



TIM (transiente Intermodulationsverzerrungen)

Matti Otala, finnischer Professor, hat sie „entdeckt“. Die in den frühen Jahren der Transistor-Verstärker entstandenen Probleme mit den stumpf wirkenden Klängen dieser Verstärkerart war wohl Anlass, diesen Verzerrungen den Kampf anzusagen. Röhrenverstärker dagegen klangen einfach „gut“. Da gab es kein TIM, und auch keine ungeradzahligen Harmonischen. Doch die in den weiteren Jahrzehnten verbesserte Halbleitertechnik sowie die stark verbesserten passiven Bauelemente brachten auch neue Verstärkerkonzepte auf Halbleiterbasis hervor. Somit sollte ein moderner Verstärker TIM-frei sein und in den Verzerrungswerten weit geringer als übliche Röhrenkonzepte, welche auch heute noch von einigen Anbietern zu haben sind.

Gerade ein entzerrtes Lautsprecherkonzept braucht aber unbedingt hohe Verstärkerleistung, gepaart mit extrem linearem Verhalten, was nur auf Halbleiterbasis gerechtfertigt ist.

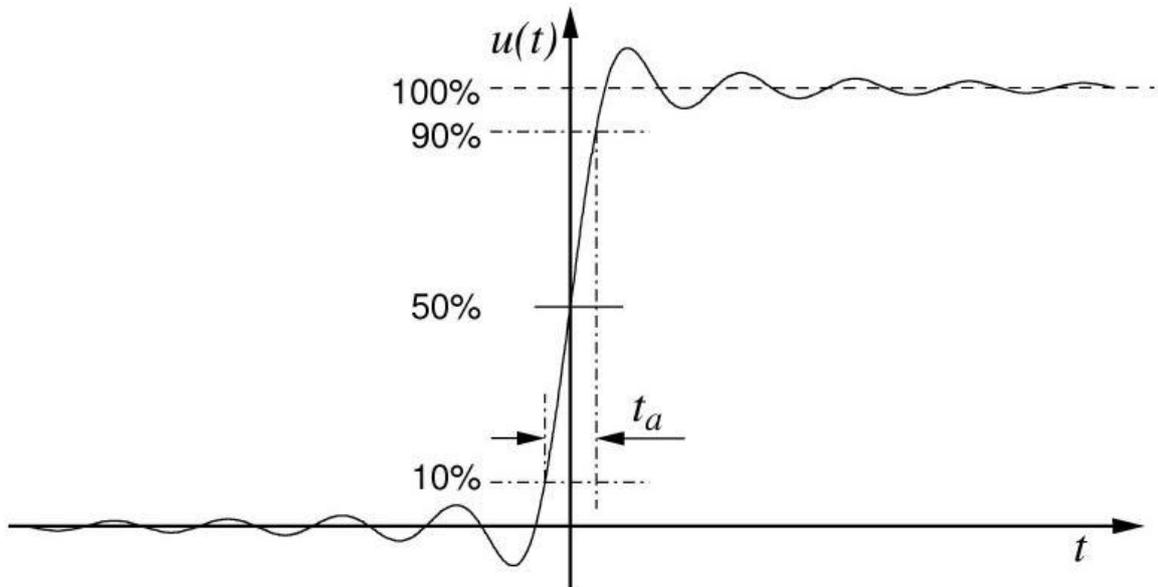
Doch hier sind die Verstärker höchst unterschiedlich zu werten. Nicht alle sind TIM-frei bzw. haben den „musikalischen“ Klang, der jede Darbietung unbeschwert abliefern kann, abliefern als Output an die angeschlossenen Lautsprecher. Insbesondere die Tatsache, dass natürlich auch noch durch die Membran-Vorauskorrektur erhöhte Anforderungen entstehen, spricht für MOSFET-Endstufenkonzepte. Doch damit ist nicht allein die Frage „TIM“ zu klären. Wichtiger ist die Frage der Gegenkopplung – über alles – und „lokal“. Hier beginnt die Frage der Vortreiber-Treiber-Endstufenschaltung. Frühe Halbleiterkonzepte mit der „Über-Alles-Gegenkopplung“ konnten zwar bei Sinus-Messungen extrem geringe Klirrfaktoren aufweisen, jedoch war der Klang teils stumpf und unmusikalisch, der Beiname „Transistor-Klang“ war geboren.

