## Verstehen und richtig interpretieren:

# Bandbreite-Angaben bei schnellen Operationsverstärkern (Teil 1)

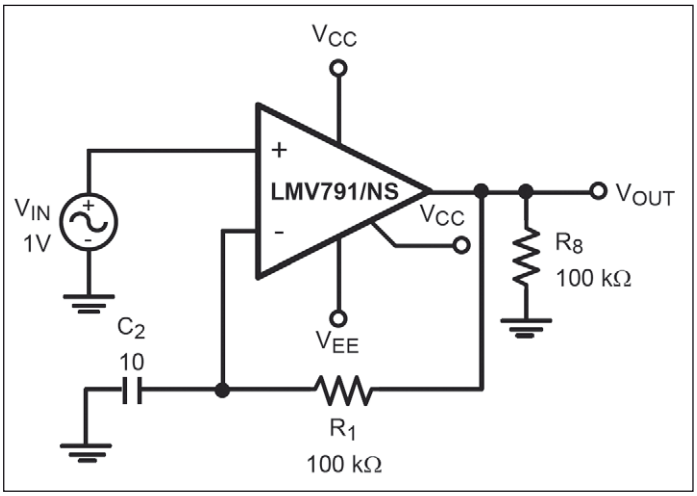


*Bild 1: Mögliche PSpice-Testschaltung zur Ermittlung des Verlaufs der offenen Schleifenverstärkung ohne kapazitive Last [1]*

Unter Bandbreite versteht man im Allgemeinen den Übertragungsbereich, in welchem das Signal gegenüber dem Maximalwert um 3 dB gedämpft wird. Bei Operationsverstärkern (und Verstärkern allgemein) ist es mit dieser Definition aber noch nicht getan. Zwar gibt es hier im Prinzip keine untere -3-dB-Grenzfrequenz, doch sind Nebenbedingungen zu beachten, die zu verschiedenen Bandbreite-Angaben führen. Vernachlässigt man die Nebenbedingungen, kann man die Bandbreite-Angaben nicht richtig interpretieren.

Grundsätzlich unterscheiden muss man zwischen Kleinsignal- und Großsignal-Bandbreite. Erste wird durch Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (Gain Bandwidth Product, GBP, GBW, GWBP oder GB), Unity Gain Bandwidth (UGB, UGBW) und Transitfrequenz gekennzeichnet.

### GBP, UGB und Transitfrequenz

Die Spannungsverstärkung eines Operationsverstärkers fällt, falls es sich nicht um einen stromrückgekoppelten Typ handelt, ab einer bestimmten Frequenz, meist unterhalb von einem Kilohertz, mit 6 dB pro Oktave oder 20 dB pro Dekade. Bei schnellen Op Amps kann bei einer hohen Frequenz ein schärferer Abfall einsetzen. Im Bereich mit 6 dB pro Oktave oder 20 dB pro Dekade ist das Produkt aus Spannungsverstärkung und Frequenz konstant. Es eignet sich daher sehr gut zur Charakterisierung des Verstärkers und wird meist als Verstärkungs-Bandbreite-Produkt bezeichnet, manchmal auch als Unity Gain Bandwidth (Bandbreite bei Einsverstärkung) oder schlicht mit „Bandbreite“.

Weiter zu beobachten ist die aus der Transistortechnik kommende Bezeichnung „Transitfrequenz“. Das ist bekanntlich diejenige Frequenz, bei der die Stromverstärkung bei kurzgeschlossenem Ausgang auf 1 abgefallen ist. Operationsverstärker sind im Gegensatz zu bipolaren Transistoren aber Spannungsverstärker, daher hat sich hier die Verstärkungsangabe in Form von V/V eingebürgert, etwa 6 V/V bedeutet also Spannungsverstärkung 6, eine absolute Spannung ist nicht gemeint. Beim Operationsverstärker beträgt die Spannungsverstärkung bei der höchsten Frequenz innerhalb der Bandbreite 0,71 (-3 dB). Jedoch: „Die Transitfrequenz beschreibt jene Frequenz, bei der die Geradeausverstärkung (Differenzverstärkung) des Operationsverstärkers genau 0 dB wird, das heißt die Verstärkung genau den Betrag 1 erreicht. Sie entspricht näherungsweise dem Verstärkungs-Bandbreite-Produkt.“ (Wikipedia)

