

## Grundschaltungen des Operationsverstärkers (Ausarbeitung)

### Vorbetrachtungen:

Um die Grundschaltungen des OPV zu verstehen sind einige wichtige Vorbetrachtungen von Nöten. Es soll zunächst auf die grundsätzlichen Eigenschaften des OPV eingegangen werden. Anschließend werden die unterschiedlichen Betriebsarten des OPV vorgestellt und es werden die Arten der Rückkopplung betrachtet.

Ein Operationsverstärker soll folgende Eigenschaften haben:

- Eine sehr hohe Leerlaufverstärkung für vielseitige Einsetzbarkeit
- Eine sehr hohe Gleichtaktunterdrückung für eine reine Differenzverstärkung
- Ein sehr hoher Eingangswiderstand so wie ein sehr niedriger Ausgangswiderstand für eine Entkoppelung des Signals vor und nach dem OPV
- So gut wie keine Ruheströme, Rückwirkungen, Offset- oder Driftgrößen

Anmerkung:

Im folgenden Referat werden alle Operationsverstärker als ideal (vgl. Folie 1) angesehen.

Betriebsarten des OPV (vgl. Folie 2):

Ein Operationsverstärker hat im Wesentlichen 4 verschiedene Betriebsarten:

- Der nichtinvertierende Betrieb:  
Am Plus-Eingang liegt das Signal, am Minus-Eingang liegt die Masse
- Der invertierende Betrieb:  
Am Minus-Eingang liegt das Signal, am Plus-Eingang liegt die Masse  
(=> Der OPV invertiert das Signal)
- Der Differenzbetrieb:  
Beide Eingänge führen ein Signal, die Differenz der beiden kommt zur Geltung  
(=> Die Eingänge werden verglichen)
- Der Gleichtaktbetrieb:  
Beide Eingänge führen das selbe Signal  
(=> innere Verhältnisse des OPV bestimmen Ausgang)

Arten der Rückkopplung (vgl. Folie2):

Operationsverstärker werden meist mit Rückkopplung betrieben. Man unterscheidet zwischen Gegenkopplungen und Mitkopplungen.

Eine der häufigsten Gegenkopplungsarten ist die spannungsgesteuerte Spannungsgegenkopplung (vgl. Folie 3, nichtinvertierender Verstärker). Von der Ausgangsspannung wird hierbei über einen Spannungsteiler eine Teilspannung auf den Eingang(-) zurückgelegt. Dadurch wird dem Eingangssignal ein Signal entgegengesetzt, dass die eigentliche Differenzspannung zwischen Plus- und Minus-Eingang vermindert wird und eine kontrollierte Verstärkung möglich ist.

Ein anderes Beispiel einer Gegenkopplung wäre die spannungsgesteuerte Stromgegenkopplung (vgl. Folie 3, invertierender Verstärker). Statt einer Teilspannung, wie es beim nichtinvertierenden Verstärker der Fall ist, wird hier vom Ausgang ein Teilstrom abgegriffen. Dieser Strom wird nun auf den Minus-Eingang zurückgelegt, wo er dem Strom des durch den vorgeschalteten Widerstands auf kontrollierende Weise entgegenwirkt. Da die Signalspannung am Minus-Eingang liegt, hat diese Schaltung einen invertierend verstärkenden Charakter.

Des Weiteren existieren als Gegenkopplungen noch die stromgesteuerte Spannungsgegenkopplung und die stromgesteuerte Stromgegenkopplung, auf diese hier nicht weiter eingegangen wird.

Ein Beispiel für eine Mitkopplung ist die spannungsgesteuerte Strommitkopplung (vgl. Folie 5, Schmitt-Trigger). Charakteristisch für die Mitkopplung ist die Rückführung des Ausgangssignals auf den Eingang, der das Signal ohnehin schon führt. Diese Art von Schaltungen haben zur Folge, dass das Ausgangssignal immer im Sättigungsbereich des OPVs liegt, sprich dessen maximale Verstärkung realisiert. OPV-Mitkopplungen dienen demnach meist als Komparatorschaltungen. Es wird hierauf später noch einmal eingegangen.

Nach dem nun die wichtigsten Charakteristika des OPV in der Form einer Vorbetrachtung angesprochen wurden, können nun einige Grundschaltungen betrachtet werden.

### **Grundschaltungen:**

Operationsverstärker sind als universell einsetzbare Bauelemente für die Analogtechnik entwickelt worden und sind deshalb in den unterschiedlichsten Analog-Schaltungsarten zu finden.

Zunächst können OPVs prinzipiell als einfache Signalverstärker verwendet werden, aber auch analoge Rechenschaltungen wie Addierer oder Subtrahierer arbeiten mit OPVs. Außerdem können mit Operationsverstärkern Signale bearbeitet oder aufbereitet werden (z. B. Integrieren, Differenzieren). Zuletzt hat man auch Verwendung für die Nichtlinearität der OPVs gefunden.

