

8. Spannungsgegenkopplung und Stromgegenkopplung

Wir haben bisher nur eine Auslegung der Operationsverstärker behandelt, nämlich den Operationsverstärker mit Spannungsgegenkopplung (Voltage Feedback Amplifier VFA). Seit einiger Zeit ist eine weitere Konfiguration von Bedeutung, die als Operationsverstärker mit Stromgegenkopplung (Current Feedback Amplifier CFA) bezeichnet wird. Beide Auslegungen haben ihre Besonderheiten (Abbildungen 8.1 bis 8.8, Tabelle 8.1), aus denen sich jeweils typische Einsatzfälle ergeben (Tabelle 8.2).

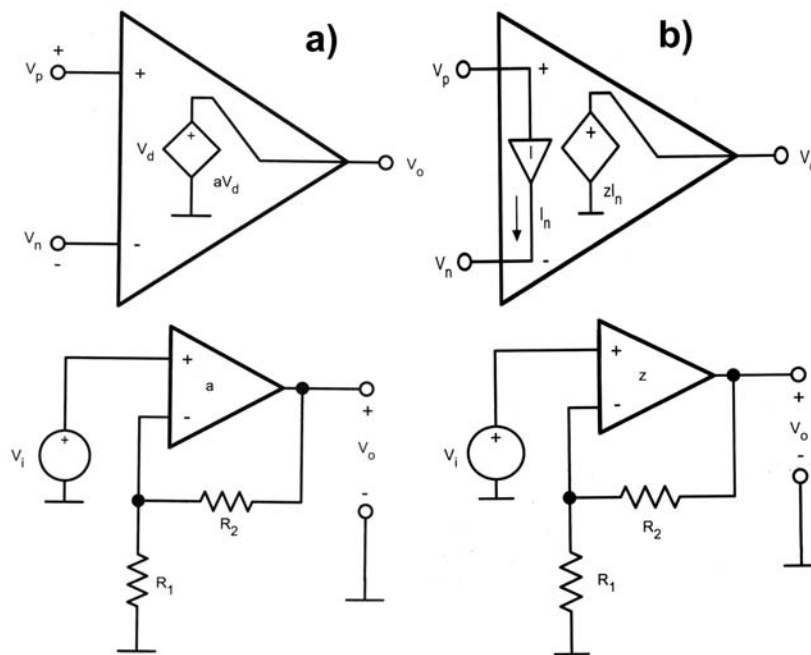


Abb. 8.1 Operationsverstärker mit Spannungs- und Stromgegenkopplung (nach National Semiconductor). Oben: einfachstes Ersatzschaltbild, darunter: Prinzipschaltung des nichtinvertierenden Verstärkers.

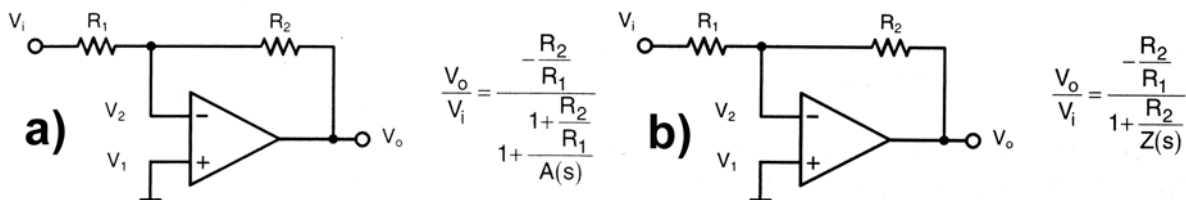


Abb. 8.2 Die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung am Beispiel des invertierenden Verstärkers (nach National Semiconductor). $s = j \omega$.