Um niedrige Impedanzen zu treiben, oder Leistungen abzugeben, sind komplette Schaltungen mit Über-Alles-Gegenkopplung gut geeignet, aber nur unter Einhaltung einiger wichtiger Bedingungen. Diese waren oder sind(!) nicht immer erfüllt, je nach Schaltungsbestückung bzw. Baustein. Dies gilt insbesondere für Audio-Operationsverstärker, bzw. für Endstufen, die nach diesem Prinzip als Leistungsverstärker aufgebaut sind. Daher sind nur wenige neuere und moderne Operationsverstärker als Audio-Verstärker geeignet. Für diese sowie auch für diskret bzw. gemischt aufgebaute Endstufen sollte stets darauf geachtet werden, dass

- 1. die Endstufen-Mosfets schneller schalten können als die Treiber bzw. Vortreiberstufen.*
- 2. Durch geeignete Treiber-Dimensionierung ist die schnellstmögliche Umladung der Mosfets zu realisieren.*
- 3. Die Art der Vortreiberschaltung hat direkten Einfluss auf die Frage, ob TIM entsteht oder nicht.*
- 4. Die Ausgangstransistoren/Mosfets sollten in Emitter- oder Sourceschaltung arbeiten.*

Eine langsamere Geschwindigkeit für die Vorstufen ist der beste Schutz vor dem Aufreißen der gegengekoppelten Schleife.

Denn ein schneller Impuls als Input wird dann nicht dafür sorgen, dass die Endstufen-Halbleiter „nicht mithalten“ und der sonst unweigerlich für einen kurzen Moment nicht in Phase befindliche Regelkreis versagt. Denn ein noch so kurzer Abrißvorgang der Gegenkopplung bewirkt ein „hochschießen“ der Verstärkung und die Vorstufe würde kurzzeitig übersteuert. Das transiente Ereignis wäre entstanden, und damit TIM.



Wie man aus Bild 1 erahnt, sollte die Zeitspanne t_a im Signal größer sein als die Zeit, die in der (langsameren) Leistungsendstufe benötigt wird zum Umschalten. Würde diese Bedingung nicht vorliegen, könnte das Inputsignal bereits bei 90% oder mehr angekommen sein, jedoch die Endstufe noch bei 10% oder weniger „hängen“. Doch damit wäre die Signalbedingung für die Gegenkopplung für diesen kurzen Zeitraum t_a völlig entgegen gesetzt zur normalen Bedingung, die ja das Outputsignal als Gegenkopplungssignal zum Eingang der Schaltung zurück führt.

Für den Bereich der fallenden Flanke gilt der Zusammenhang erst recht.

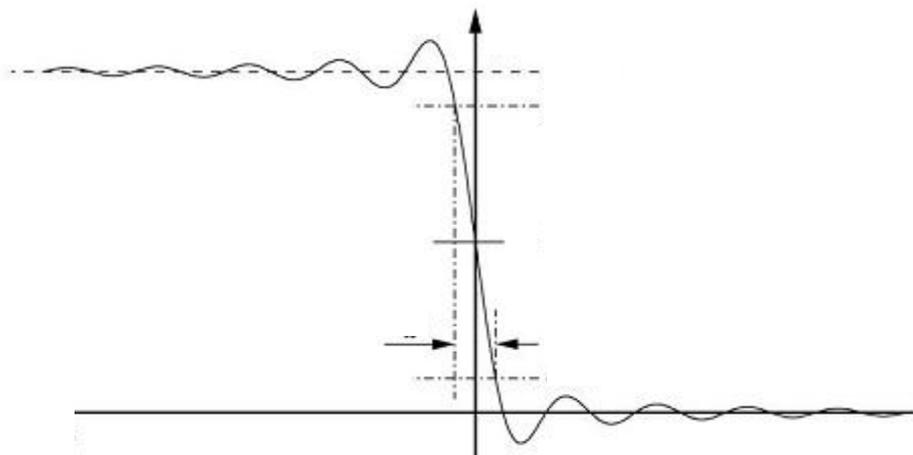


Bild 2: Fallende Flanke

Denn die Leistungshalbleiter haben oftmals ein langsames Ausräumverhalten in ihren Sperrschichten. Daher ist der Abschaltvorgang kritischer, weil stärker verzögert.