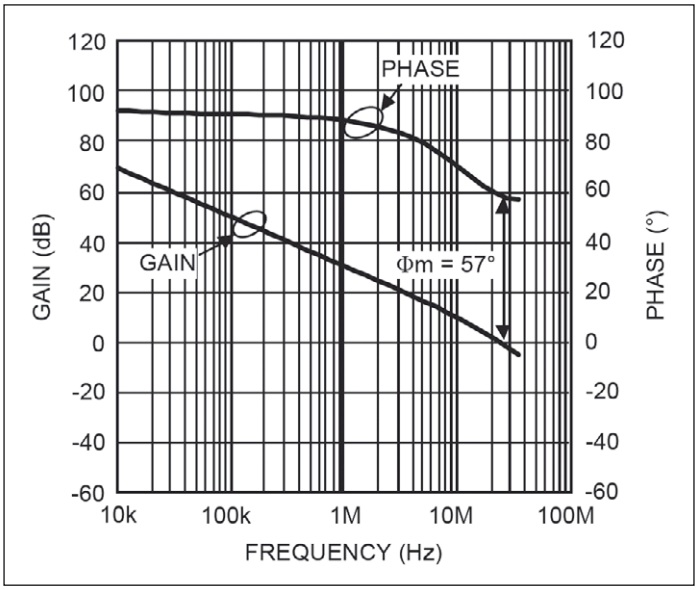


*Bild 2: Simulierte offene Schleifenverstärkung und Phasenlage des Ausgangs- zum Eingangssignal [1]*

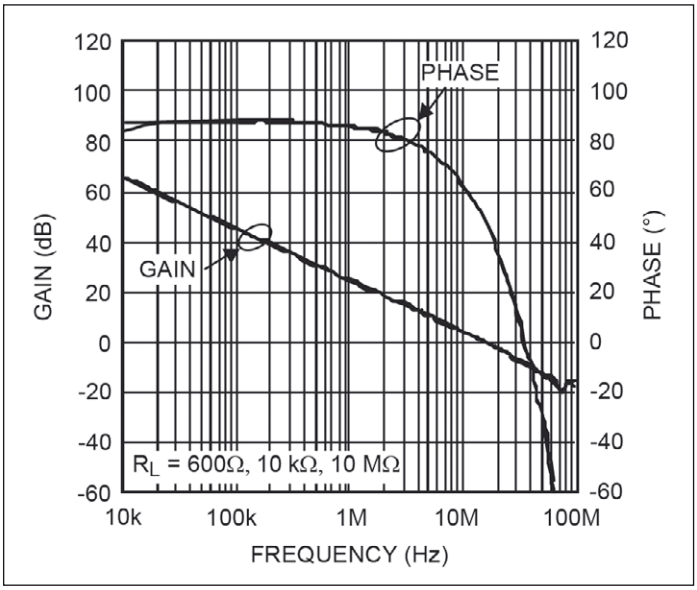


*Bild 3: Gemessene offene Schleifenverstärkung und Phasenlage des Ausgangs- zum Eingangssignal [1]*

