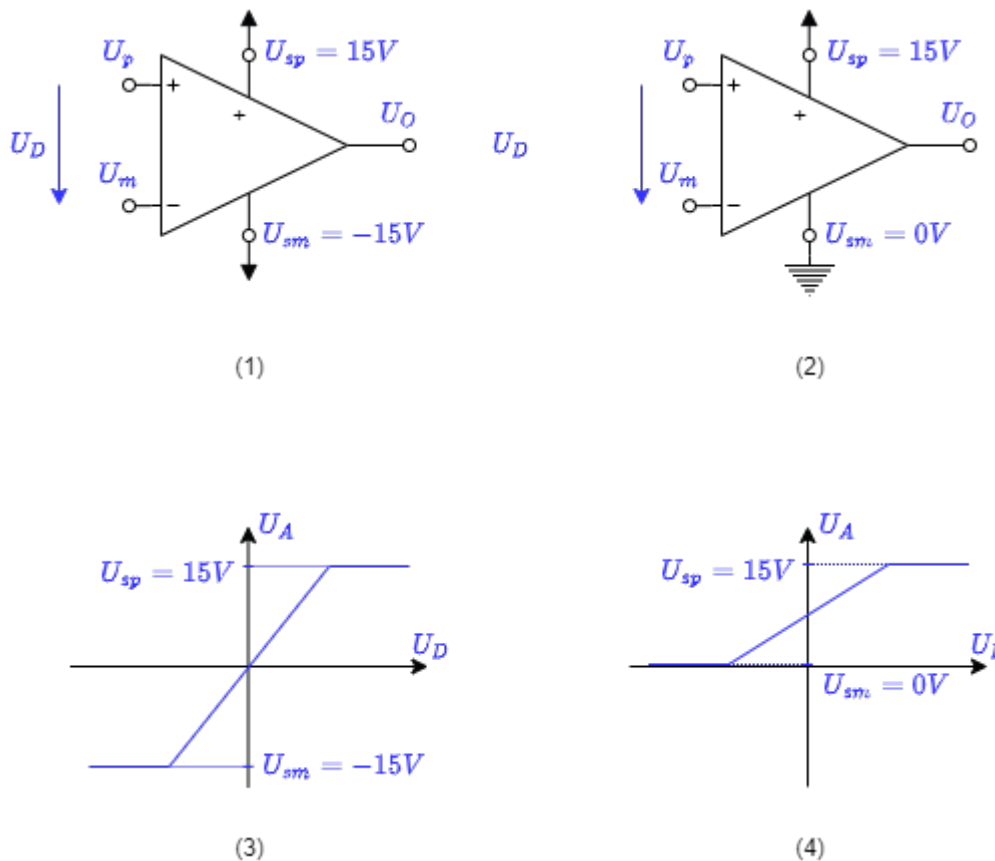
1. Die Ausgangsspannung hängt über die Differenzverstärkung von der Differenzspannung ab: $U_A = A_D \cdot U_D$
Dies ist die **Grundgleichung** der Verstärkerschaltung
2. Die **goldenen Regeln** des idealen Verstärkers lauten:
 1. Die Differenzverstärkung geht gegen unendlich: $A_D \rightarrow \infty$
 2. Der Eingangswiderstand geht gegen unendlich: $R_D \rightarrow \infty$
 3. Der Ausgangswiderstand ist 0: $R_A = 0$

Diese Regeln haben im realen Verstärker verschiedene Grenzen:

- **$U_A = A_D \cdot U_D$:**
 - Die Ausgangsspannung kann nur soweit der Eingangsspannung folgen, wie es die Spannungsversorgung zulässt. Bei realen Operationsverstärkern können nur sogenannte **Rail-to-Rail** Operationsverstärker den Bereich bis auf wenige $100mV$ zu U_S ausnutzen. Andere Operationsverstärker haben eine **Aussteuergrenze**, welche vom Betrag $1...2V$ unterhalb der Versorgungsspannung liegt.
 - Sind die Versorgungsspannungen nicht symmetrisch ($U_{sm} \neq -U_{sp}$), dann verschiebt sich auch die Kennlinie.
 - Der ideale Operationsverstärker erzeugt die gleiche Ausgangsspannung $U_A = A_D \cdot U_D$, solange $U_D = U_p - U_m$ gleich ist. Beim realen Operationsverstärker mit festem A_D unterscheidet sich Ausgangsspannung U_{A1} für $U_{D1} = 5V - 4,9V$ von U_{A2} für $U_{D1} = 0,1V - 0V$.
- **A_D :** Die Differenzverstärkung liegt üblicherweise zwischen $A_D = 20'000 \dots 400'000$.
- **R_D :** Bei realen Operationsverstärkern ist der Eingangswiderstand $R_E > 1 M\Omega$ und der Eingangsstrom $|I_p|$ bzw. $|I_m|$ unter $1 \mu A$
- **R_A :** Bei realen Operationsverstärkern ist der Ausgangswiderstand R_A meist einige Ω groß und durch einen maximalen Strom (im Bereich von einigen Dutzend mA bis wenige A) begrenzt

Der Operationsverstärker In der Simulation rechts bildet in einigen Punkten einen realen Operationsverstärker nach: Der Die Spannungsverstärkung beträgt $A_D = 100'000$. Die Übertragungskennlinie $U_A(U_D)$ zeigt nur dann ein proportionales Verhalten, wenn der ausgegebene Wert betragsmäßig kleiner als die (nicht abgebildete) Versorgungsspannung $|U_{sp}| = |U_{sm}| = 15V$ ist. Die Aussteuergrenzen und die Spannungsverstärkung lassen sich in der Simulation über "Bauteil bearbeiten" (Doppelklick) verändern.