Hier würde also die Signalflanke am Eingang bereits auf Null gefallen sein, jedoch leitet die Ausgangsstufe noch mit 100% oder etwas weniger. Damit herrschen kurzzeitig falsche Bedingungen für einen Regelkreis, der auf stabile Phasenlage aufbaut. Das bedeutet normalerweise stets gleiche Phasenlage, die für eine Gegenkopplung nötige inverse Steuerung (-180°) wird meist durch eine geeignete Schaltung wie bei Operationsverstärkern mit invertierendem Eingang zur nötigen Drehung auf -180° benutzt, während das Inputsignal am nichtinvertierenden Eingang angelegt wird. Herrscht aber kurzzeitig eine Phasendrehung durch falsche Schaltzeitpunkte der Endstufe vor, eine Phasendrehung für extrem kurze Momente, ist genau für diesen kurzen Moment der invertierende Eingang mit dem Gegenkopplungssignal quasi doppelt invertiert, also gleichphasig mit dem eigentlichen Input-Signal. Dann passiert die ungewollte NICHTGEGENKOPPLUNG für diesen Zeitraum, die Schaltung gerät völlig in die Leerlaufverstärkung und verzerrt extrem, weil das Inputsignal für die nicht mehr gegengekoppelten Stufen dann viel zu hoch ist. Für die ganz genauen Betrachter sei erwähnt, dass die hier gezeigten Impulse nur Masse-Plus-Niveau haben, die Nulllinie könnte aber auch schon in den Bereich negativer Spannungen gehen, dann wäre es mit der Phase „richtiger beschrieben“. Jedoch ist auch die Frage, das Endstufen-Signal im Zeitpunkt t_a in der Amplitude zu betrachten, nicht falsch. Denn im Zeitraum der Störung ist diese entweder viel zu klein oder viel zu groß im Verhältnis zum Input.

Als „Bedingungen“ für (ungewollte) TIM sind also steilflankige Impulse nötig. Diese werden von den Instrumenten als Impulse geliefert, damit würden Geigen sicher leicht „kratzig“ wirken, oder sich dem Orchester ein leichter „Nebel“ überlagern. In weniger gut geeigneten Operationsverstärkern, welche in den Ausgangsstufen von CD-Playern für Filterstufen nötig sind, besteht oder bestand diese Gefahr. Demnach ist die Aufmerksamkeit für dieses Problem nicht einfach als Übertreibung in Sachen HighEnd zu sehen.

Das zu langsame Schaltverhalten der Leistungstransistoren oder von Mosfets (im Verhältnis zu den Kleinsignal-Transistoren) ist im Laufe der Entwicklung immer weiter verbessert worden. ICs (Operationsverstärker) sind nur bedingt für Audio-Anwendungen geeignet und hier ist der Grund für Tuning „vorprogrammiert“. Teilweise noch heute werden lieber billige ICs verwendet, um Kosten niedrig zu halten, statt optimalem Klang zu entsprechen.

Die früher verwendeten Operationsverstärker sind leider nicht immer frei von diesen TIM-Verzerrungen, und haben deshalb

