



Aufsatz zum Thema Intermodulationsverzerrungen oder „TIM“

## Transient Inter Modulation (TIM) - Intermodulationsverzerrungen

In Verbindung mit Transistorverstärkern wird immer wieder die Frage diskutiert, inwieweit denn eine Gegenkopplung schlecht ist. In verschiedenen Publikationen, besonders in bestimmten HiFi-Magazinen, wird von Zeit zu Zeit die Gegenkopplung zum Sündenbock aller klanglichen Untugenden erklärt.

Das Thema Gegenkopplung wurde in früheren Abhandlungen bereits detailliert erörtert („Audio-Akademie“ Themen 1 bis 4). Der Frage, ob und warum eine Gegenkopplung in HiFi-Verstärkern schädlich ist, soll in diesem Beitrag aus einem weiteren Blickwinkel nachgegangen werden.

Wenn Gegenkopplung schlecht ist, warum sie es dann bei Operationsverstärkerschaltungen nicht?

### Und was ist eigentlich „TIM“? Und was hat TIM mit Gegenkopplung zu tun?

TIM steht als Abkürzung für „Transient Inter Modulation“, im Deutschen ist auch „Intermodulationsverzerrung“ gebräuchlich. Keiner bezweifelt, dass es diese Verzerrung gibt, aber kaum jemand weiß, wie sie entsteht und ob und wie sie sich verhindern lässt.

Intermodulationsverzerrungen oder TIM werden interessanterweise nur bei Transistorverstärkern oder selten auch bei Röhrenschaltungen nachgewiesen; allerdings nur, wenn diese als [Emitterfolger](#) bzw. als Kathodenfolger aufgebaut sind. Bei Transistorverstärkern ist der Emitterfolger Standard, bei Röhrenverstärkern – dort als Kathodenfolger - eher die Ausnahme. In der Röhrentechnik dient der Kathodenfolger in der Regel als Impedanzwandler. Die Spannungsverstärkung ist stets geringer als 1 bei einer Stromverstärkung von oft mehr als 100.

Sofern ein Emitterfolger als Impedanzwandler eingesetzt wird, arbeitet dieser problemlos. Dabei ist entscheidend, dass der Lastwiderstand kein komplexer Widerstand sein darf, sondern im geforderten Frequenzspektrum ein rein ohmscher Widerstand ist. Wird ein Emitterfolgerverstärker mit einem Lautsprecher belastet, ist diese Forderung nicht erfüllbar. Aber Transistorverstärker verwenden fast ausnahmslos diese Schaltungstechnik zum Antrieb von Lautsprechern.

### Aufbau und Funktion eines Emitterfolgers

Beim Emitterfolger folgt der Emitter der Basis. Daher der Name. Aber warum tut er das?

Betrachten wir einen NPN-Transistor. In einer vorhandenen Schaltung wird der Transistor besser leitend, wenn die Basis positiver wird. Die angewachsene Leitfähigkeit bewirkt einen höheren Emitterstrom. Dieser Strom fließt über den Lastwiderstand zum Generator und Kollektor zurück und bewirkt einen Spannungsabfall an diesem Widerstand. Das heißt, dass die Emitterseite des angeschlossenen Widerstandes der Basis folgt. Daher diese Bezeichnung.

Bildhaft erklärt: die Elektronen am Eingang des Widerstands stauen sich, bis durch den Rückstau in den Transistor hinein die Leitfähigkeit des Transistors zurückgeht und der Strom

durch den Widerstand in Balance mit der daraus resultierenden Emitterspannung ist. Das entspricht exakt dem ohmschen Gesetz.

Wenn aber der Emitterstrom durch einen komplexen Lastwiderstand phasenverschoben zur Basis ist?

