

## Slew Rate und Bandbreite des Op-Amp

### 1. Slew Rate

Die Spannungsanstiegsrate (engl. *slew rate SR*) kennzeichnet die maximal mögliche zeitliche Spannungsänderung des OP-Ausgangs. Sie wird grosser Ausgangsamplitude eines OPs festgelegt. Bei dieser so genannten Großsignalaussteuerung wird der OP nicht wie bei der Kleinsignalaussteuerung im linearen Bereich betrieben, sondern bis an die Übersteuerungsgrenzen ausgesteuert und auch in Sättigung getrieben. Die Spannungsanstiegsrate wird meistens in  $V/\mu s$  angegeben und bewegt sich bei

- Standard-OPs (z. B. *LM741*) zwischen  $0,1 V/\mu s$  und  $10 V/\mu s$
- Highspeed-OPs (z. B. *TL081*, *AD8000*) zwischen  $10 V/\mu s$  und  $5000 V/\mu s$

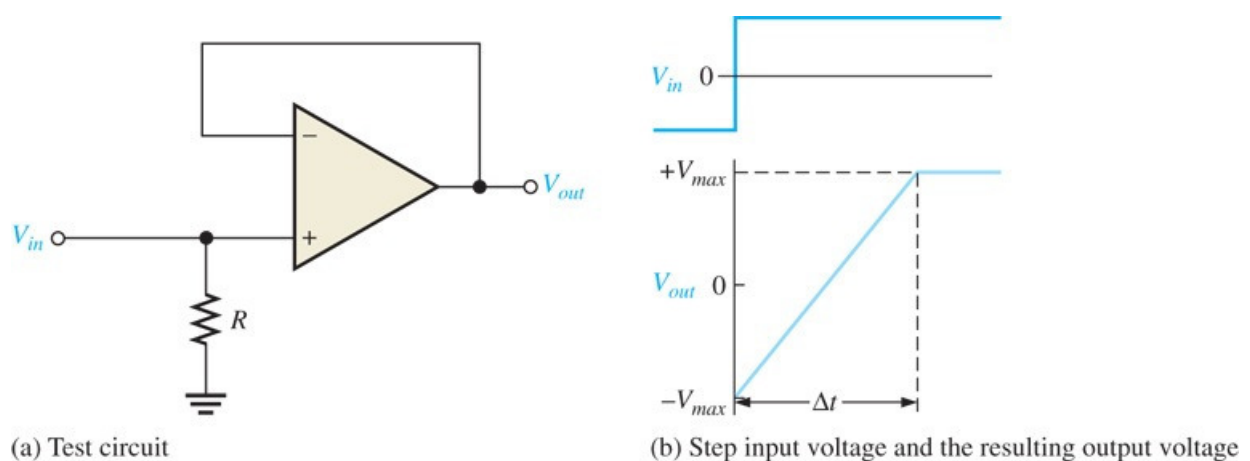


Fig.1: Testschaltung zur Messung der Slew Rate

Integrierte OPs bestehen aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Stufen und Schaltungsteilen, um verschiedene Anforderungen erfüllen zu können. Trotzdem lassen sich alle diese unterschiedlichen Varianten im wesentlichen auf drei Schaltungsteile reduzieren, wie in unten Abbildung dargestellt:

- Ein differentieller Eingang, im Schaltbild als gelber (links) Bereich dargestellt. Dieser Teil besteht aus einem Differenzverstärker mit den beiden Eingängen, im oberen Bereich dargestellt, und einer Konstantstromquelle im unteren Bereich. Der Differenzverstärker wandelt kleine Spannungsdifferenzen in einen **proportionalen Ausgangsstrom** um. Bei einem herkömmlichen OP stellt diese Stufe auch den hohen Eingangswiderstand sicher. Die Eingangstransistoren können je nach Technologie Bipolartransistoren, MOSFETs oder JFETs sein.

- Eine Verstärkerstufe, rot (mitte) hinterlegt, die den kleinen **Eingangstrom von der Eingangsstufe in eine hohe Ausgangsspannung umsetzt**. Die hohe Verstärkung des OPs resultiert überwiegend aus dieser Stufe. Der in der Stufe zur internen frequenzabhängigen Gegenkopplung eingezeichnete Kondensator (typ. einige bis einige 10 pF) sorgt ab einer bestimmten Frequenz für einen gleichmäßigen Abfall der Verstärkung reziprok zu der Frequenz. Diese interne Gegenkopplung ist notwendig, um die Stabilität des Operationsverstärkers mit einer externen Gegenkopplung zu gewährleisten, wie im Stabilitätskriterium von Nyquist gefordert.
- Eine Ausgangsstufe, blau (rechts) hinterlegt. Diese Stufe ist oft als Gegentaktstufe (engl. *push-pull*) realisiert und hat im Gegensatz zu den beiden vorherigen Stufen **keine Spannungsverstärkung**. Sie dient als Stromtreiber für den Ausgang, besitzt einen kleinen Ausgangswiderstand und ermöglicht so einen hohen Ausgangsstrom.