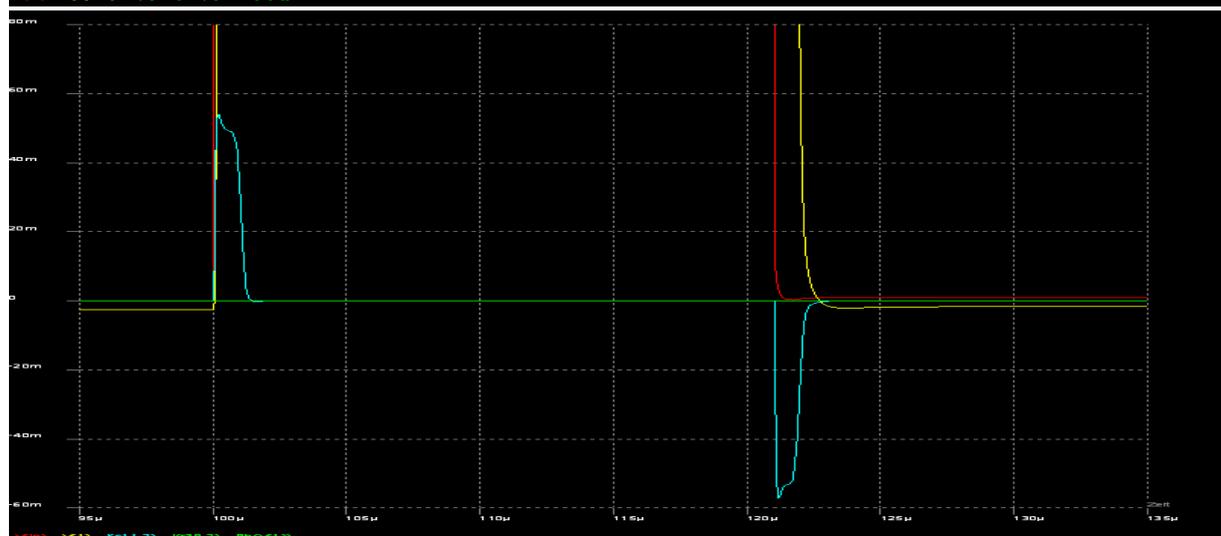
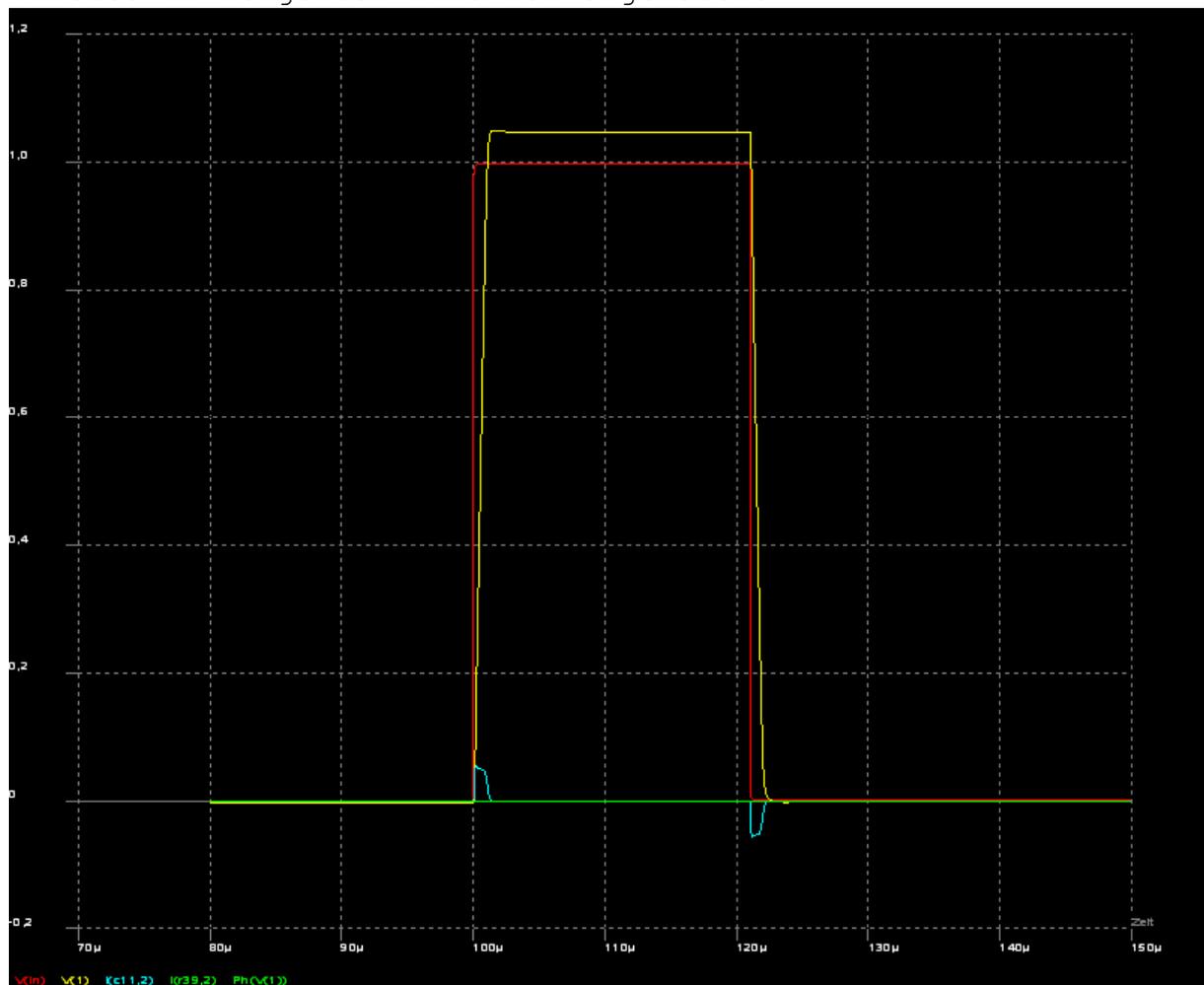
klanglich die gleiche Wirkung wie diskrete Konzepte der frühen Transistorschaltungen. Moderne Operationsverstärker - wenn sie für Audio-Anwendungen optimiert sind - haben je nach Typ - bessere Halbleiterstrukturen integriert oder wie bei den von mir eingesetzten Typen im getunten Entzerrer durchgängig im Signalweg FETs. Diese sind klanglich besonders gut. Denn wie bei Röhren entstehen keine ungeradzahigen Harmonischen. Diese sind für das Gehör schnell als stumpf und unmusikalisch ausgemacht. Dass die geradzahigen Harmonischen sehr gering sind, also Klirrfaktoren um 0,0003% / 1kHz / V=1 betragen, sei gegenüber Röhren ausdrücklich erwähnt. Auch die Frage der sog. Slew Rate stellt sich als Maß dar, je höher der Wert, je eher könnte man von TIM-frei ausgehen.