Fig. 9: unipolare und bipolare Versorgung



Spannungsversorgung des Operationsverstärkers

Bei der Spannungsversorgung des Operationsverstärkers wird zwischen unipolar und bipolar unterschieden:

Bei der **bipolaren Spannungsversorgung** wird betragsmäßig die gleiche Spannung mit unterschiedlichem Vorzeichen an beide Versorgungsanschlüsse gegeben (figure 9 (1)). Die Ausgangsspannung U_A des Verstärkers kann dadurch in beide Richtungen zeigen (figure 9 (2)). Die Spannungsversorgung muss dabei so gestaltet sein, dass sie die beiden Spannungen bereitstellen kann. Bei einer Differenzspannung von $U_D=0$ ergibt sich auch eine Ausgangsspannung von $U_A=0$.

Bei der **unipolaren Spannungsversorgung** liegt der negative Versorgungsanschluss auf Masse (figure 9 (3)). Dadurch kann die Ausgangsspannung U_A des Verstärkers nur nicht-negative Werte annehmen (figure 9 (4)). Die Versorgung kann in diesem Fall durch eine einzige Spannungsquelle (z.B. eine Batterie) erfolgen. Bei einer Differenzspannung von $U_D=0$ ergibt sich eine Ausgangsspannung von $U_A = \frac{1}{2} \cdot U_{sp}$.

3.3 Spannungsfolger

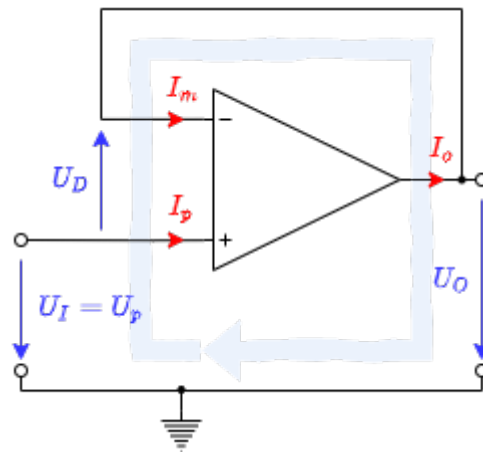


Fig. 10: Spannungsfolger

Im Kapitel [Rückkopplung](#) wurde beschrieben, dass ein Verstärker mit hoher open-loop Verstärkung durch das Zurückführen eines Teils des Ausgangssignals mit negativem Vorzeichen “gebändigt” werden kann. Im einfachsten Fall könnte das Ausgangssignal direkt auf den negativen Eingang des Operationsverstärkers gegeben werden. Am positiven Eingang wird das Eingangssignal U_E der gesamten Schaltung angelegt. In [figure 10](#) ist diese Schaltung abgebildet.

Anhand dieser Schaltung soll nun das Vorgehen zum Lösen von Verstärkerschaltungen dargestellt werden.

1. **Ziel** ist immer einen Bezug zwischen Ausgangsspannung U_A und Eingangsspannung U_E zu schaffen.
Daraus ergibt sich hier als Ziel die Spannungsverstärkung $A_V = \frac{U_A}{U_E}$.
2. Bevor gerechnet wird, sollte geprüft werden, wieviele Gleichungen das System beschreiben und damit aufgestellt werden müssen. Dies lässt sich über die **Anzahl der Variablen** ermitteln. Dazu werden die Ströme und Spannungen der Schaltung durchgezählt.
In diesem Fall sind es 3 Ströme und 3 Spannungen. Die **Anzahl der benötigten Gleichungen** ist also 6.
3. Nun werden **Gleichungen aufgestellt**, die verwendet werden können. Dazu dienen:
 1. **Grundgleichung:** (1) $U_A = U_D \cdot A_D$
 2. **Goldene Regeln:** $R_D \rightarrow \infty$ damit $I_p = I_m = 0$, $A_D \rightarrow \infty$, $R_A = 0$
 3. Betrachtung der vorhandenen **Maschen**:
in diesem Beispiel gibt es nur eine Masche (4) $-U_E + U_D + U_A = 0$.
Achtung: Maschen können nicht durch einen Eingang in den Verstärker ein und durch den Ausgang austreten! Zu beachten ist auch die Richtung von U_D .
 4. Betrachtung der vorhandenen **Knoten**:
in diesem Beispiel gibt es nur einen Knoten (5) $I_o = I_m$
4. Es scheint eine Gleichung zu fehlen. Dies ist aber nicht richtig, denn im Ziel verbirgt sich noch eine Gleichung: (0) $A_V = \frac{U_A}{U_E}$
5. Zum **Lösen der Gleichungen** müssen nun die Gleichungen so geschickt ineinander eingesetzt werden, dass am Ende keine Abhängigkeiten von den Variablen mehr vorhanden ist.

Die Rechnung ist hier einmal detailliert durchgeführt (der Klick auf Pfeil nach rechts “►” führt zum nächsten Schritt, [alternative Darstellung](#)):

Die Spannungsverstärkung ist also $A_V=1$. Dies wäre auch aus Kapitel [Rückkopplung](#) zu sehen gewesen. Dort wurde hergeleitet, dass sich für $A_D \rightarrow \infty$ die Spannungsverstärkung gerade aus k ergibt: $A_V = \frac{1}{k}$. Da hier die gesamte Ausgangsspannung zurückgekoppelt wird, ist $k=1$ und damit auch $A_V=1$.