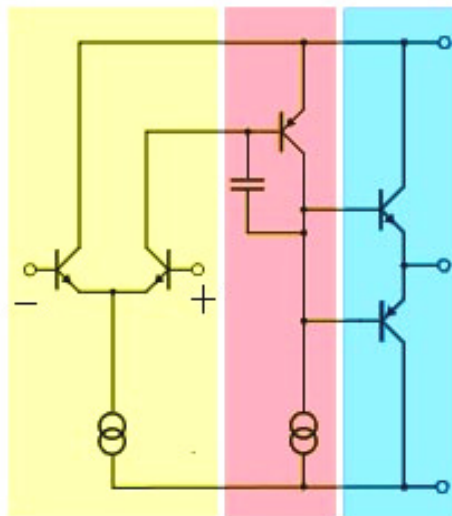


Fig.2: Vereinfachtes OpAmp-Schaltbild mit internem Kondensator zur Stabilisierung

Ursachen für die endliche Spannungsanstiegsrate sind der maximale Ausgangsstrom (typ.  $\ll 1 \text{ mA}$ ) der differentiellen Spannungsverstärkungsstufe und die Eingangskapazität der mittleren Stufe ( $I = C \, du/dt$ ).

Die erste Stufe kann nur einen bestimmten maximalen Ausgangsstrom  $I_{\max}$  liefern. Dieser Strom lädt den Kondensator  $C$  mit maximaler aber begrenzter Geschwindigkeit auf, vergleichbar mit einem Integrator. Dies hat zur Folge, dass die Ausgangsspannung des OpAmps nun linear ansteigt, bis der Fehler am Eingang klein genug ist, um einen Strom  $< I_{\max}$  zu erzeugen und der Ausgang sich in linearer Weise auf den Sollwert einpegelt (Kleinsignal).

Liegt am OpAmp ein sinusförmiges Signal mit der Amplitude  $V$  und der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  an, so ist die Steigung der Signalform im Nulldurchgang am grössten und am Ausgang gemessen gleich:

$$\frac{dv_0}{dt} = V \cdot \omega$$

Andrerseits kann der OpAmp seinen Ausgang mit maximal der Slew Rate  $SR$  verändern:

$$\frac{dv_0}{dt} = \pm \frac{I_{\max}}{C} = SR$$

Es folgt somit für Sinussignale:

Mit der gewünschten Amplitude  $V$  am Ausgang des OpAmp können nur Signale verarbeitet werden bis zu einer Frequenz von:

$$f_s \leq \frac{SR}{2\pi \cdot V}$$

Die Frequenz  $f_s$  nennt man Grosssignal-Bandbreite, auch Large Signal Bandwidth, weil es der Bandbreite entspricht, die man für grosse Amplituden, meist nahezu Vollaussteuerung, erreichen kann. Dies ist also dann relevant, wenn Leistung am Ausgang gefragt ist und man bezeichnet dies oft auch mit dem Begriff Power Bandwidth.

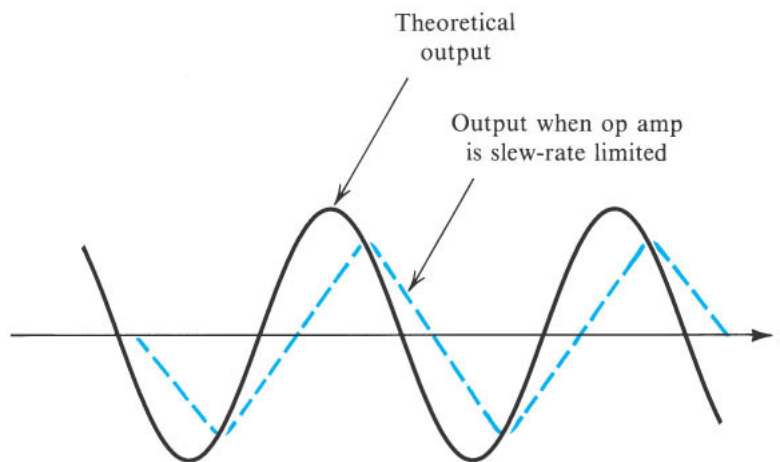


Fig.3: Extremer Fall von Slew Rate Verzerrung

Wegen dem internen Kondensator eignet sich übrigens der OpAmp auch nicht als Komparator. Besonders bei kleinen Signaldifferenzen am Eingang kann der dadurch in der ersten Stufe erzeugte kleine Strom den Kondensator nur langsam laden. Der Kippvorgang wird dadurch stark in die Länge gezogen. Bei Ultra-Low Power OpAmps mit einem Stromverbrauch im  $\mu\text{A}$ -Bereich und Bandbreiten von einigen kHz ist von einer Verwendung als Komparator speziell abzuraten. Komparatoren auf der anderen Seite brauchen den Kondensator nicht, da sie nicht stabilisiert werden müssen.