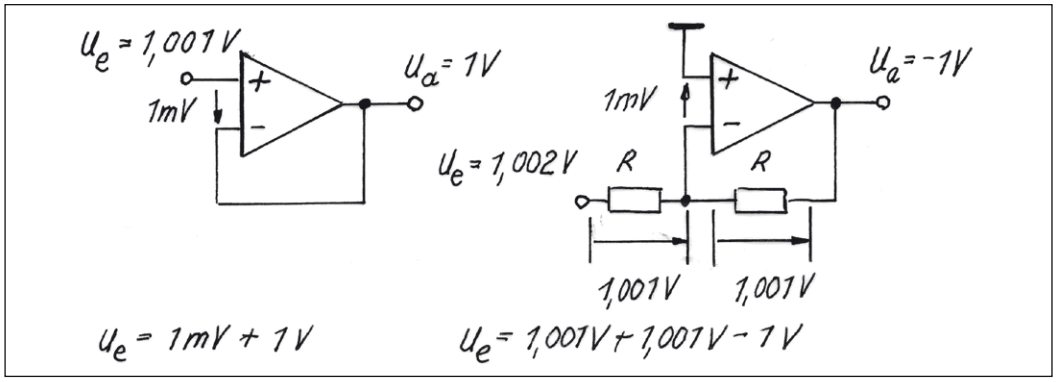


***Bild 4: Nicht idealer Op Amp in nichtinvertierender und invertierender Grundschaltung***

Obwohl nicht immer durch die Angabe eines Ausgangsspannungswerts erkennbar, kann man beim Verstärkungs-Bandbreite-Produkt und bei der Transitfrequenz davon ausgehen, dass es sich um einen Kleinsignal-Kennwert handelt. Es wird also für eine Ausgangsspannung im niedrigen Millivoltbereich (z.B. 20 oder 100 mV Spitze-Spitze) ermittelt, sodass nicht eine Verzerrung die Limitierung bewirkt. An der Bandobergrenze ist das Testsignal unverzerrt. Auch bei der Unity Gain Bandwith ist dies im Allgemeinen der Fall.

„Der Verlauf der Verstärkung bei offener Schleife über der Frequenz ist vielleicht der allererste Test, den Ingenieure durchführen sollten, um die Macro-Modell-Leistungsfähigkeit des Verstärkers darzustellen. Dieser Test ist wichtig, da er die DC-Verstärkung, die -3-dB-Frequenz, die Bandbreite bei 1-Verstärkung und die Phasen-Margin offenbart. Bild 1 zeigt eine mögliche Testschaltung. Das RC-Glied sichert, dass der Ausgang im Ruhezustand auf einem nutzbaren Gleichspannungs-Level liegt. Bei höheren Frequenzen legt der Kondensator den invertierenden Eingang praktisch an Masse, sodass der Op Amp praktisch bei offener Schleife arbeitet.“ [1] Hier handelt es sich wohlgemerkt um eine Simulation in PSpice.

In der Tat kann man schnelle Operationsverstärker mithilfe einer Simulation spezifizieren, aber auch durch eine Messung mit Hardware. Die Prozedur auf dem Labortisch scheint einfach: An Ein- und Ausgang legt man ein Zweikanal-Scope, dessen Fehler durch den Frequenzgang sich kompensieren, wichtig ist die Spannungsdifferenz zwischen Ein- und Ausgang. Lediglich die Signalfrequenz wird verändert. Hier ist nun bei niedrigen Frequenzen die Differenz extrem groß, sodass man die Eingangsspannung sehr klein halten muss, und dies bedeutet, dass das Rauschen stören könnte. Bei höheren Frequenzen übt hingegen die unvermeidliche Lastkapazität einen störenden Einfluss aus. Am Eingang stört die Scope-Eingangskapazität hingegen überhaupt nicht, eine Fehlerkompensation findet nicht statt. Bei offener Schleife hat ein Operationsverstärker zudem auch einen recht hohen ohmschen Ausgangswiderstand. Man sieht: Immer ist das Messergebnis stark von der Belastung abhängig.

