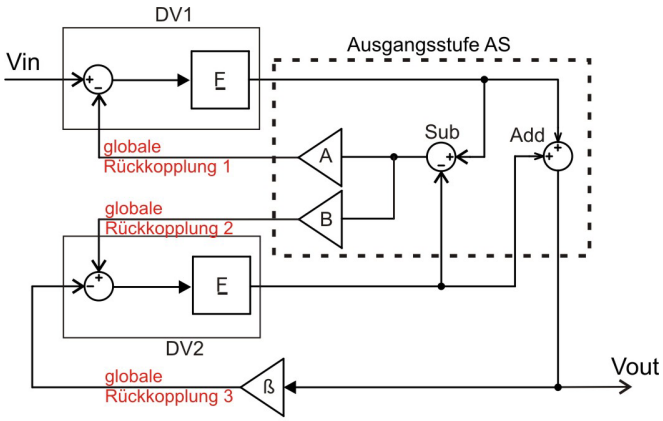
DAGA 2015/264: Audio-Verstärker mit invertierendem Gegenkopplung-Konzept

Drazenko Sukalo

DSLab-Device Solution Laboratory, 80809 München, E-Mail: d.sukalo@dslab.de

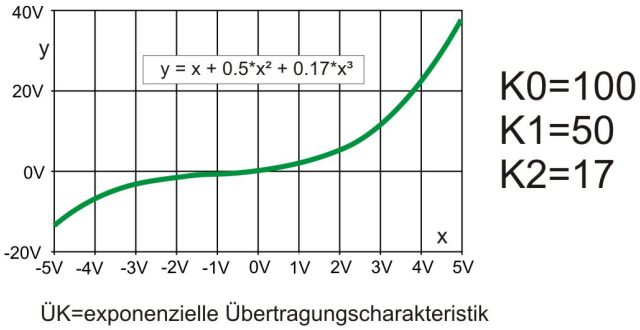
1. Einleitung

Das Problem der Findung einer optimalen Verstärker-Architektur, s. [1], in Hinblick auf optimale Fehlerkorrektion nichtlinearer Verzerrungen haben diverse Autoren behandelt. Eine optimale N-stufige Feedback-Feedforward- (kurz FB-FF)-Architektur ist in [2] von Hawksford definiert, welche in Bezug auf nichtlineare Fehlerkorrektion optimal sein sollte. Fig. 1 zeigt unsere generalisierte FB-FF-Architektur eines linearen Audio-Verstärkers mit dreifacher Rückkopplung mit der Übertragungsfunktion ÜF. Der Komposit-Verstärker besteht aus zwei identischen Differenzverstärker DV1 und DV2 und einer Ausgangsstufe AS. Im folgenden Experiment nehmen wir an, dass die beiden Differenzverstärker DV eine nichtlineare Übertragungscharakteristik 100*ÜK, siehe Fig. 2, mit einer linearen Verstärkung (=100) besitzen. Mit Hilfe nichtlinearer Optimierung wird das nichtlineare System in Fig. 2 mit drei reellen Unbekannten A, B und β in Hinblick auf bestmögliche Linearität der Übertragung-Kennlinie im Closed-Loop-Betrieb definiert, wobei ein Beweis dafür geliefert wird, dass ein rückgekoppelter Verstärker mit einfacher globalen Rückkopplung (Feedback-Architektur) keine optimale Architektur ist, wie das traditionell vertreten wird. Nämlich, für den Fall wenn A=B(=1) in der Relation R1.1, kann die Übertragungsfunktion ÜF auf eine 1-Pol-Funktion reduziert werden, sodass ein Vergleich zwischen dem Komposit-Verstärker und dem rückgekoppelten Verstärker möglich ist. Die Aufgabe setzt allerdings voraus, dass die zu optimierende Zielfunktion in mathematisch geschlossener Form definiert wird, obwohl Charakteristik des nichtlinearen Verstärkerelements nicht in mathematisch geschlossener Form gegeben ist. Darin besteht eine große Herausforderung der Analyse von nichtlinearen Systemen.



$$ÜF=\frac{Vout}{Vin}=\frac{\underline{F}+2\cdot B\cdot \underline{F}^2}{1+A\cdot \underline{F}+B\cdot \underline{F}+ß\cdot \underline{F}+2\cdot ß\cdot A\cdot \underline{F}^2} \qquad \textbf{R1.1}$$

Fig. 1: Generalisierte Architektur eines neuen Komposit-OV mit dreifacher globaler Rückkopplung mit zwei identischen Differenzverstärkern (Operationsverstärkern) DV1 und DV2.