Es werden nun folgende Schaltungen genauer betrachtet:

OPV als Verstärker:

- Invertierender Verstärker (vgl. Folie 3)
- Nichtinvertierender Verstärker (vgl. Folie 3)

Analoge Rechenschaltungen:

- Addierer (vgl. Folie 4)

Signalaufbereitung:

- Integrierer (vgl. Folie 4)

Nichtlineare Schaltungen:

- Schmitt-Trigger (vgl. Folie 5)

### **Invertierender Verstärker:**

(s. Folie 3)

Die prinzipielle Funktionsweise des invertierenden Verstärkers ist im Wesentlichen schon bei der spannungsgesteuerten Stromrückkopplung erläutert worden. Ein Strom wird vom

Ausgang auf den invertierenden Eingang, der das Signal führt, zurückgekoppelt. Der Plus-Eingang liegt hierbei auf Masse. Die exakte Spannungsverstärkung kann folgendermaßen berechnet werden:

Die Spannungsverstärkung  $V_u$  ist der Quotient aus Ausgangsspannung und Eingangsspannung.:

$$V_u = \frac{u_a}{u_e}$$

Für die Bestimmung von  $u_a$  und  $u_e$  nimmt man an, dass die Differenzspannung  $u_n$  durch die Gegenkopplung keinen wesentlichen Betrag hat, also „0“ ist. Das bedeutet, die beiden Eingänge werden auf Masse gelegt. Die Eingangsspannung ist also nichts anderes als die Spannung, die über  $Z_0$  anliegt, während die Ausgangsspannung allein von  $Z_1$  bestimmt wird. Für die Verstärkung ist zu beachten, dass diese ein negatives Vorzeichen erhält, da das Signal vom Minus-Eingang auf den Ausgang übertragen, also invertiert wird. Somit erhält man für die Verstärkung:

$$V_u = \frac{u_a}{u_e} = -\frac{Z_1}{Z_0}$$

Anmerkung:

Der invertierende Verstärker ist in seinem Verstärkungsverhalten sehr flexibel, da auch der Faktor 1 oder kleiner erzielt werden kann. Dennoch kann als nachteilhaft bezeichnet werden, dass dessen Eingangswiderstand  $r_e$  verhältnismäßig klein ist, da dieser durch  $Z_0$  charakterisiert ist.

### **Nichtinvertierender Verstärker:**

(s. Folie 3)

Wie schon im oberen Teil erläutert, ist ein nichtinvertierender Verstärker nichts anderes als ein OPV, der spannungsgesteuert spannungsgegenggekoppelt ist. Das Signal liegt hierbei auf dem Plus-Eingang, die Gegenkopplung erfolgt auf den Minus-Eingang. Die exakte Spannungsverstärkung kann folgendermaßen berechnet werden:

$$V_u = \frac{u_a}{u_e}$$

Wie beim invertierenden Verstärker legen wir aufgrund der Gegenkopplung die Spannung zwischen Plus-Eingang und Minus-Eingang auf das selbe Potential., das heißt,  $u_d$  ist „0“. Dadurch wird die Anschauung deutlich vereinfacht und man sieht sofort, dass  $u_e$  über  $Z_2$  anliegt und  $u_a$  über  $Z_1$  und  $Z_2$ . Somit erhält man für die Verstärkung:

$$V_u = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}$$

Anmerkung:

Der nichtinvertierende Verstärker hat im Gegensatz zum invertierenden Verstärker einen sehr großen Eingangswiderstand, was ihn zugleich zum Impedanzwandler macht und er sich somit zum Koppeln von Schaltungsstufen sehr eignet. Nachteilhaft ist sein Verstärkungsvermögen, da er mindestens immer eine Verstärkung von 1 aufweist.

### **Addierer:**

(s. Folie 4)

Das Ziel eines Addierers ist zunächst, aus beliebig vielen einzelnen Spannungsverläufen eine Ausgangsspannung zu bilden, die die Summe der Einzelspannungen darstellt.

Sieht man sich das Schaltbild des Umkehraddierers an, so stellt man fest, dass dieser dem prinzipiellen Aufbau eines invertierenden Verstärkers sehr ähnelt. Und tatsächlich ist dieser nichts anderes, mit dem Unterschied, dass die Eingangsspannung am OPV sich aus mehreren Spannungen zusammenfügt. Der Summenpunkt S ist der Knoten, in dem sich die Signale in Form von Strömen addieren, die durch die Widerstände  $R_{01}$  bis  $R_{0n}$  zustandekommen. Nimmt man sich ein einzelnes Signal am Eingang heraus, so gilt beim Ausgang wie beim invertierenden Verstärker:

$$u_a = -\frac{R_1}{R_{01}} \cdot u_{e1}$$

Für die Gesamtspannung am Ausgang gilt folglich:

$$-u_a = \frac{R_1}{R_{01}} \cdot u_{e1} + \frac{R_1}{R_{02}} \cdot u_{e2} + \dots + \frac{R_1}{R_{0n}} \cdot u_{en}$$

Anmerkung:

Der dargestellte Umkehraddierer ist nicht nur ein Addierer im wörtlichen Sinne, er dient zudem als invertierender Verstärker, wie aus der Herleitung zu erkennen ist.