Die Ausgangsspannung U_A gleicht also der Eingangsspannung U_E . Daher rührt auch der Name "Spannungsfolger". Man könnte nun annehmen, dass dieser Verstärker wenig hilft, denn auch eine direkte Verbindung würde $U_A=U_E$ liefern. Wichtig hier ist aber: Durch den Operationsverstärker gibt es keine Rückwirkung von U_A auf U_E . Dies bedeutet, dass ein Widerstand auf der Ausgangsseite die Eingangsseite nicht belastet. In der Simulation rechts kann durch den Slider "Resistance" (rechts) der Lastwiderstand geändert werden. Dadurch ändert sich zwar der Stromfluss, aber nicht die Spannung.

Dieses Verhalten lässt sich auch anders erklären: Das Eingangssignal kommt meist aus einer Spannungsquelle, welche nur geringe Ströme erzeugen kann. Das heißt die Eingangssignale sind hochohmig ($\text{hochohmig} = \frac{\text{Spannung}}{\text{kleinen Strom}}$). Am Ausgang kann aber eine Last beliebiger Impedanz anliegen. Das heißt, um das Ausgangssignal konstant zu halten, muss je nach Last ein großer Strom bereitgestellt werden. Da der Ausgangswiderstand des Verstärkers gegen 0 geht, ist das Signal tatsächlich niederohmig ($\text{niederohmig} = \frac{\text{Spannung}}{\text{u.U. großen Strom}}$). Daher rührt auch der zweite Name der Schaltung "**Impedanzwandler**".

Merke: Schritte zum Ziel

Zum Lösen von Aufgaben hilft folgendes Vorgehen:

1. Wohin? Klärung des Ziels (hier: stets die Beziehung zwischen Ausgangs- und Eingangssignal)
2. Woran? Klärung was dazu benötigt wird (hier: stets Gleichungen. Anzahl der Gleichungen durch Variablenanzahl ermittelbar)
3. Womit? Klärung was bereits vorhanden ist (hier: bekannte Gleichungen: Spannungsverstärkungsgleichung, Grundgleichung, goldene Regeln, Maschen-/Knotensatz, Beziehungen von Spannungen und Strömen der Komponenten)
4. Go! Lösung erarbeiten (hier: Einsetzen der Gleichungen)
Es hilft dabei die Gleichung so umzustellen, dass $1/A_D$ ohne Vorfaktor erscheint. Es gilt: $1/A_D \rightarrow A_D \rightarrow \infty$ 0

3.4 Nichtinvertierender Verstärker

Bisher wurde die gesamte Ausgangsspannung gegengekoppelt. Nun soll nur ein Teil der Spannung zurückgeführt werden. Dazu kann die Ausgangsspannung über einen Spannungsteiler R_1+R_2 verringert werden. Die Schaltung dazu ist in [figure 11](#) zu sehen.

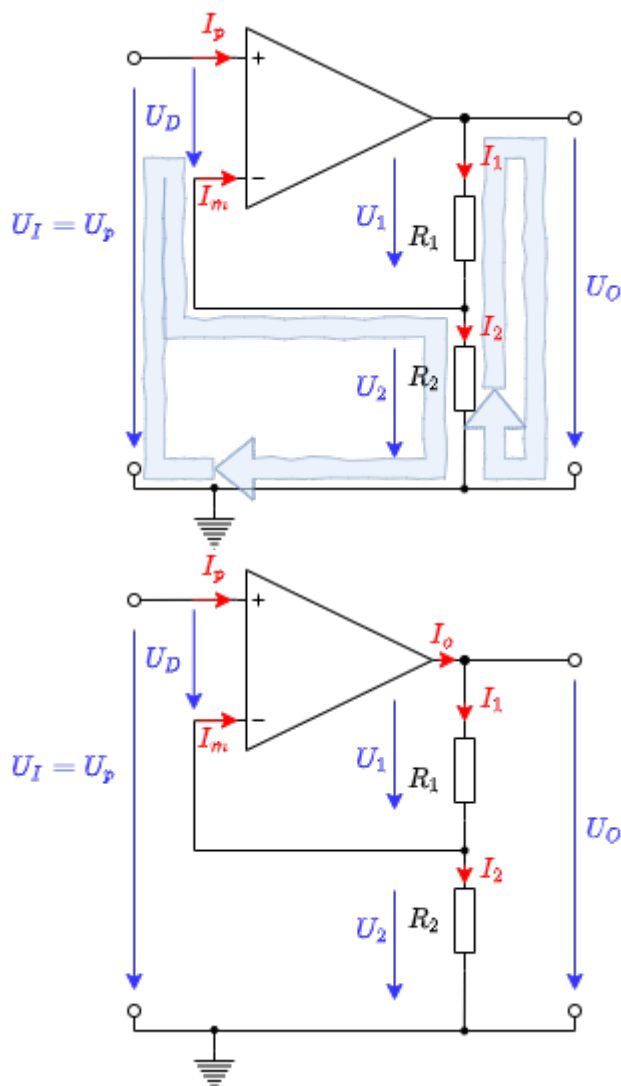
Über die Betrachtung der Rückkopplung kann auch hier das Ergebnis schnell hergeleitet werden: von der Ausgangsspannung U_A wird nur $\frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot U_A$ zurückgeleitet. Der Rückkoppelfaktor ist also $k = \frac{R_2}{R_1+R_2}$ und damit wird die Spannungsverstärkung $A_V = \frac{R_1+R_2}{R_2}$.