Die Schaltungsstrukturen unterscheiden sich nicht. Jede Verstärkerart hat aber eine andere Übertragungsfunktion V_o / V_i :

- a) Spannungsgegenkopplung. Im Nenner der Übertragungsfunktion erscheint sowohl der Gegenkopplungsfaktor also auch die frequenzabhängige Open-loop-Verstärkung (hier: $A(s) = A_{OL}(j\omega)$). Die Schleifenverstärkung ist somit frequenzabhängig.
- b) Stromgegenkopplung. Im Nenner der Übertragungsfunktion erscheint neben der frequenzabhängigen Übertragungsimpedanz (hier: $Z(s) = Z_T(j\omega)$) nur noch der Gegenkopplungswiderstand R_2 . Die Bandbreite hängt somit nur von R_2 ab, nicht aber von der Schleifenverstärkung.

| a) Spannungsgegenkopplung (VFA) | b) Stromgegenkopplung (CFA) |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Eingangsstufe ist Spannungsdifferenzverstärker • Maßgebend ist Differenzspannung $V_D = V_P - V_N$ • Beide Eingänge haben gleiche (hohe) Impedanz • Ausgangsstufe wirkt als Spannungsverstärker mit Open-loop-Verstärkung $A_{OL} = V_O / V_D$ • Gegenkopplung versucht, Eingangsspannungsdifferenz zu Null zu machen (V_D ist Fehlersignal) • Konstantes Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt Verstärkung frequenzabhängig • Begrenzte Anstiegsgeschwindigkeit, unabhängig vom Eingangsspannungshub • Freie Wahl des Gegenkopplungswiderstands, oftmals direkte Gegenkopplung möglich | <ul style="list-style-type: none"> • Eingangsstufe ist Puffer mit Verstärkung 1 (Impedanzwandler) • Maßgebend ist der durch den invertierenden Eingang fließende Strom I_N • Der positive Eingang hat eine hohe Impedanz (Beispiel: $5\text{ M}\Omega \parallel 2\text{ pF}$), der negative eine niedrige (Beispiel: $30\ \Omega \parallel 2\text{ pF}$) • Ausgangsstufe wirkt als Strom-Spannungswandler (Transimpedanzverstärker) mit Übertragungsimpedanz (Open-loop Transimpedance) $Z_T = V_O / I_N$ • Gegenkopplung versucht, Eingangsstrom zu Null zu machen (I_N ist Fehlersignal) • Bandbreite weitgehend unabhängig von der Verstärkung • Höhere Anstiegsgeschwindigkeit (proportional Hub am Eingang) • Wertebereich des Gegenkopplungswiderstands vorgegeben |

Tabelle 8.1 Operationsverstärker mit Spannungs- und Stromgegenkopplung.