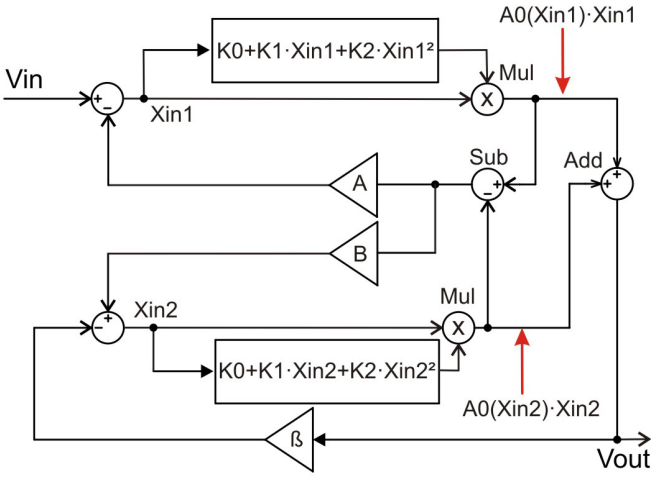


Fig. 2: Blockschaltbild des nichtlinearen Komposit-Verstärkers mit nichtlinearen Verstärkungskoeffizienten A0(Xin)

2. Lösung des nichtlinearen Problems

Der Optimierungsprozess gestaltet sich etwa als die Lösung eines „Curve-Fitting"-Problems. Daher muss zunächst eine Zielverstärkung definiert werden – diese berechnet man vom einfach rückgekoppelten Verstärkern für vorgegebenen ß-Wert (ß=0.1 im Experiment), indem sowohl positive als auch negative Ausgangsamplitude ermittelt werden, und zwar für ein maximales Eingangssignal (3Vpp). Die Amplituden sind unterschiedlich infolge vom quadratischen Anteil, der in Bezug auf y-Achse symmetrisch ist. Daraus wird die Zielverstärkung als der Mittelwert davon berechnet (tGain=9.07345). Für die Minimierung der Zielfunktion wird die kleinste Quadrate Lösungsmethode genutzt, welche in „Optimizing Toolbox" (MATLab) in der Funktion „lsqnonlin" implementiert ist. Zunächst betrachten wir jeweiliges System im DC-Bereich, also die Kreisfrequenz=0. Es wurden zwei Lösungen für die Optimierungsvariablen A, B und ß gefunden, für welche der Komposit-Verstärker stabil ist. Diese optimalen Werte sind genommen, um im Frequenzbereich, vorausgesetzt ein reines Linearsystem, die Wirkung der Optimierung etwas zu „visualisieren", wobei als die Übertragungsfunktion von Differenzverstärkern eine 1-Pol-Funktion mit einer -3dB-Grenzfrequenz von 1 kHz und mit einer Verstärkung von 40dB angenommen wird.

Entsprechende Amplituden- und Phasengänge sind in Fig. 3 und 4 dargestellt. Die Optimierung bewirkt eine ausgedehnte Flachheit des Frequenzgangs in Bezug auf den Referenz-Frequenzgang (FB-Architektur). Das bestätigt sich anhand von den Verzerrungbildern in Fig. 5.