### Integrierer:

(s. Folie 4)

Wie der Addierer, so basiert auch der Integrierer auf dem invertierenden Verstärker, obwohl dessen Funktionsweise grundlegend von diesem verschieden ist. Wie der Name schon sagt, soll diese Schaltung integrieren, was ohne Zweifel durch ein R-C-Glied möglich ist.

Beim invertierenden Verstärker wurde, um das Übertragungsverhalten von Ein- zu Ausgang zu untersuchen, die Differenzspannung gleich „0“ gesetzt. Bei der Integriererschaltung empfiehlt es sich aber, mit Strömen zu argumentieren, welche bei den OPV-Eingängen ebenfalls beide „0“ sind, geht man von einem idealen OPV aus. Somit würden sich die Ströme  $i_0$  und  $i_1$  kompensieren:

$$i_0 + i_1 = 0$$

Dabei gilt:  $i_0 = \frac{u_e}{R_0}$  und  $i_1 = C_1 \cdot \frac{du_a}{dt}$

Eingesetzt in den Stromansatz erhält man:

$$\frac{u_e}{R_0} + C_1 \cdot \frac{du_a}{dt} = 0$$

Daraus ergibt sich nach der Umstellung für die Ausgangsspannung:

$$u_a = -\frac{1}{R_0 \cdot C_1} \int u_e dt + U_{a0}$$

Dabei ist  $U_{a0}$  die Integrationskonstante, die die Ausgangsspannung zum Zeitpunkt  $t = 0$  darstellt.

Dabei kann man den Faktor  $\frac{1}{R_0 C_1}$  als Grenzfrequenz  $\omega$  bezeichnen.

Anmerkung:

An der Formel für die Ausgangsspannung ist eindeutig die Integratorfunktion der Schaltung zu erkennen. Das Signal wird hierbei wieder invertiert. Vertauscht man den Widerstand und die Spule, so hat man einen Differenzierer, was unschwer nachzuvollziehen ist.

## **Schmitt-Trigger:**

(s. Folie 5)

Anmerkung:

Da genaue und quantitative Aussagen über den Schmitt-Trigger den Rahmen dieses Kurzreferates sprengen würden, seien hier nur die wichtigsten Eigenschaften qualitativ erwähnt.

Der Schmitt-Trigger ist eine Sonderform des Komparators. Ein Komparator, das sei hier kurz erwähnt, ist eine OPV-Schaltung, die die beiden Eingänge des OPV vergleicht, und das Differenz-Signal, sei es positiv oder negativ, auf einen bestimmten Referenzwert verstärkt (, welcher meist durch die Betriebsspannung gegeben ist). Dadurch ergeben sich am Ausgang ausschließlich zwei unterschiedliche Werte. Dies kann erreicht werden, indem man den OPV schlicht und einfach nicht gegenkoppelt (einfacher Komparator) oder mitkoppelt (z.B. Schmitt-Trigger). Man macht hier Gebrauch von der sehr großen Grundverstärkung des Operationsverstärkers, welche das Eingangssignal alles andere als linear zum Ausgang führt. Wie beim Komparator liefert der Schmitt-Trigger am Ausgang nur zwei Werte, einen Maximalwert und einen Minimalwert. Der Unterschied liegt jedoch beim Eingangssignal. Die Mitkopplung eines Widerstandes auf den Plus-Eingang des OPVs hat einerseits die Wirkung einer noch höheren Verstärkung, andererseits lässt sich mit der Widerstandskombination  $R_I$  und  $R_O$  ein Schwellwert einstellen, der unterschiedlich ist von null, wie er es beim Komparator ist. Der Schwellwert (oder Schaltpegel) ist diejenige Differenzeingangsspannung, die den Komparator vom einen Ausgangswert auf den anderen umspringen lässt. Folglich reagiert der OPV erst, wenn ein bestimmter positiver bzw. negativer Wert (Schwellwert), am Eingang anliegt und diesen auf den maximalen bzw. minimalen Referenzwert bringt. Diese Verzögerung kann auch in einem Hysteresediagramm dargestellt werden.

Die beiden Schwellwerte der gegebenen Schaltung errechnen sich folgendermaßen:

Schwellwert 1: 
$$U_{el} = -\frac{R_0}{R_1} \cdot U_{A \max}$$

Schwellwert 2: 
$$U_{eII} = -\frac{R_0}{R_1} \cdot U_{A \min}$$

## **Zusammenfassung:**

Operationsverstärker sind die ultimativen Bauelemente in der analogen Schaltungstechnik. Die dargestellten Beispielschaltung stellen nur einen kleinen Bruchteil von dem dar, was tatsächlich mit OPVs möglich ist.