Somit kann „seidenweicher“, impulsiver Klang und beste Musikalität erreicht werden, und die Frage TIM gehört (eigentlich) der Vergangenheit an. Es muß also keine Röhre „glimmen“, um Wärme im Klang zu haben. Wie gleich erwähnt, gilt diese Feststellung aber **nur** dann, wenn die zu treibende Last oder die Verbindung dahin keine komplexe Last darstellt!

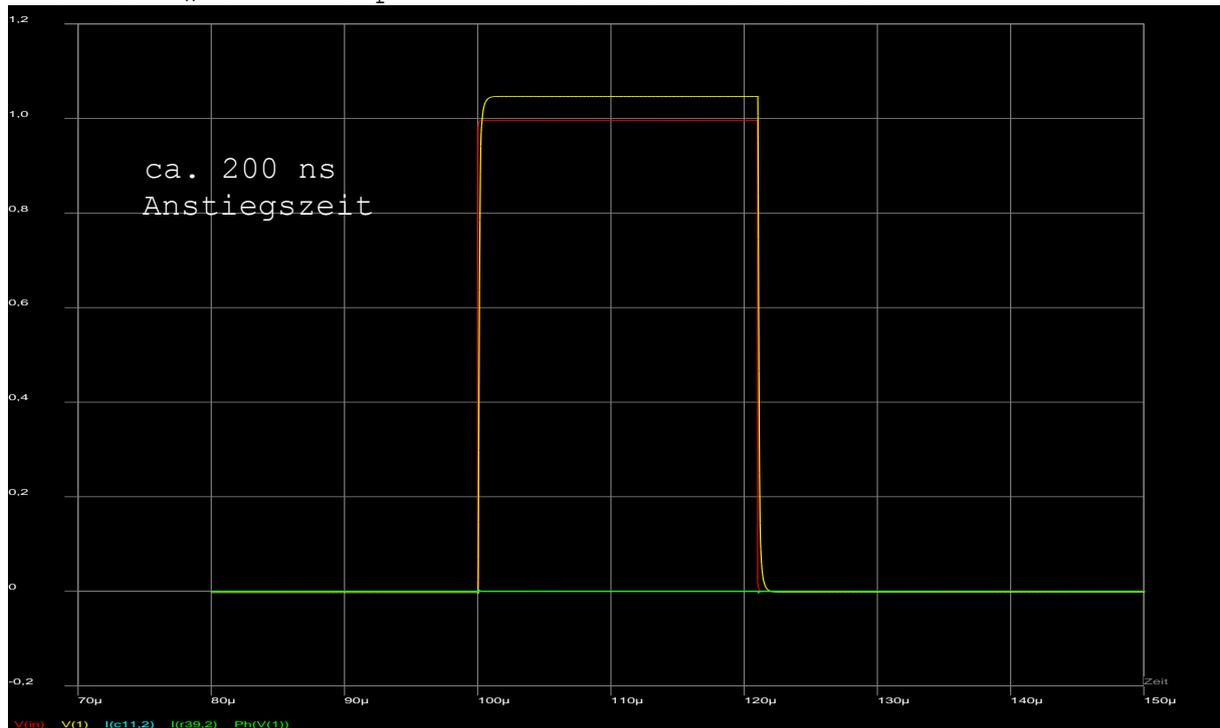
Ein neu entwickelter, DC-Transkonduktanz-Line-Treiber wird hier demnächst vorgestellt. Der Grund ist folgender: TIM kann wie oben erörtert auch entstehen, wenn die Auskopplung wie in fast allen Schaltungen (Endstufen, ICs) als Emitterfolger oder Sourcefolger ausgeführt ist. Diese reagieren bei komplexer Last mit TIM. Der Autor wurde nämlich selbst überrascht, als der Austausch der relativ kurzen Cinch-Leitungen durch hochwertige Kabel mit guten Steckern erledigt war. Vorher bestanden die Verbindungen mit den Zubehör-Kabeln (die, die bei den Geräten beiliegen). Die besseren, ebenfalls sehr kurzen Verbindungen mit den hochwertigen Steckern wurden eigentlich deshalb angefertigt, weil die Kontaktsicherheit und die gute Handhabung im Vordergrund standen. Die klangliche Auswirkung war aber dann trotz Kabellängen um oder unter 1m zu den einzelnen Bausteinen (CD-Player, Preamp, Entzerrer und Endstufe) eine echte Überraschung! Die jetzt deutliche verbesserte Klarheit war so nicht erwartet worden. Doch hier soll hervor gehoben werden, dass das den Ausgangsstufen der Geräte anzulasten ist! Diese verursachen mehr oder weniger TIM, wenn komplexe Last (Kabelkapazität usw.) zu treiben ist. Nicht etwa „die Kabel klingen besser“, wie unsinnigerweise oft berichtet wird, sondern die Ausgangsstufen können damit besser korrespondieren. Deshalb ist eine stromsteuernde Ausgangsschaltung ohne Rückwirkung durch komplexe Last bestens geeignet, Kabel jeglicher Art und Qualität als „klanglich nicht relevant“ zu treiben. Das bedeutet, auch ein Kopfhörer, mit seiner relativ hohen Induktivität (dyn. Hörer) oder eine erhöhte kapazitive Belastung bei mehreren parallel betriebenen Leitungen würden hier den Line-Treiber nicht zu TIM bringen (s. pdf Line-Treiber-Preamp). S. a. bei pdf „Impedanzwandler mit Burr Brown IC“, wo Emitterfolger mit Emitterschaltung verglichen wird und eine wesentliche Feststellung gemacht

wird. Ein Emitterfolger erzeugt bei phasenverschobenen Strömen in die komplexe Last bei entsprechender hoher Frequenz selbst Verzerrungen. Der Beweis - wie entsprechende kapazitive Last beispielsweise wirkt, zeigt die Simulation. Der Lastwiderstand (hier 10 kOhm parallel 47 nF) ist zwar „derb“ dimensioniert, soll aber zeigen, wie die Wirkung auf die Ausgangsstufen ist. Aber auch bei nur 470 pF - eher ein normaler „Lastfall“, ist die Stromspitze für den Blindstromanteil beträchtlich!