$$TF_{FB}(s)=\frac{628320}{(s + 6.912E04)} \qquad A=0.51,\ B=1,\ ß=0.2003$$

$$TF_{OPT}(s)=\frac{628320*(s + 1.263E06)}{(s + 9.997E05)*(s + 8.747E04)}$$

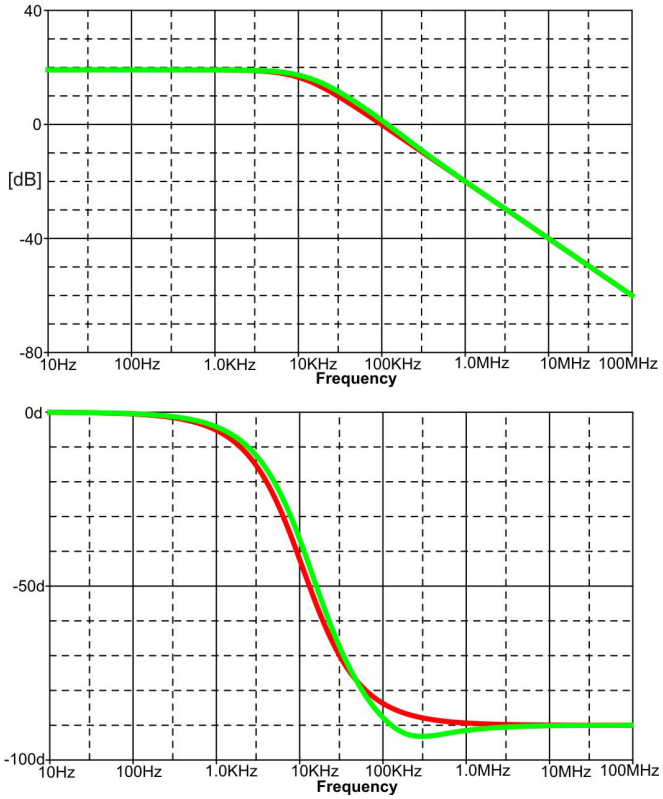


Fig. 3: Amplituden- und Phasengang: in Rot-eines herkömmlichen FB-Verstärkers (äquivalent dem Komposit-Verstärker für A=1, B=1, ß=0.1), und in Grün-des optimierten Komposit-Verstärkers für A=0.51, B=1, ß=0.2003 im in-Phase-Betrieb (die beiden DV sind beschaltet in Phase)

Fig. 5 zeigt Verzerrungsbilder anhand einer DC-Analyse für ein Eingangsignal 3Vpp@1kHz. DC-Analyse bezeichnet, dass die Phasenverschiebungen von Differenzverstärkern nicht berücksichtigt waren – nur die beiden nichtlinearen Verstärkungen. Fig. 5, oben zeigt, dass sich Verzerrungen minimal vergrößern in Bezug auf optimale Werte (in Grün), wenn anstatt einer dreifachen Rückkopplung eine zweifache Rückkopplung angewandt ist. Noch geringere Verzerrungen können mit dreifacher Rückkopplung im Gegenphase-Betrieb erreicht werden, siehe dazu Fig. 5 unten. Die Lösung ist bei den Verstärkern mit konstanter Verstärkung, wie zum Beispiel bei den Leistungsverstärkern, bevorzugt. Denn die gesamte Verstärkung ist nicht mit einem sondern mit zwei Rückkoplung-Koeffizienten bestimmt. Allerdings wird das Einschwingverhalten in dem Fall schlechter (konjugiert komplexen Polpaar). Die Übertragungsfunktion kann durch die Reihenschaltung von zwei Verstärkerelementen realisiert werden. Hier fällt jedoch ein besserer Phasengang auf, der durch die Parallelschaltung von zwei Verstärkerelementen zustande kommt (Feedforward-Architektur). Nämlich, bei mehreren seriell angeschlossenen Verstärkerstufen addieren sich Phasenbeiträge von einzelnen Verstärkerstufen. Erst die Anwendung von FF-Architektur bewirkt eine möglichst große Minimierung des Phasenfehlers.

$$TF_{FB}(s)=\frac{628320}{(s + 6.912E04)} \qquad A=-0.4143,\ B=-1,\ ß=0.2633$$

$$TF_{OPT}(s)=\frac{628320*(s + 1.263E06)}{s^2 + 2.151E05*s + 8.744E10}$$

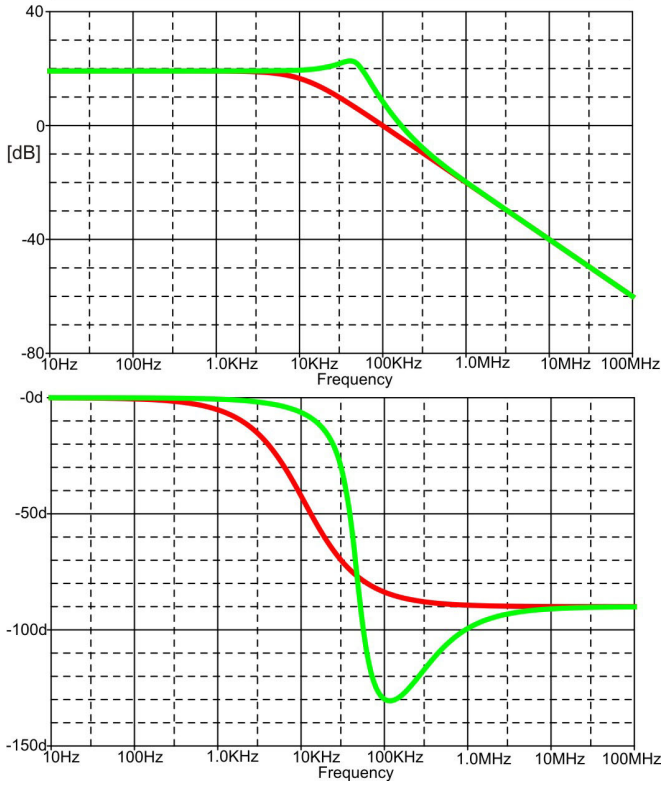


Fig. 4: Amplituden- und Phasengang: in Rot-eines herkömmlichen FB-Verstärkers, und in Grün-des optimierten Komposit-Verstärkers für A=-0.4143, B=-1, ß=0.2633 im Gegenphase-Betrieb (die beiden DV sind beschaltet in Gegenphase)