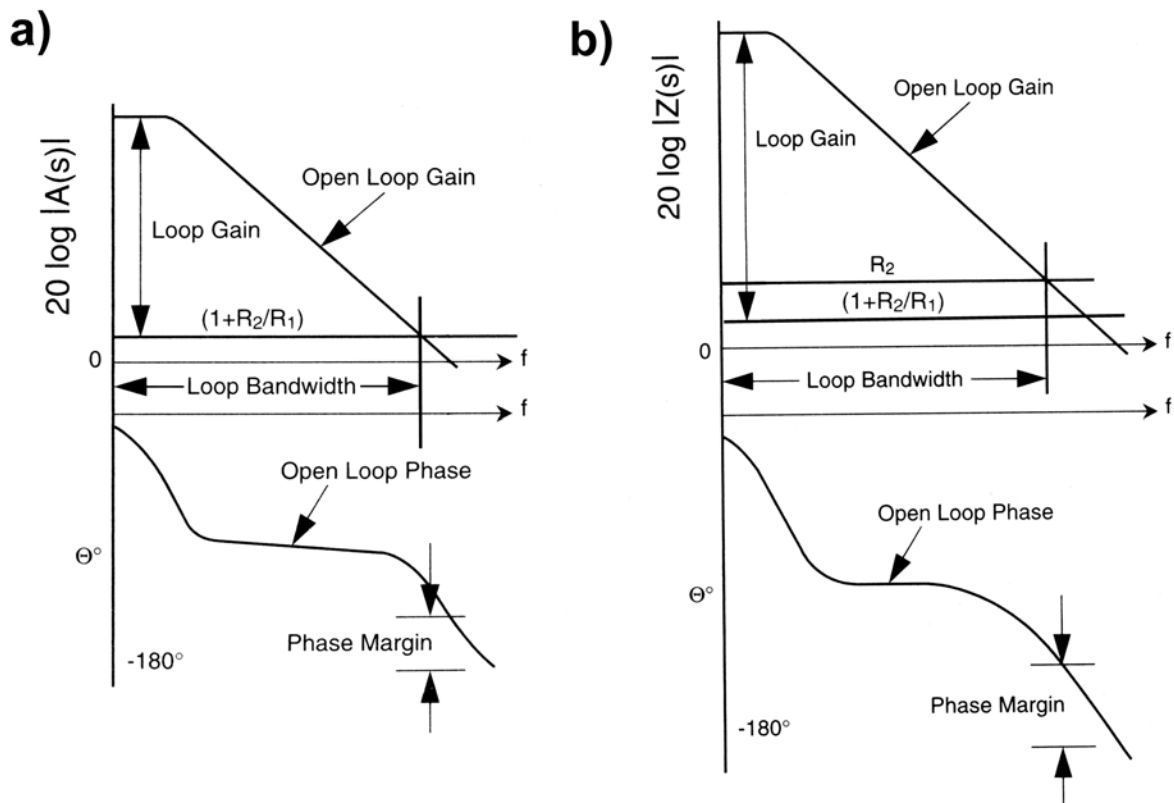


Abb. 8.3 Bode-Diagramme im Vergleich (nach National Semiconductor). Sie betreffen die invertierenden Verstärker gemäß Abbildung 8.2.

- a) Spannungsgegenkopplung. Das bekannte Bild. Bandbreite und Verstärkung des gegengekoppelten Verstärkers ergeben sich aus der Open-Loop-Verstärkung und dem Gegenkopplungsfaktor. Je höher die Verstärkung, desto geringer die Bandbreite (Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt).
- b) Stromgegenkopplung. Die Bandbreite des gegengekoppelten Verstärkers ergibt sich aus der Open-Loop-Verstärkung¹ und dem Gegenkopplungswiderstand, die Verstärkung aus der Open-Loop-Verstärkung¹ und dem Gegenkopplungsfaktor. Je größer der Gegenkopplungswiderstand, desto geringer die Bandbreite. Ein Verstärkungs-Bandbreiten-Produkt gibt es nicht. Bandbreite und Verstärkung lassen sich unabhängig voneinander einstellen: die Bandbreite mit R_2 , die Verstärkung mit R_1 .

Die Größenordnung des Gegenkopplungswiderstandes wird typischerweise vom Hersteller vorgegeben (typisch: einige hundert Ω ...einige $k\Omega$). Dafür ist der Open-Loop-Phasengang optimiert (Bereich der Phasenverschiebung von 90°). Verdopplung des empfohlenen Wertes vermindert die Bandbreite auf die Hälfte. Verringerung kann zu Instabilität führen. Direkte Gegenkopplung (ohne Widerstand) funktioniert nicht (Verstärker wird instabil).

1: Genauer: Übertragungsimpedanz (Open-loop Transimpedance).