Bei den schnellen Operationsverstärkern ist an erster Stelle der Einfluss der Lastkapazität zu vermuten. Eine Messung ohne relevante kapazitive Belastung scheint kaum möglich. Daher verfährt man oft anders: Man misst die Grenzfrequenz bei einer bestimmten durch Gegenkopplung festgelegten Verstärkung in nichtinvertierender Grundschaltung (bis herab zur Spannungsverstärkung 1) und somit entsprechend Schleifenverstärkung verminderter Ausgangsimpedanz und approximiert dann auf das GBP. Das klingt in [1] so: „Beim Test der offenen Schleifenverstärkung und Phase sollte man ein höheres Frequenz-Limit wählen, das über die Unity-Gain-Bandbreite des Verstärkers hinausgeht.” Hier üben nun aber die Gegenkopplungswiderstände im Zusammenhang mit den parasitären Kapazitäten von Testaufbau und Operationsverstärker einen verfälschenden Einfluss aus.

Es gibt daher Abweichungen zwischen Simulation und realer Messung. Beispielhaft illustrieren dies Bild 2 und 3. Im einen wie im anderen Falle ist der Wert für den Anwender begrenzt, denn seine praktische Schaltung wird weder die Umgebungsbedingungen der Simulation noch des Tests beim Hersteller aufweisen. Ganz richtig heißt es darum in [2]: „Die offene Schleifenver-