5. Zusammenfassung

Nichtlineare Optimierung aufgrund der Minimierung von der Fehlerquadratsumme zeigt, dass eine Verbesserung der Linearität von höheren Potenzen der Nichtlinearität ausgehend stattfindet. Das heißt, dass ein besseres Optimierungsergebniss darin resultiert, dass beispielsweise zunächst D3-Harmonische reduziert wird, bevor D2-Harmonische geändert wird. Damit bestätigt sich die

Annahme, dass ein kontinuierlich abklingendes Spektrum als ein qualitatives Merkmal des Verstärkers gilt.

Folgende Hypothese ist bewiesen: Optimale Architektur des Verstärkers für Audioanwendungen muss mindestens zwei globale Rückkopplungen (mehrfach rückgekoppelter Verstärker mit FB-Architektur) und mindestens zwei Vorwärtssignalpfade (FF-Architektur) enthalten.

Eine Korrelation zwischen dem Frequenzgang und dem Grad nichtlinearer Verzerrungen besteht bei der FB-Architektur und bei einer gemischten FF-FB-Architektur. Eine Korrelation muss nicht bestehen sobald sich um ein nichtlineares System handelt, das reine „FF-Architektur-Anteile“ enthält. Die Ursache dafür liegt in der Natur wie Nichtlinearitäten reduziert werden: Ob diese unterdrückt werden (FB-Fehlerkorrektion), oder ob diese sich gegenseitig aufheben lassen (FF-Fehlerkorrektion).

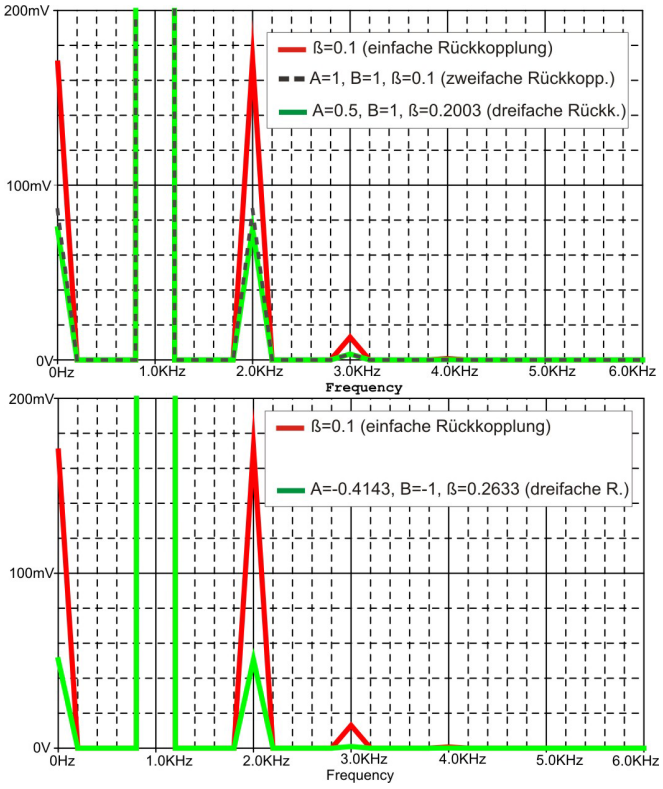


Fig 5: Verzerrungsvergleich:oben-klassische FB-Architektur versus Komposit-Verstärker im in-Phase-Betrieb (die beiden DV sind beschaltet in-Phase), unten-klassische FB-Architektur versus Komposit-Verstärker im Gegenphase-Betrieb (die beiden DV sind beschaltet in Gegenphase)

Literatur:

[1] J. Vanderkooy, S. P. Lipshitz, “Feedforward Error Correction in Power Amplifiers”, AES-Papier

[2] M. O. J. Hawksford, “Towards a Generalisation of Error Correction Amplifiers”, Hawksford's Publications

[3] S. Wurcer, “An Operational Amplifier Architecture with a Single Gain Stage and Distortion Cancellation“, AES-Papier

[4] Patentschrift US 5.166.637: S. Wurcer, “Distortion Cancellation Amplifier System“

[5] Patentschrift DE10 2012 005 488: D. Sukalo, “Komposit-Operationsverstärker mit paralleler oder serieller Architektur mit aktiver Aufhebung von Nichtlinearitäten“