Dieser "Trick" über $A_V = \frac{1}{k}$ ist bei einigen der folgenden Schaltungen nicht mehr möglich. Entsprechend soll auch hier eine mögliche Lösung über die Netzwerkanalyse hergeleitet werden.

Exercise 3.4.1 non-inverting amplifier

For the non-inverting amplifier, derive the voltage gain. Use the procedure that was used for the voltage follower..

Fig. 11: Nichtinvertierender Verstärker



Schritt	Beschreibung	Umsetzung
1	Was ist gesucht?	$A_V = \frac{U_A}{U_E} = ?$
2	Zählen der Variablen \$->\$ Anzahl der notwendigen Gleichungen	5 Spannungen + 5 Ströme \$->\$ Anzahl der notwendigen Gleichungen: 10

Schritt	Beschreibung	Umsetzung
3	Aufstellen der Gleichungen	immer nutzbare Gleichungen (1) Grundgleichung: $U_A = A_D \cdot U_D$ Goldene Regeln: $R_D \rightarrow \infty$, damit $(2+3) I_p \rightarrow 0$ und $I_m \rightarrow 0$ $R_A = 0$ $A_D \rightarrow \infty$ Maschen und Knoten (siehe) (4) Masche I: $-U_E + U_D + U_2 = 0$ (5) Masche II: $-U_2 - U_1 + U_A = 0$ (6) Knoten I: $I_o = I_1$ (7) Knoten II / Spannungsteiler: $I_1 - I_2 - I_m = 0$ U, I-Beziehungen über Komponenten (8) Widerstand $R_1 = \frac{U_1}{I_1}$ (9) Widerstand $R_2 = \frac{U_2}{I_2}$

Die Rechnung ist hier noch einmal detailliert durchgeführt (der Klick auf Pfeil nach rechts "►" führt zum nächsten Schritt, [alternative Darstellung](#)):

Die Spannungsverstärkung des nicht invertierenden Verstärkers ist also $A_V = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ bzw. $A_V = 1 + \frac{R_1}{R_2}$. Der Zahlenwert A_V kann also nur größer als 1 werden. In der Simulation rechts ist dies nochmals dargestellt. In realen Schaltungen werden die Widerstände R_1 und R_2 im Bereich zwischen einigen 100Ω und wenigen $M\Omega$ liegen. Ist die Summe der Widerstände zu klein, wird der Operationsverstärker stark belastet. Der Ausgangsstrom darf aber den Maximalstrom nicht überschreiten. Ist die Summe der Widerstände zu groß, kann der Strom $I_1 = I_2$ in den Bereich des Strom I_m kommen, welcher im realen Operationsverstärker vorhanden ist.

Es soll hier auch der **Eingangs- und Ausgangswiderstand der gesamten Schaltung** betrachtet werden. Beide Widerstände werden hier mit einer hochgestellten 0 gekennzeichnet, um diese vom Eingangs- und Ausgangswiderstand des Operationsverstärkers zu unterscheiden. Der Eingangswiderstand R_{E}^0 ist gegeben durch $R_{E}^0 = \frac{U_E}{I_E}$ mit $I_E = I_p$. Für den idealen Operationsverstärker gilt also auch, dass der Eingangswiderstand $R_{E}^0 = \frac{U_E}{I_p} \rightarrow \infty$ wird, wenn $I_p \rightarrow 0$.

Im **realen Fall** ist wichtig, in wiefern der gesamte Eingangswiderstand vom Eingangswiderstand des Operationsverstärkers abhängt $R_{E}^0(R_D)$. Dies lässt sich folgendermaßen ableiten: (der Klick auf Pfeil nach rechts "►" führt zum nächsten Schritt, [alternative Darstellung](#)):

Es lässt sich also vereinfachend mitnehmen, dass der Eingangswiderstand der gesamten Schaltung um ein Vielfaches höher ist, als der des Operationsverstärkers. Der Ausgangswiderstand R_A^0 der gesamten Schaltung mit realen Operationsverstärkern soll nur skizziert werden: In diesem Fall ist der Ausgangswiderstand R_A des Operationsverstärkers parallel zu $R_1 + R_2$. Damit wird der Ausgangswiderstand R_A^0 etwas kleiner sein, als R_A .

Merke: nichtinvertierender Verstärker

Beim nichtinvertierenden Verstärker gilt:

- Die Eingangsspannung U_E liegt am nichtinvertierenden Eingang des Operationsverstärkers
- Die Rückkopplung geschieht über einen Spannungsteiler $R_1 + R_2$
- Die Spannungsverstärkung beträgt $A_V = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ bzw. $A_V = 1 + \frac{R_1}{R_2}$ und ist immer größer als 1
- Sowohl Eingangs- als auch Ausgangswiderstand der Gesamtschaltung sind kleiner als diese beim verwendeten (realen) Operationsverstärker