Ist diese Phasenverschiebung induktiv, fließt zunächst kein Strom in den Widerstand und der Transistor scheint nicht besser leitend zu werden, obwohl die Basis positiver wird. Tatsächlich scheint der Widerstand nun größer zu sein und bei einem größeren Widerstand genügt ein kleinerer Strom für denselben Spannungsabfall. Man spricht hier auch tatsächlich von Scheinwiderstand. Wenn schließlich der richtige Strom fließen will, wird die Basis schon wieder weniger positiv und der phasenverschobene Strom saugt quasi am Emitter. Dadurch wird der Emitter dann auch weniger positiv. Der Emitter folgt also bei komplexer Last (Lautsprecher) der Basis nur bedingt. Die Endtransistoren eines Verstärkers in Emitterfolgerschaltung haben also eine vom Strom gesteuerte Gegenkopplung. Dieser Strom ist meistens während einer Amplitude zeitweise phasenverschoben zur Steuerspannung an der Basis.

Die Emitterspannung, die Ausgangsspannung also, ist direkt vom Emitterstrom abhängig. Das ist das Prinzip des Emitterfolgers. Die Spannungsverstärkung ist immer kleiner als 1, wird aber mit zunehmendem Strom im Verlauf einer Amplitude wegen der dann zunehmenden Basis-Emitter-Spannung auch immer noch kleiner. Und weil diese Stromverstärkungslinie keine Gerade ist, sondern eine Kurve beliebiger Form, entstehen zusätzlich nichtlineare Abweichungen vom Sollwert. Diese Abweichungen sind vom jeweiligen Momentanwert des Stroms während einer Amplitude abhängig. Zusätzlich kann sich der Strom und die davon abhängige Phasenverschiebung während einer Amplitude gleich mehrmals verändern.

**Diese Schaltung wird ihrem Namen nicht wirklich gerecht, weil der Emitter der Basis eben nur mit Abweichung folgt. Und diese Abweichung ist dabei keinesfalls konstant. Wird diese von der komplexen Last abhängige Spannung zur Gegenkopplung verwendet, kann die Ausgangsspannung eines solchen Verstärkers nicht linear verstärkt zur Eingangsspannung sein.**

Hier ist zu bedenken, dass zwischen Eingangs- und Gegenkopplungsspannung durch den phasenverschobenen Emitterstrom ein Zeitversatz besteht. Zwischen den Emittern und den Basen der Endtransistoren wirken zeitweise Spannungen mit entgegengesetzten Veränderungsrichtungen der anliegenden Spannungen. Keine Frage, dass dies zu Verzerrungen führt.

**Diese Verzerrungen sind innerhalb einer Amplitude vorübergehend; sie sind also „transient“ - zu deutsch vorübergehend.**

Grundsätzlich kann ein Transistor nicht nur an der Basis gesteuert werden, sondern auch am Emitter. Genau dies wird beim Emitterfolger ausgenutzt.

**Über TIM gibt es viele Theorien. Und hier wird TIM höchstwahrscheinlich zutreffend erklärt...**

Die als TIM bezeichneten Verzerrungen werden durch die phasenverschobene Stromgegenkopplung der Endtransistoren in Emitterfolgerschaltung verursacht. Diese Verzerrungen bleiben wirkungslos, solange ein solcher Verstärker ohne eine „Überallesgegenkopplung“ betrieben wird.

Weil Transistoren konstruktionsbedingt nichtlineare Bauelemente sind, ist es kaum möglich, damit einen Verstärker zu konstruieren, der ohne Gegenkopplung linear arbeitet. Ohne Gegenkopplung kann auch kein akzeptabler Dämpfungsfaktor zustandekommen. Es kann zwar jede einzelne Verstärkerstufe für sich gegengekoppelt werden, in der Ausgangsstufe entsteht dann aber zwangsläufig wieder TIM.

Zur Verbesserung aller Parameter eines Verstärkers bietet sich der Einbau einer starken Überallesgegenkopplung an. Das verbessert gleichzeitig auch den Dämpfungsfaktor.