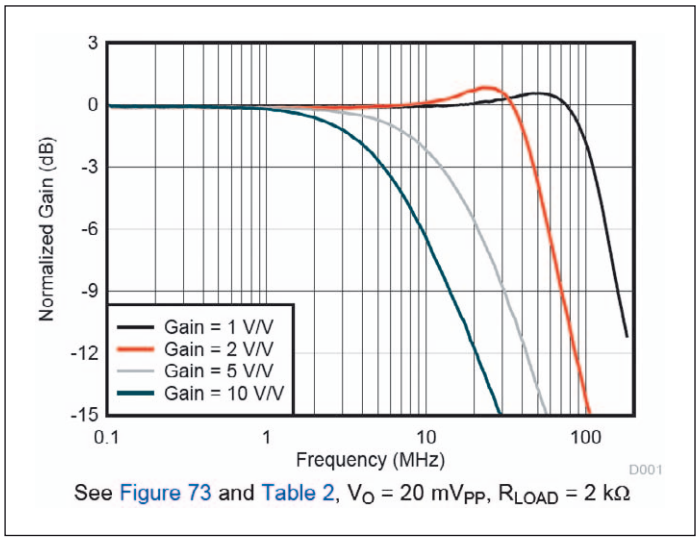


***Bild 5: Kleinsignal-Frequenzverhalten des OPA837 in nichtinvertierender Grundschaltung, GBW 105 MHz [5]***

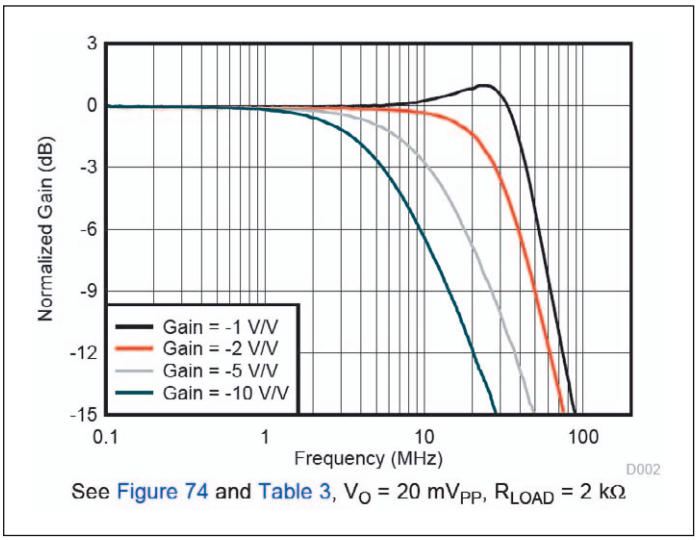


***Bild 6: Kleinsignal-Frequenzverhalten des OPA837 in invertierender Grundschaltung, GBW ca. 52 MHz [5]***

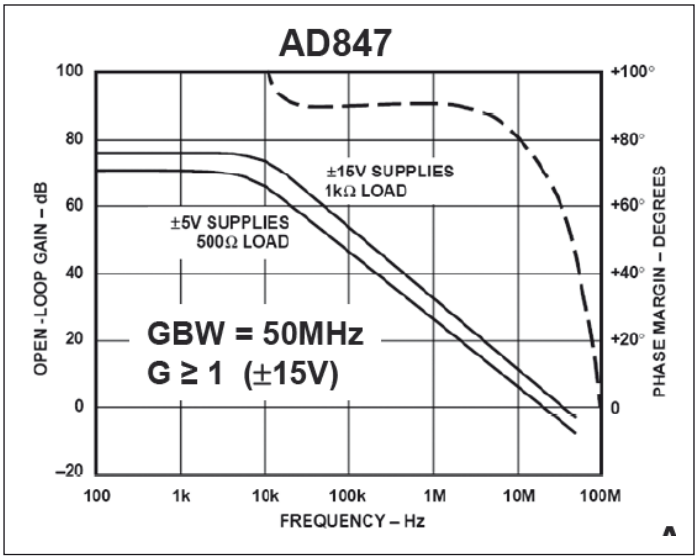


*Bild 7: Diagramm zum AD847 [2]*

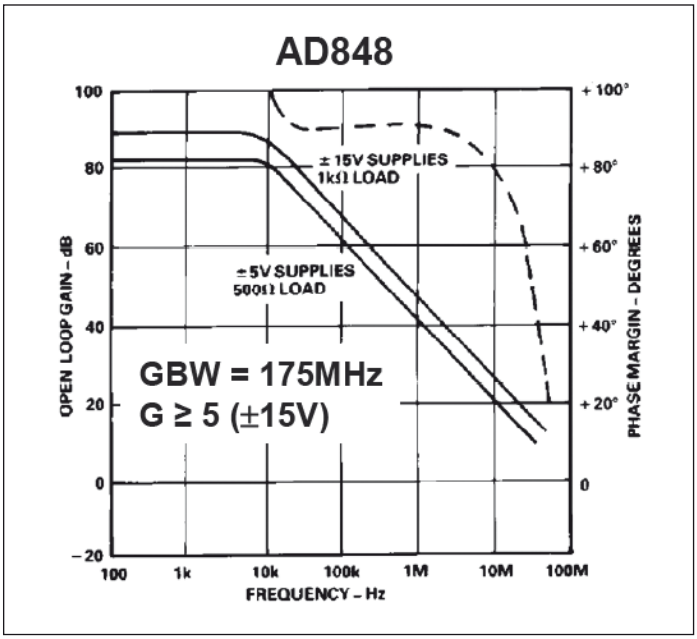


*Bild 8: Diagramm zum AD848 [2]*

stärkung ist keine genau kalkulierbare Spezifikation. Sie hat einen relativ großen Streubereich und wird in den Spezifikationen meist als typischer Wert statt als Min./Max.-Wert angegeben. In einigen Fällen, typisch bei High-Precision-Operationsverstärkern, wird ein minimaler Wert angegeben. Weiterhin kann die offene Schleifenverstärkung in Abhängigkeit von Ausgangsspannung und Belastung variieren. Dies bezeichnet man als Open-Loop Gain Non-Linearity. Es gibt auch eine gewisse Abhängigkeit von der Temperatur. ... In der Tat wird die Open-Loop Gain Non-Linearity nicht immer bei den Datenblättern von Op Amps berücksichtigt. ... Wegen der Variabilität des Verstärkungs-Bandbreite-Produkts und der Tatsache, dass an dem Ort, wo die Verstärkung bei geschlossener Schleife die Open-Loop Gain schneidet, ein 3-dB-Abfall vorliegt, sollte etwas Extra-Margin vorgesehen werden."