3.5 Invertierender Verstärker

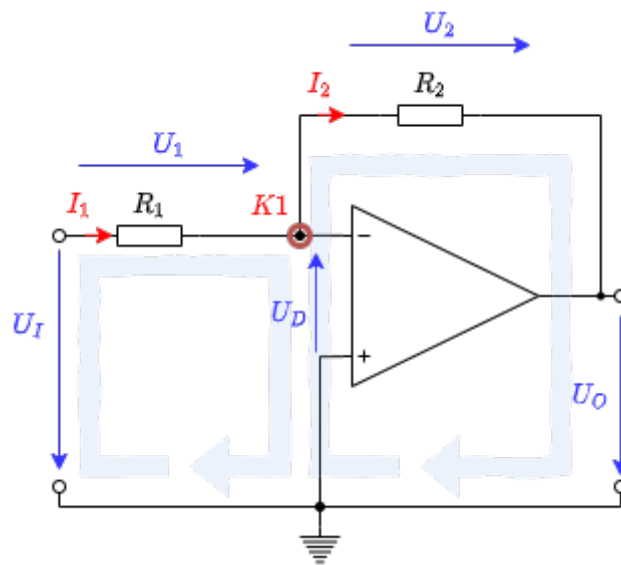
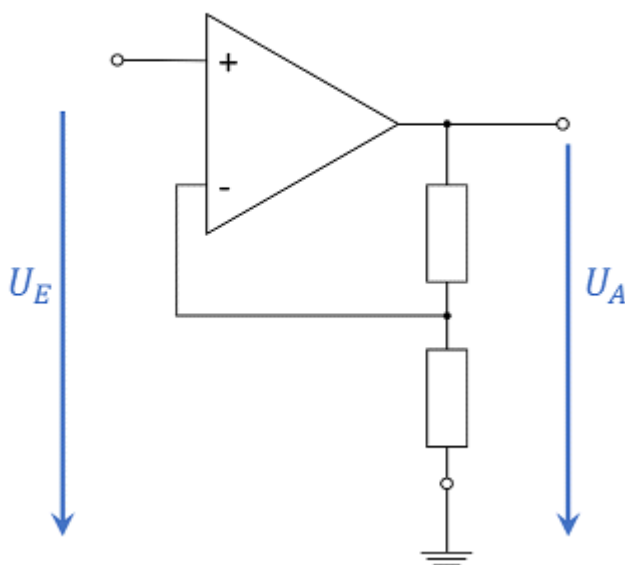


Fig. 12: Invertierender Verstärker



Verstärker zu invertierender Verstärker

Fig. 13: Umwandlung nichtinvertierender

Bei dieser Schaltung wird der Widerstand R_2 auch als Gegenkopplungswiderstand bezeichnet.

Merke: Virtuelle Masse

Beim idealen, rückgekoppelten Verstärker gilt: $U_D \rightarrow 0$. Damit liegt an beiden Eingängen immer die gleiche Spannung an. Ist eine der beiden Spannungen fest vorgegeben, z.B. durch Anschluss von Massepotential oder auch durch eine feste Spannungsquelle, nennt man diese Eigenschaft **virtuelle Masse**.

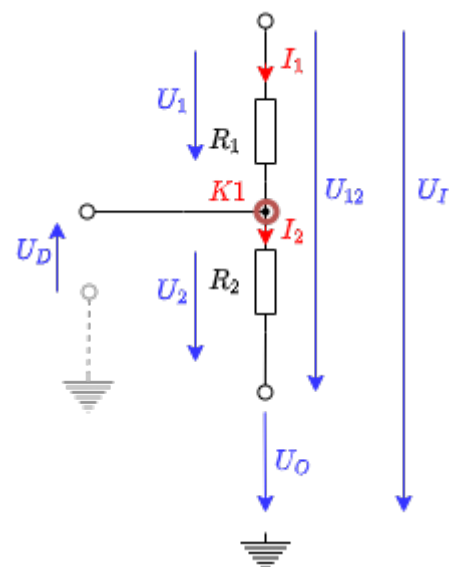


Fig. 14: Spannungsteiler im invertierenden Verstärker

Für die Ermittlung der Spannungsverstärkung scheint hier die Betrachtung der Rückkopplung $A_V = \frac{1}{k}$ zunächst wenig zu bringen. Stattdessen ist aber die Ermittlung über Netzwerkanalyse möglich. [figure 12](#) zeigt dazu eine mögliche Variante die Maschen zu wählen. Die Netzwerkanalyse soll hier jedoch nicht erfolgen, sondern ist als Aufgabe 3.5.1 unten angegeben.

Stattdessen soll hier zwei andere Arten der Herleitung gezeigt werden, um weitere Herangehensweisen näher zu bringen. Für die erste Herleitung wird der **Spannungsteiler** $R_1 + R_2$ betrachtet. Beim unbelasteten Spannungsteiler gilt allgemein:

$$U_2 = U_G \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Diese Gleichung soll nun für die konkrete Verwendung angepasst werden. Zunächst [figure 12](#) lassen sich die Spannungen des Spannungsteilers wie in [figure 14](#) angegeben, ablesen. Daraus ergibt sich mit der allgemeinen Spannungsteiler-Formel:

$$U_2 = (U_E - U_A) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Mit der virtuellen Masse am Knoten $K1$ in [figure 14](#) gilt, dass U_2 von der (virtuellen) Masse wegzeigt und damit betragsmäßig U_A gleicht. Durch die gleiche Argumentation gilt $U_E = U_1$. Es ergibt sich also:

$$-U_A = (U_E - U_A) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Und daraus:

$$\begin{aligned} -U_A &= U_E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ -U_A + U_A \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} &= U_E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ -U_A \cdot \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) &= U_E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ -U_A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} &= U_E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ -U_A &= U_E \cdot \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

Fig. 15: Invertierender Verstärker - Animation

Für zweite Herleitung soll der Stromfluss durch die Widerstände R_1 und R_2 des unbelasteten Spannungsteilers betrachtet werden. Diese beiden Ströme I_1 und I_2 sind gerade gleich. Damit gilt:

$$I_{\boxed{}} = \frac{U_{\boxed{}}}{R_{\boxed{}}} = \text{const.} \quad \text{mit } \boxed{} = \{1, 2\}$$

bzw.