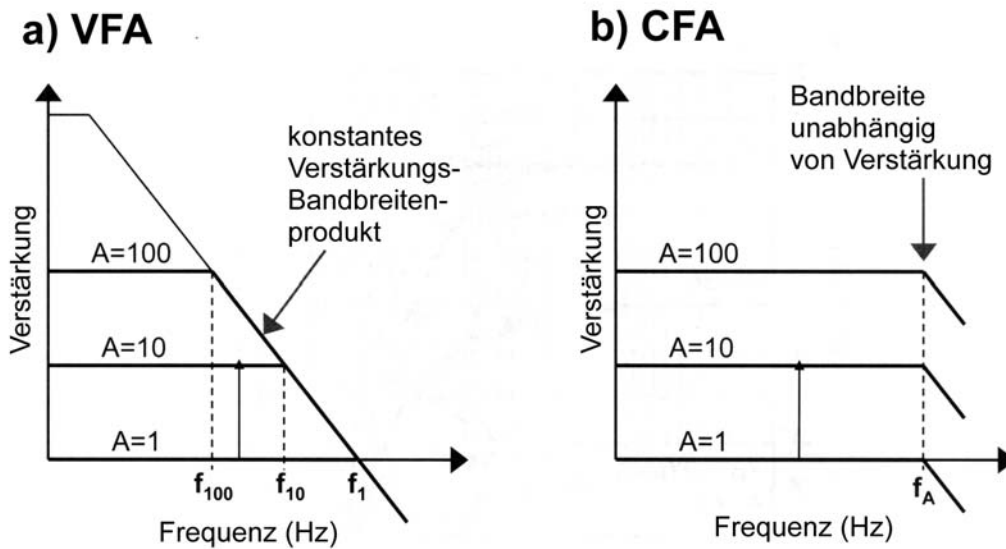


Abb. 8.4 Amplitudengänge im Vergleich (nach National Semiconductor).

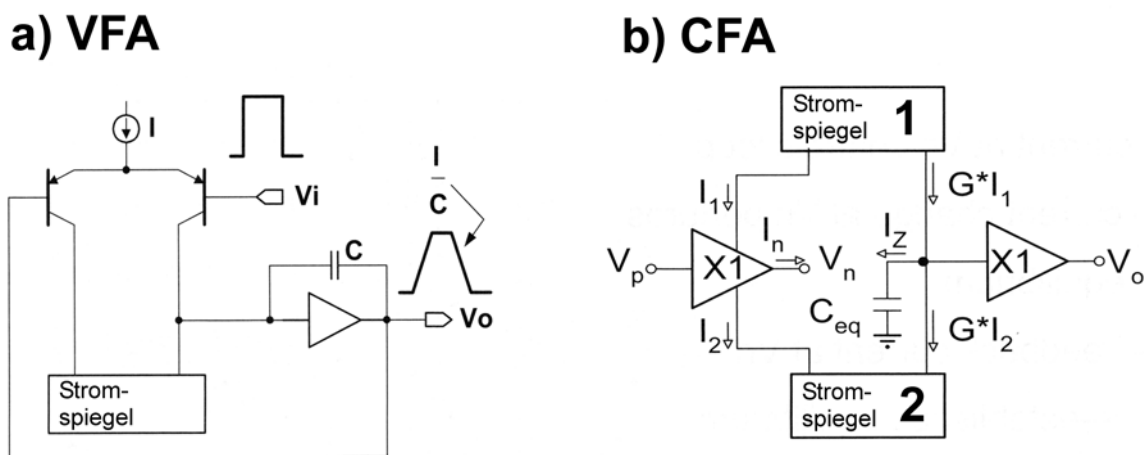


Abb. 8.5 Zur Anstiegsgeschwindigkeit (nach National Semiconductor).

- a) Spannungsgegenkopplung. Der gesamte Strom zum Umladen der Endstufenkapazität kommt von der Stromquelle I . Das begrenzt die Anstiegsgeschwindigkeit. Da eine Stromquelle stets einen konstanten Strom liefert, kann auch ein größerer Eingangsspannungshub nichts ausrichten.
- b) Stromgegenkopplung. Der Strom zum Umladen der Endstufenkapazität kommt aus den Stromspiegeln 1 und 2. Der Ausgangsstrom ist aber jeweils proportional zum Eingangsstrom. Je größer der Hub an den Eingängen, desto mehr Ausgangsstrom liefern die Stromspiegel. Deshalb gibt es keine grundsätzliche Beschränkung der Anstiegsgeschwindigkeit.