Die Überallesgegenkopplung bemüht sich, die Ausgangsspannung des Verstärkers proportional zur Eingangsspannung zu halten und steuert dementsprechend die Endtransistoren. Diese sind aber schon durch den phasenverschobenen Emitterstrom gegengekoppelt. Jetzt erst wird TIM erzeugt und wirkt sich auch aus, weil ein Mischprodukt aus zwei phasenunterschiedlichen Gegenkopplungen den Verstärker durcheinanderbringt. Diese Schaltung erzeugt den oft beklagten „Transistor-sound“ und tatsächlich ertönen handelsübliche Transistorverstärker – wenn auch unterschiedlich ausgeprägt – stets in diesem Klangbild.

### **Kann man TIM zu reduzieren...**

Oft wird versucht, einen Verstärker ohne Gegenkopplung zu konstruieren. Solche Verstärker weisen einen unakzeptablen Klirrfaktor auf und einen sehr geringen Dämpfungsfaktor.

Oder der Verstärker wird besonders „schnell“ gemacht, dass er auch als Radiosender antreten könnte. Der wird dann mit einer starken Gegenkopplung ausgestattet. Diese Gegenkopplung könnte die durch den Emitterfolger verursachte Verzerrung korrigieren. TIM wird es ja erst, wenn diese Verzerrung nicht korrigiert wird und im Audiofrequenzspektrum liegt. Ein solcher Verstärker weist oft einen niedrigen Klirrfaktor auf und einen hohen Dämpfungsfaktor. Ob und wie stark sich TIM hier noch bemerkbar macht, kann nicht generell beurteilt werden. Derartige Verstärker zu bauen, ist aber sehr aufwendig und dementsprechend teuer.

### **... oder TIM vermeiden?**

**Zur Vermeidung von TIM muss ein Verstärker so konstruiert werden, dass an seinem Ausgang Emitterfolgerverzerrungen gar nicht erst entstehen, weil er nämlich gar kein Emitterfolger ist. Eine solche Schaltung kann beliebig stark gegengekoppelt werden, Dadurch wird der Klirrfaktor sehr klein und TIM tritt überhaupt nicht auf. Obendrein hat dieser Verstärker einen sehr hohen Dämpfungsfaktor.**

Die HiFi-Welt wird immer wieder mit grandiosen Messwerten in Erstaunen versetzt. Verstärker brillieren mit Spitzenwerten bei Klirr und TIM – oft unterhalb der Messbarkeitsgrenze. Gemessen wird aber allgemein immer noch an rein ohmschen Lastwiderständen. TIM und Klirrfaktor entstehen aber erst an komplexer Last, wenn zum Beispiel ein Lautsprecher anzutreiben ist.

**TIM oder Intermodulationsverzerrungen war hier das Thema. Und immer wieder holt uns die Frage ein, warum um alles in der Welt eine Gegenkopplung schlecht sein soll. Konstrukteure und Journalisten akzeptieren offensichtlich kritiklos, dass es so ist. Ist es aber nicht! Das sollte eigentlich hiermit geklärt sein.**

Matti Ojala, ein Professor aus Finnland, hat sich in den 70ern des vorigen Jahrhunderts als Autorität in Sachen HiFi einen Namen gemacht. Er bevorzugte – wie alle damals – den Transistor und bewegte sich in der Welt des Emitterfolgers. Es mag wohl angehen, dass die Verteufelung der Gegenkopplung von ihm ausging. Er hat sich damals sehr engagiert mit dem Thema TIM befasst – wahrscheinlich hat er TIM sogar „erfunden“. Ojala war allerdings kein blasser Theoretiker; er baute nämlich auch Verstärker. Für seine Zeit sehr gute sogar – konsequenterweise natürlich ohne Gegenkopplung.

ABACUS hat an der Röhre gelernt, bevorzugt aber wie Ojala Transistoren. Die werden dann laut „Spiegel“ (anno 1985) auf den Kopf gestellt. So einfach ist das! Wem das zu simpel ist, dem sei verraten: Der ABACUS ist ein Transkonduktanzverstärker, ganz ohne TIM, kaum nachweisbarem Klirr und 100% Gegenkopplung – alles gemessen mit 'nem richtigen Lautsprecher dran.

**September 2009 - khs**