## Einfluss der Grundschaltung

Wichtig ist es, zu beachten, dass invertierende und nichtinvertierende Grundschaltung bei gleicher Verstärkung mit verschiedenen Gegenkopplungsgraden arbeiten. Der Gegenkopplungsgrad entscheidet aber über die Grenzfrequenz bis hin zur Unity-Gain-Grenzfrequenz. In [3] liest sich das so: „Die Tatsache, dass die Grenzfrequenz (bei invertierender Grundschaltung) der halben Unity-Gain-Bandbreite (bei nichtinvertierender Grundschaltung) entspricht, ist alleine abhängig vom Gegenkopplungsnetzwerk." Daher gilt das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt in den Datenblättern nur für die nichtinvertierende Grundschaltung.

Zur Erhellung sei Bild 4 betrachtet. Es liegt ein nicht idealer Op Amp zugrunde mit 60 dB Leerlaufverstärkung auf der Signalfrequenz. Jeweils wird mit nominell Betrag 1 V/V verstärkt. Während die nichtinvertierende Grundschaltung nur mit einem Millivolt Fehler arbeitet, ist bei der invertierenden Grundschaltung der Fehler doppelt so hoch. Die schwächere Gegenkopplung verlangt ein Millivolt mehr am Eingang. Mit höher eingestellten Verstärkungen egalisiert sich jedoch der Unterschied. Bei 10 V/V gibt es kaum mehr einen Unterschied. Mehr zum Thema „Gegenkopplung bei OP Amps" bringt [4].

Die Bilder 5 und 6 bestätigen die Theorie beispielhaft anhand des OPA837 an 5 V bei 25 °C, 20 mV Spitze-Spitze-Ausgangsspannung und 2 kOhm Lastwiderstand.

## Abhängigkeiten

Zusammengefasst hier die wichtigsten Punkte, welche das Leerlaufverhalten eines Operationsverstärkers über der Frequenz bestimmen oder beeinflussen:

- Betriebsspannung
- Lastwiderstand
- Lastkapazität [6]
- Umgebungstemperatur
- Werte der Gegenkopplungswiderstände
- Grundschaltung

## Bewertung des Verstärkungs-Bandbreite-Produkts

Je stärker man einen Operationsverstärker gegenkoppelt, umso geringer wird die Phase-Margin und umso größer die Gefahr der Selbsterregung. Das GBP kann nur fair mit derjenigen Verstärkung bewertet werden, bei welcher der Op Amp noch stabil arbeitet.