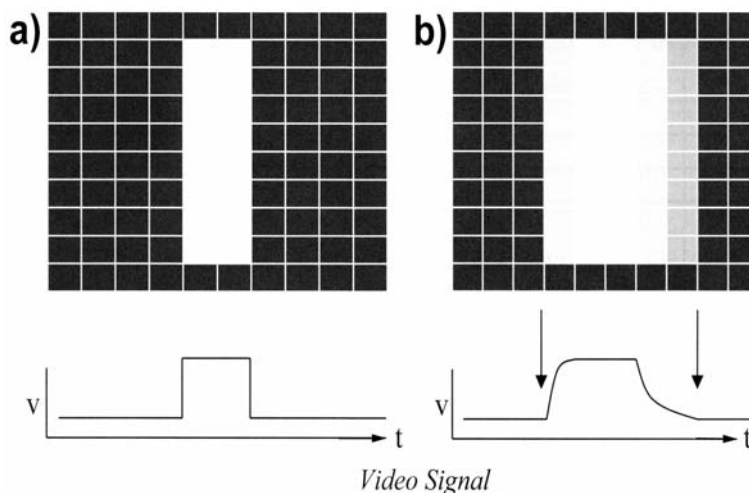


Abb. 8.6 Manchmal ist die Anstiegsgeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung. Hier beim Verstärken von Videosignalen (nach National Semiconductor). a) Strom-, b) Spannungsgegenkopplung.