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

Dies lässt sich auch über **ähnliche Dreiecke** in eine "Wippe" bzw. ein mechanisches Analogon umwandeln. Im mechanischen Analogon sind die Potentiale über die Höhe gegeben. Wie im elektrischen Fall mit dem Massepotential muss im mechanischen Bild eine Höhenbezugsebene gewählt werden. Die elektrischen Ströme entsprechen Kräfte (also einem Impulsfluss) - die Betrachtung der Kräfte ist hier aber nicht notwendig. ²⁾

Wird nun eine bestimmte Höhe (Spannung U_E) eingestellt, so ergibt sich über Kraftarm (Widerstand R_1) und Lastarm (Widerstand R_2) eine bestimmte Höhe auf der rechten Seite (Spannung U_A). Dies ist in [figure 15](#) oben dargestellt. In der Abbildung können alle rot markierten Punkte () manipuliert werden. Entsprechend ist die Eingangsspannung $U_E = U_{in}$ einstellbar und ergibt automatisch eine Spannung $U_A = U_{out}$. In der Schaltung (Abbildung unten) können die Widerstände R_1 und R_2 geändert werden.

Der **Eingangswiderstand der gesamten Schaltung** $R_E^0 = \frac{U_E}{I_E}$ ergibt sich leicht aus der Betrachtung der Eingangsseite: Da K_1 auf $0V$ liegt, ist $U_1 = U_E$. Der komplette in den Eingang einfließende Strom durchquert den Widerstand R_1 . Es gilt dann also, dass er Eingangswiderstand $R_E = R_1$ ist. Beim **Ausgangswiderstand der gesamten Schaltung** R_A^0 ergibt sich wieder eine Parallelschaltung zwischen dem Ausgangswiderstand des Operationsverstärkers R_A und dem Widerstand R_2 . Der Ausgangswiderstand wird also etwas kleiner sein als der Ausgangswiderstand des Operationsverstärkers R_A .

Merke: Invertierender Verstärker

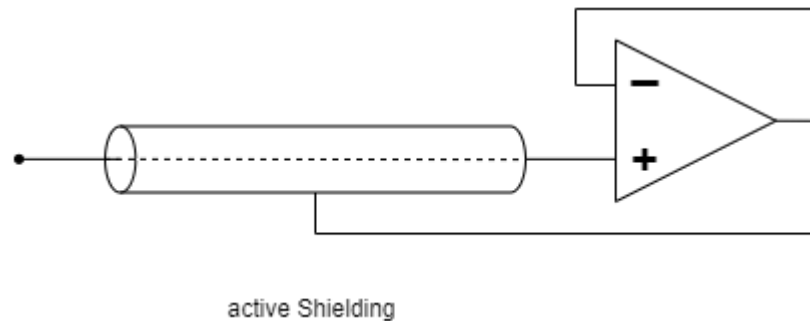
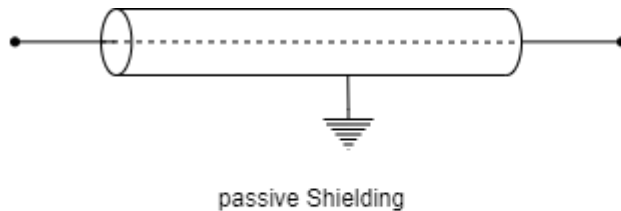
Beim invertierenden Verstärker gilt:

- Die Eingangsspannung U_E liegt am invertierenden Eingang des Operationsverstärkers
- Die Rückkopplung geschieht über einen Spannungsteiler aus R_1 und R_2 .
- Die Spannungsverstärkung beträgt $A_V = -\frac{R_2}{R_1}$ und ist immer kleiner größer als 0. Der Betrag der Spannungsverstärkung kann aber größer oder kleiner als 1 sein.
- Der Eingangswiderstand der Gesamtschaltung sind über R_1 definiert und i.d.R. kleiner als der beim verwendeten (realen) Operationsverstärker. Der Ausgangswiderstand ist kleiner als der beim verwendeten (realen) Operationsverstärker.

Aufgaben

Exercise 3.3.1 Analysis of the impedance converter circuit with different operational amplifiers

Fig. 16: passive and active shielding



Imagine that you work in the company “HHN Mechatronics & Robotics”, which is a cheap mobile **EKG** - So you want to build a measuring device for the electrocardiogram or the cardiac voltage curve - for athletes and those in need. The measurement signal has only a few millivolts and microamps. In order to protect the signal from electromagnetic radiation on the way from the glued-on electrode to the evaluation electronics, a **electromagnetic shielding** placed around the line (see [figure 16](#), above). However, since this creates a parasitic capacitor, a colleague suggested active shielding. The shielding is always kept at the measuring voltage that is applied to the line via a voltage follower (see [figure 16](#), under). The parasitic capacitor is never charged due to this structure, since the same voltage prevails on both sides - there is no falsification of the signal. **It is important for the application that the voltage follower reacts quickly.**

You are supervised with the design of this voltage follower and should use the available operational amplifiers LM318 , uA741 , and uA776 analyze in the voltage follower circuit.

Write a short report (problem description, circuit in TINA TI, results, discussion) and use TINA TI for the solution.

1. Recreate the circuit described above for a realistic operational amplifier in Tina. Use a voltage generator as a source **unit step** with the amplitude $U_A = 1.0 \text{ V}$.
2. Simulate over Analysis»Transient... the time course for the specified operational amplifiers.
Determine the time that elapses until the initial value of 0.1 V for the first time 0.9 V achieved (10% to 90% of the amplitude, too. It is called **rise time**).
3. Describe the passage of time in each case. Are there any other differences besides the rise time?
4. Based on the information provided, which of the three op amps would you choose for the problem?