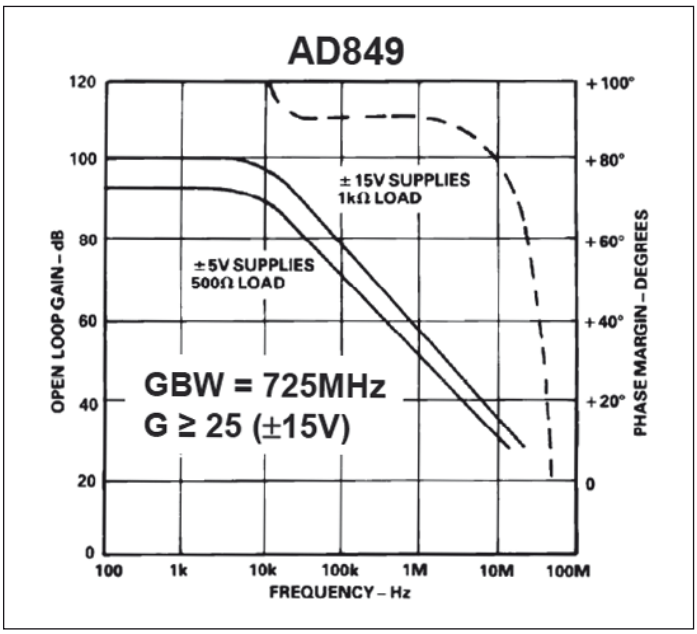


*Bild 9: Diagramm zum AD849 [2]*

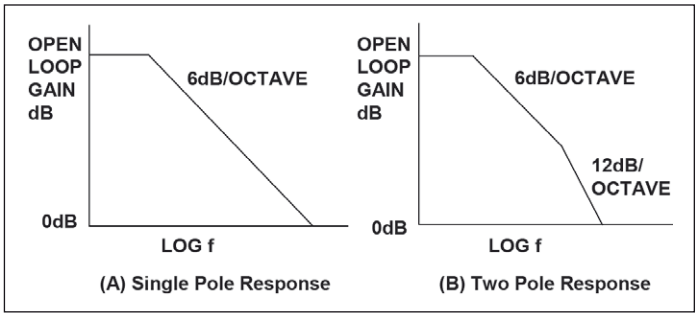


***Bild 10: Verstärkungsverläufe mit einer und mit zwei Polstellen [2]***

„Um bei spannungsgegengekoppelten Operationsverstärkern ein möglichst großes Verstärkungs-Bandbreite-Produkt zu ermöglichen, gibt es von bestimmten Operationsverstärkertypen zwei nahezu baugleiche Typen, wie den OP27 und OP37. Der OP27 ist vollständig kompensiert, was bedeutet, er kann in Schaltungen verwendet werden, die eine Verstärkung von 1 aufweisen, besitzt aber ein geringeres Verstärkung-Bandbreite-Produkt (hier 8 MHz). Der OP37 ist teilkompensiert, er ist stabil in Schaltungen mit einer Gesamtverstärkung von mindestens 10, dafür besitzt er ein höheres Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (hier 63 MHz). Die interne Frequenzkompensation ist in Schaltungen mit geringer Verstärkung notwendig, da bei hohen Frequenzen die Gegenkopplung durch die Drehung der Phase im Rückkopplungszweig in eine instabile Mitkopplung verwandelt werden würde. Damit verbunden ist eine Verletzung des Stabilitätskriteriums von Nyquist. Dieser Effekt kann durch den stromrückgekoppelten Operationsverstärker (CV-OP) umgangen werden und ergibt sich aus der Möglichkeit, über den niederohmigen Stromeingang mittels der Impedanz der Gegenkopplungsschleife das Vorwärtsverstärkungsverhalten und damit das GBP zu steuern. Für große Verstärkungen kann es höher gewählt werden; bei kleinen Verstärkungen wird es herabgesetzt und ermöglicht einen stabilen Betrieb. So ergibt sich beim CV-OP im Gegensatz zum spannungsgesteuerten Operationsverstärker (VV-OP) mit konstantem Verstärkungs-Bandbreite-Produkt eine von der Verstärkung unabhängige nutzbare Bandbreite und ein nicht konstantes Verstärkungs-Bandbreite-Produkt." (Wikipedia)

„Die Theorie der Rückkopplung sagt, dass die Closed-Loop Gain die Open-Loop Gain auf dem Abschnitt mit 6 dB/Oktave schneiden muss, damit das System unter allen Bedingungen stabil ist. Bei 12 dB/Oktave wird der Op Amp oszillieren. Die einfachste Weise, dies zu verstehen, besteht in dem Wissen, dass jede Polstelle 90° Phasen-Shift hinzuaddiert. Zwei Pole bedeuten 180°, und 180° wandeln negative Rückkopplung (Gegenkopplung) in positive (Mitkopplung), was Oszillation bedeutet. Man könnte die Frage stellen, warum jemand einen Verstärker haben möchte, der nicht stabil bei Einsverstärkung ist (unity gain stable)? Die Antwort lautet, dass für einen gegebenen Verstärker die Bandbreite bei höheren Verstärkungen erweitert werden kann, wenn der Verstärker nicht für Stabilität bei Einsverstärkung entworfen wurde. Diese Ausführung eines Op Amps wird manchmal als unkompensierter Op Amp bezeichnet. Jedoch muss das Stabilitätskriterium eingehalten werden. ... Unkompensierte Op Amps arbeiten daher nur bei Verstärkungen über 1 V/V stabil, worüber das Datenblatt informiert." [2]

Drei Beispiele bringen Bild 7, 8 und 9. AD847, AD848 und AD849 weisen im Grunde das selbe Design auf und unterscheiden sich nur bei der Kompensation. Es versteht sich von selbst, dass die Angabe einer Unity Gain Bandwidth auch eine Unity-Gain-Stablilität voraussetzt.