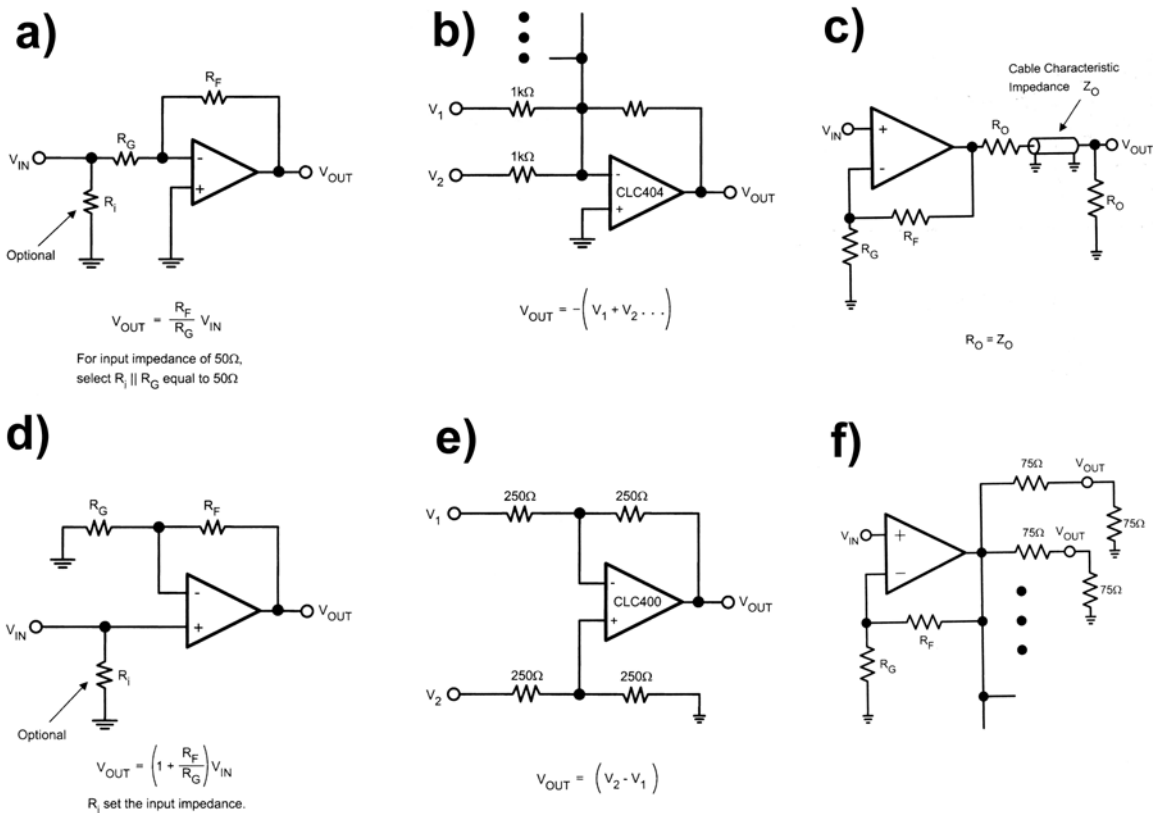


Abb. 8.7 Grundschaltungen mit stromgegengekoppelten Verstärkern. Eine kleine Auswahl (nach National Semiconductor). a) invertierend; b) summierend; c) Koaxialkabeltreiber; d) nichtinvertierend; e) subtrahierend (Differenzverstärker); f) Verteilerverstärker (treibt mehrere 75-Ω-Video-kabel).

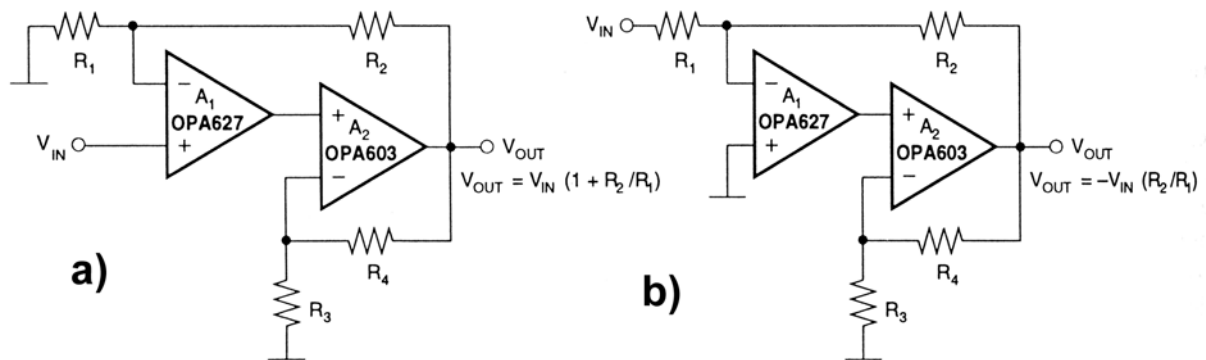


Abb. 8.8 Zwei Verbundschaltungen (nach Burr-Brown). a) nichtinvertierend; b) invertierend.

Die Kombination verschiedenartiger Bauelemente ergibt oftmals besonders günstige Lösungen. Der OPA627 ist spannungsgegenggekoppelt, der OPA603 stromgegenggekoppelt. Naheliegenderweise setzt man den 603 als Ausgangsstufe ein (hohe Anstiegsrate, Bandbreite unabhängig von der Verstärkung). Der eingangsseitige 627 gewährleistet hingegen eine hohe Eingangsimpedanz, geringe Ruhestrome usw.

| Spannungsgegengkopplung für | Stromgegengkopplung für |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Höchste Genauigkeit im Gleichspannungsbereich • Höchste Gleichtaktunterdrückung • Geringstes Rauschen • Geringste Eingangsruhestrome • Ausgangsspannungshub nahezu gesamter Bereich der Speisespannung (Rail-to-Rail) | <ul style="list-style-type: none"> • Geringere Verzerrungen bei gegebener Bandbreite • Höchste Anstiegsgeschwindigkeit • Umschaltbare Verstärkung bei gleichbleibender Bandbreite • Summation von Signalen, die unterschiedliche Verstärkungsfaktoren erfordern |

Tabelle 8.2 Beide Auslegungen haben ihre Berechtigung.