In-depth information (not relevant to the exercise):

- Paper [on the Stability of Shield-Driven Circuits](#)
- Detailed description of a [EMG/EKG Vorverstärkerschaltung](#)

Exercise 3.3.2 Additional task to 3.3.1

In this exercise, the same question should be assumed as in exercise 3.3.1. This time, however, the influence of the impedance converter on the sensor signal is to be analyzed. The signal curve of the ECG voltage must be simulated by the voltage source. To do this, select **Piecewise linear** (3rd from the right) as the voltage source and use the curve below.

In addition, the influence on the current (= output resistor of the sensor) must be taken into account. To do this, insert a resistor with $20 \text{ M}\Omega$ directly in front of the non-inverting inputs.

Instruction

```

120ms, 0
160ms, 0.1m
200ms, 0
260ms, 0
270ms, -0.2m
320ms, 1m
340ms, -0.3m
350ms, 0
440ms, 0
520ms, 0.1m
600ms, 0
820ms, 0
860ms, 0.1m
900ms, 0
960ms, 0
970ms, -0.2m
1020ms, 1m
1040ms, -0.3m
1050ms, 0
1140ms, 0
1220ms, 0.1m
1300ms, 0
1400ms, 0

```

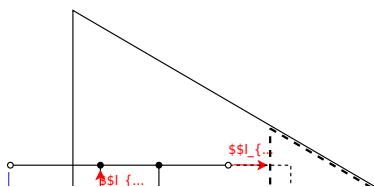
1. Now simulate the time course for 0 s to 2 s with "Use initial conditions".
2. What is the only difference in the output signals? (note y-axis)
3. For a more realistic operational amplifier, 3 additional current sources and an additional voltage source must be taken into account in the equivalent circuit diagram (see [figure 17](#)). In Tina, the values of these current sources can be viewed in the specifications of the simulated operational amplifier (double click on the OPV in **Circuit » Type... » Model Parameters**). The analysis of the entire circuit (including

the equivalent circuit diagram) is not to be considered here. It is assumed that the “input bias current” of the operational amplifier is the decisive value.

Compare the values of the different operational amplifiers.

4. To simplify matters, think about the additional input voltage that results from the current of a single bias current source at the sensor resistor.

Fig. 17: real OPV



Excercise 3.3.3 Use of amplifiers in microcontrollers

In the Application Notes [MTP3132](#) from the manufacturer Microchip, a block diagram is given on the 2nd page, which explains the use of the operational amplifier module of various PIC controllers.

1. The logic input signal “ UG ” is shown in the block diagram. What happens in the logic circuit when it takes the value TRUE?
2. Which operational amplifier circuit does this set?
3. For what purpose is this adjusted op amp circuit used?
4. The microcontroller [PIC16F527](#) uses the explained op amp: in the microcontroller are 2 op amps OP1 and OP2 . at which pin of the microcontroller can these be found?

Exercise 3.4.2 Input resistor of feedback systems

In chapter 3.4.2 the output resistance of the non-inverting amplifier was calculated. Determine the ratio between the input resistance in the same way $R_{\text{i,cl}}$ a closed-loop amplifier circuit and the open-loop input resistance $R_{\text{i,ol}}$.

Exercise 3.5.1 inverting amplifier

1. Derive the voltage gain $A_{\text{V}} = \frac{U_{\text{O}}}{U_{\text{I}}}$ for the inverting amplifier.

Use the procedure that was used for the non-inverting amplifier.

- What is looking for?
- Number of variables?
- Number of necessary equations?
- Establishing the known equations
- Derivation of the voltage gain

Take into account that for the differential gain A_{D} of the ideal OPV applies: $A_{\text{D}} \rightarrow \infty$. And the following also applies: $1/A_{\text{D}} \rightarrow 0$

But the following doesn't always apply: $\frac{C}{U_{\text{x}} \cdot A_{\text{D}}} \rightarrow 0$, for an unknown constant C and a voltage U_{x} !

2. Which type of amplifier circuit (inverting or non-inverting amplifier) has the lower input resistance? Why?

Exercise 3.5.2. Variations of the non-inverting amplifier

Below you will find circuits with an ideal operational amplifier, which are similar to the non-inverting amplifier and whose voltage gain A_V must be determined.

Assumptions

- $R_1 = R_3 = R_4 = R$
- $R_2 = 2 \cdot R$
- U_I comes from a low-resistance source
- U_O is due to a high-resistance consumer

Exercises

1. Enter the voltage gain A_V for each circuit. A detailed calculation as before is not necessary.
2. For Figure 7, indicate how the voltage gain can be determined.
3. Generalize with the following justifications:
 1. How has a short circuit of the two OPV inputs must be taken into account?
 2. How do resistances have to be considered in the following cases:
 1. with one terminal (so "one connector") directly and exclusively on an OPV input,
 2. with both terminals each directly connected to an OPV input.
4. In which circuits do resistors R_3 and R_4 represent an unloaded voltage divider?

To approach the problems, you should try to use the knowledge from the inverting amplifier. It can be useful to simulate the circuits via [Falstad-Circuit](#) or Tina TI. In the first two circuits, tips can be seen under the illustration as support.

Important: As always in your studies, you should try to generalize the knowledge gained from the task.

Tipps

- How big is the current flow into the inverting and non-inverting input of an ideal operational amplifier? So what voltage drop would there be across a resistor whose one connection only leads to one input of the operational amplifier (R_3)?
- The operational amplifier always tries to output as much current at the output that the required minimum voltage U_D results between the inverting and non-inverting input. How high can U_D be assumed? Can this voltage also be built up via a resistor (R_4)?
- Can different resistors (e.g. because they are between the same nodes) be combined?