## Wenn das GBW größer ist als die UGB

Nach der Beziehung

GBW/Closed-Loop Gain = Closed-Loop Bandwidth

kann man, im Bereich des 6-dB-Abfalls pro Oktave, die Bandbreite bei Gegenkopplung in nichtinvertierender Grundschaltung und für Verstärkungen ab 10 V/V in nichtinvertierender Grundschaltung kalkulieren. Gibt es jedoch einen zweiten Pol, sodass bei besonders hohen Frequenzen, aber noch bei einer offenen Schleifenverstärkung über 0 dB ein Abfall von 12 dB pro Dekade vorliegt (Bild 10), dann ist die Unity Gain Bandwidth für eine Bandbreitenkalkulation bei Gegenkopplung nicht geeignet. „Viele Op Amps weisen zusätzliche Pole bei höheren Frequenzen auf, und dies senkt die Unity Gain Bandwidth." [7] In diesen Fällen sind GBP und UGB nicht gleich. Denn das GBP kann im Bereich des Abfalls mit 6 dB/Oktave definiert werden. Nebenbedingung ist hier also ein Maximalwert der offenen Schleifenverstärkung von z.B. 50 dB.

Grafisch auf den Punkt bringen lässt sich diese Tatsache durch Bild 11. Es stammt aus [8], wo unkompensierte Op Amps ausführlich betrachtet werden. ***FS***

## Quellen:

[1] Texas Instruments Application Report SNOA475D – November 2006 – Revised April 2013: AN-1516, Pspice Universal Test Circuits by Soufiane Bendaoud

[2] Analog Devices Tutorial MT-033: Voltage Feedback Op Amp Gain and Bandwidth

[3] www.elektronik-kompendium.de/public/schaerer/opa1.htm

[4] Texas Instruments Low-Power, Precision, 105-MHz, Voltage-Feedback Op Amp, OPA837, SBOS673 – September 2017

[5] Intersil: Feedback, Op Amps and Compensation, Application Note AN9415.3, November 1996

[6] Microchip Technology Application Report AN884, Driving Capacitive Loads With Op Amps by Kumen Blake

[7] Signal Chain Basics #85: What's the Difference Between Gain Bandwidth Product & Unity Gain Bandwidth by Arthur Kay in Planet Analog, 1/14/2014

[8] National Semiconductor Application Note 1604, Decompensated Operational Amplifiers by Shuqing Jing, September 2007

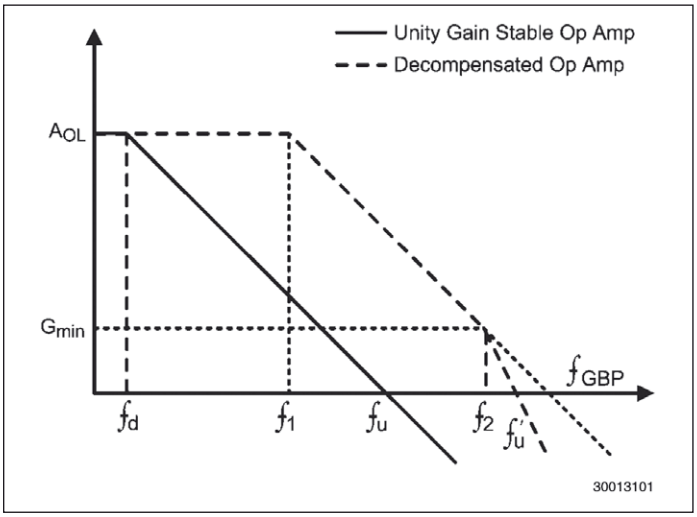


***Bild 11: Offene Schleifenverstärkung über der Frequenz für einen Unity Gain Stable Op Amp und einen unkompensierten Op Amp***