## 2. Kleinsignal-Bandbreite (GBP)

Für Kleinsignale gibt es bekanntlich auch eine Bandbegrenzung. Die offene Verstärkung des OpAmp (open loop gain) besitzt den Frequenzgang mit der DC-Verstärkung  $A_{ol}$  und mit einer Grenzfrequenz  $f_{c(ol)}$ . Wird der OpAmp als nichtinvertierender Verstärker beschaltet mit der gewünschten Verstärkung  $A_{cl}$ , so ist die erzielbare Bandbreite durch den OpAmp mitbestimmt. Man kann vereinfacht die Bandbreite  $f_{c(cl)}$  aus dem Gain-Bandwidth-Product GBP, bzw. der Transitfrequenz  $f_T$  (auch Unity Gain Bandwidth genannt) errechnen.

$$GBP = f_T = A_{cl} \cdot f_{c(cl)}$$

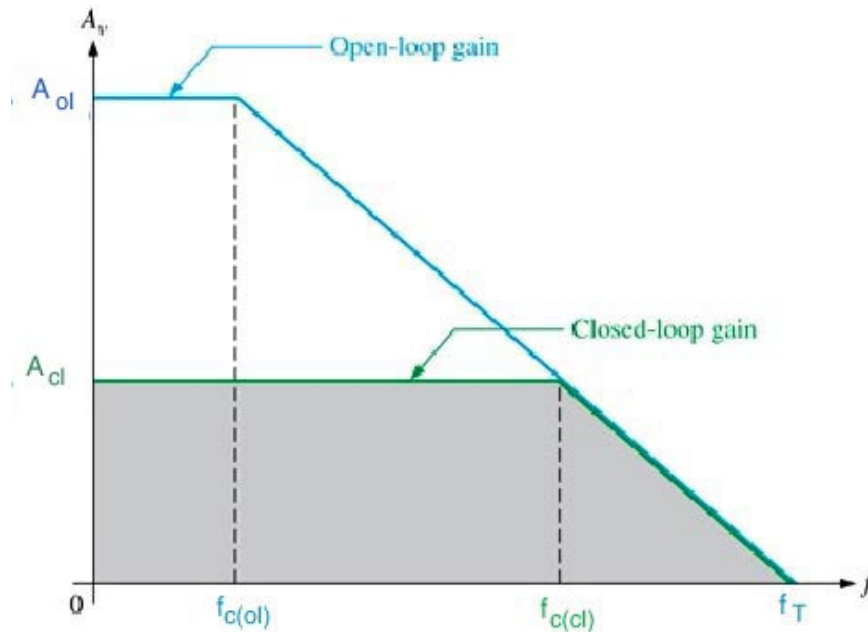


Fig.4: Log-Log Darstellung des Open-Loop (ol) und Closed-Loop (cl) Frequenzgangs für Kleinsignale

Für den Frequenzgang ist ebenfalls der oben vorgestellt Kondensator mit verantwortlich. Bei modernen OpAmp sind aber oft zusätzliche Kondensatoren in den anderen Stufen mit beteiligt. Es lässt sich somit nicht direkt von der Slew Rate auf das GBP schließen.

Beispiel:

Ein 741 OpAmp wird als nicht-invertierender Verstärker beschaltet und soll ein Eingangssignal auf  $10 V_{peak}$  am Ausgang bringen. Die SR beträgt  $0.67 V/\mu s$ . Kann damit eine HiFi Übertragung realisiert werden ?

$$f_{max} = \frac{SR}{2\pi \cdot A} = \frac{0.67 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 10} = 10.7 \quad kHz$$

Beispiel:

Ein 741 OpAmp wird als Verstärker mit Gain 20 (26 dB) eingesetzt. Das Signal sei am Ausgang kleiner als 1 V. Der 741 hat ein Unity Gain Bandwidth von 1.2 MHz. Kann dies als HiFi Vorverstärker eingesetzt werden ?

$$GBP = f_T = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$f_{c(cl)} = \frac{GBP}{A_{cl}} = \frac{1.2 \text{ MHz}}{20} = 60 \quad kHz$$