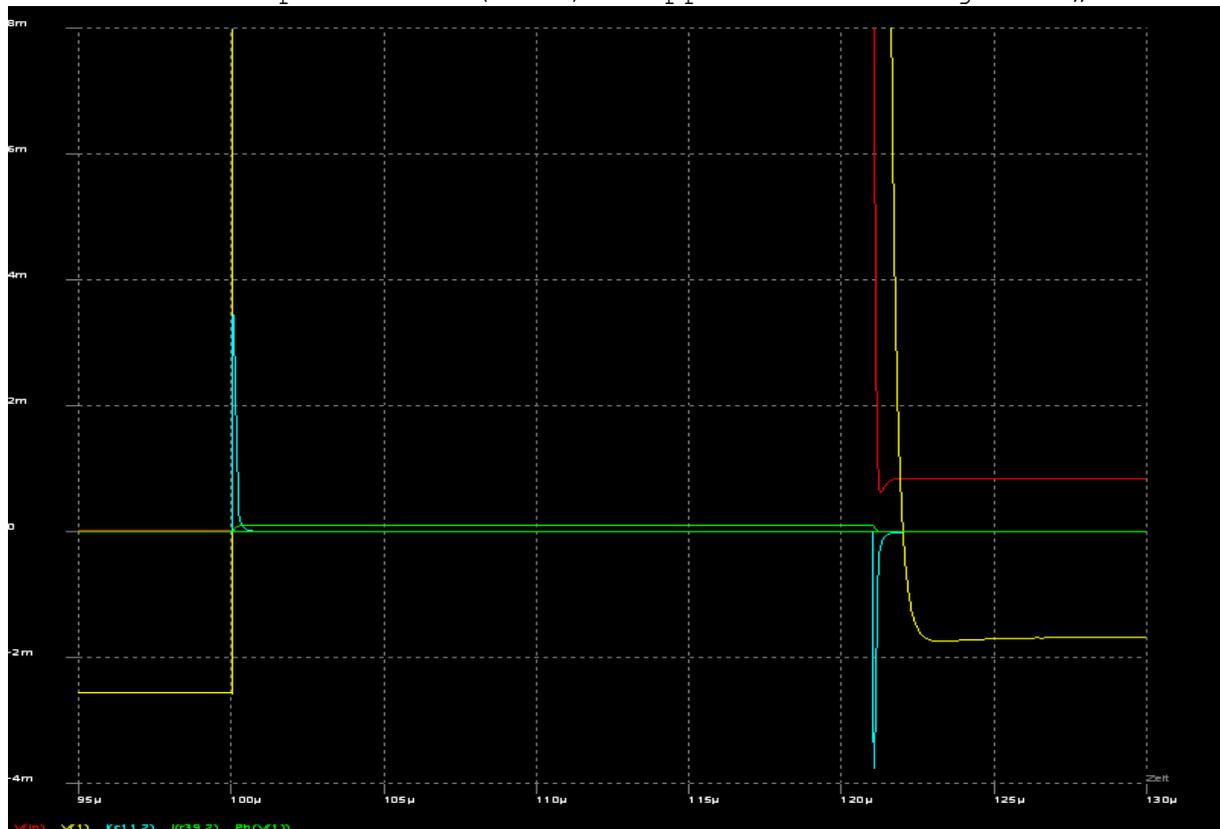
Die Inputkurve rot verglichen mit dem Output gelb zeigt zwar eine Zeitverschiebung in den Flanken (20 kHz RE), was dennoch wertmäßig als sehr schnell gelten darf. Die blaue Kurve zeigt den Umladestrom in dieser Zeit, welcher in die Kapazität fließt. Im folgenden Bild hervorgehoben.



Die blaue Kurve (Blindimpulsstrom durch die Kapazität) beträgt immerhin ± 60 mA!
Hier bei „nur“ 470 pF an 10 kOhm die Stromlast:



Hier die vertikal gedehnte Darstellung
Die Ladestromspitze ist (blau) knapp ± 4 mA. Die grüne „Kurve“



Stellt den realen Anteil durch den Lastwiderstand 10 kOhm dar. Dadurch wird unterstrichen, dass die Betrachtung der Blindströme durch Parallellasten wie Kapazitäten ein

beträchtliches Maß erreichen. Diese dürfen nicht zu zusätzlichen Verzerrungen führen, weil die Endstufen (gemeint sind die in ICs oder konventionellen Ausgangsstufen der Vorverstärker oder Geräte wie CD-Player usw.) überlastet werden.

Die Beispiele mögen dazu dienen, die Sensibilität gegenüber Opamps zu belegen, denn der Line-Treiber ist ein konventionell (Transistoren und Mosfets) aufgebauter Baustein mit überragender Klangqualität. Betont wird nochmals ausdrücklich, die Signalabnahme an den Drainanschlüssen (Transkonduktanzverstärker) ist in Verbindung mit der Gesamtschaltung ein Baustein im absoluten HighEnd-Bereich.