Abb. 1

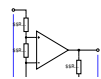


Abb. 2

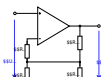


Abb. 3

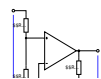


Abb. 4

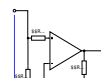


Abb. 5

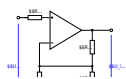


Abb. 6

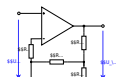


Abb. 7

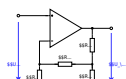


Abb. 8

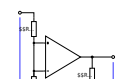
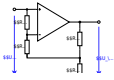


Abb. 9



Exercise 3.5.3. R-2R conductor



Abbildung 1

You work in the company “HHN Mechatronics & Robotics”, which is supposed to build a battery model for a customer. This model is intended to replicate a real battery. For this purpose, a voltage is to be output which is specified by a software model of the battery. A digital-to-analog converter (DAC) is therefore required.

You have found the DAC7741 for this. On [page 12](#) of the datasheet you can see an image of the internal structure - this is similar to the illustration on the right. For an error analysis, you now want to understand this structure in more detail.

In the drawing on the right, the current switch position stands for 000b, so all switches $\text{SW}_1 \dots \text{SW}_3$ are switched to ground. It is advisable to recreate the circuit in the [Falstad-Circuit](#) for a better understanding. In this case, it is advisable to measure the individual node voltages $K_1 \dots K_3$ as well.

1. $\text{SW}_3 = 1$, $\text{SW}_2 = 0$ and $\text{SW}_1 = 0$ should now apply initially - that is, only switch SW_3 is switched to U_{logic} .
 1. To do this, draw the equivalent circuit diagram without a switch.
 2. Simplify this equivalent circuit using an equivalent resistor.
 3. The result is a resistance that lies between the inverting and non-inverting input. The operational amplifier always tries to feed so much current into the resistor network surrounding it that a small differential voltage U_D results. This is also possible with a (not too small) resistance between the inverting and non-inverting input.
So what is the gain?
2. $\text{SW}_3 = 0$, $\text{SW}_2 = 1$ und $\text{SW}_1 = 0$ should now apply initially - that is, only switch SW_2 is switched to U_{logic} .
 1. Here, too, draw the equivalent circuit diagram without a switch.
 2. Simplify this equivalent circuit using equivalent resistors.
 3. The statement about the above-mentioned resistance between the inverting and non-inverting input also applies here. You should also be aware of the voltage of node K_3 .

Now draw an equivalent circuit diagram of the left, taking the voltage at the node K_3 of the ideal amplifier.

4. Now determine the voltage at node K_2 .
5. This voltage at node K_2 is the output voltage of an inverting amplifier, which starts from node K_2 to the right. Now calculate the gain of the resulting network.
3. The concept should be understood by now. Now specify which input / which switch specifies the [LSB](#).

Exercise 3.5.4. Conversion of a unipolar signal into a bipolar signal

You work in the company “HHN Mechatronics & Robotics” and are supposed to generate a bipolar signal ($-10 \text{ V} \dots +10 \text{ V}$) from a unipolar signal of a digital-to-analog converter ($0 \dots 5 \text{ V}$) in a project. A colleague recommended the circuit shown on the right.

1. First, analyze what change is made by pressing the switch S . How does the output signal change?
2. Try to determine mathematically the relationship of U_{O} and U_{I} as $U_{\text{O}}(U_{\text{I}})$ by superposition.
3. The circuit still has the problem that for a positive half-wave the output is still negative. Which additional circuit must be provided so that this problem can be solved?

Lernfragen

- Erklären Sie den Unterschied zwischen unipolarer und bipolarer Spannungsversorgung eines OPV.
- Zeichnen Sie eine Skizze für bipolarer und eine für unipolare Spannungsversorgung.
- Welche Vor- und Nachteile haben uni- und bipolare Versorgung bei OPV?
- Was bedeutet “virtuelle Masse”? Unter welchen Umständen ist diese in Operationsverstärker-Schaltungen zu finden?
- Wie lauten die goldenen Regeln bei gegengekoppelten Verstärkerschaltungen?
- Wie lautet die Grundgleichung bei gegengekoppelten Verstärkerschaltungen?
- Wofür werden Impedanzwandler eingesetzt?
- Wie verhält sich die Eingangsspannung zu der Ausgangsspannung bei einem Impedanzwandler und warum?
- Was bedeutet „Spannungsfolger“ im Zusammenhang mit Operationsverstärkern und was sind die Eigenschaften des Spannungsfolgers?

Referenzen zu den genutzten Medien

Element	Lizenz	Link
figure 4: Bild mit internem Operationsverstärker	(c) Microchip	http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/90003132a.pdf

<--

¹⁾ “transmitter und receiver”, also Sender-Empfänger, bzw. Schnittstellenadapter

²⁾ Um das mechanische Analogon des Aufbaus zu komplettieren, kann man annehmen, dass es eine äußere “Kraftquelle” gibt. Dieser agiert stets so, dass er dem der virtuellen Masse entsprechenden Punkt immer auf der Höhenbezugsfläche landet.

From:

<https://first.mexle.te.hs-heilbronn.de/> - **MEXLE Wiki**

Permanent link:

https://first.mexle.te.hs-heilbronn.de/circuit_design/3_opamp_basic_circuits_i?rev=1632348574

Last update: **2021/09/23 00:09**

