Desaturate – nachträgliches Entfernen nichtlinearer Verzerrungen von Tonbandaufnahmen (eine Machbarkeitsstudie)

v 0.6d

Bekannterweise ist die magnetische Kennlinie (Remanenz) von Tonbändern nichtlinear. Neben der Sättigung bei hohen Feldstärken stört auch die Hysterese, also die Eigenschaft des Bandes, sich erst ab einer gewissen Mindestfeldstärke in die entgegengesetzte Richtung magnetisieren zu lassen.
Durch Überlagerung einer Hochfrequenz (typischerweise 60 kHz bei Kassettentonbandgeräten) lassen sich Auswirkungen der Hysterese weitgehend unterdrücken. Das Problem der nichtlinearen Kennlinie zu hohen Sättigungen hin bleibt jedoch bestehen.

Wir wollen im Folgenden untersuchen, wie stark dieser Einfluss der Kennlinie sich auf ein Signal auswirkt, und ob sich diese Nichtlinearität prinzipiell auch noch im Nachhinein, also aus einer digitalisierten Tonbandaufnahme entfernen lässt.

Ein kurzer Exkurs in die Tonbandtechnik

Um den Störabstand des Bandmaterials optimal auszunutzen, werden bei der Tonbandaufzeichnung die Höhen abgesenkt und die Tiefen angehoben. (Zur Zeit der Festlegung dieser Norm waren Audio-Signale noch nicht so tiefenlastig wie heute. In diesem Frequenzbereich waren weniger Signalanteile enthalten als im Mittenbereich. Man konnte ihn daher bedenkenlos anheben. Durch die Anhebung vor der Aufzeichnung und die Absenkung bei der Wiedergabe wird das grobe Funkelrauschen und eventuelle Brummeinstreuungen abgesenkt. Der Abstand zwischen Rauschen und Nutzsignal verbessert sich.)

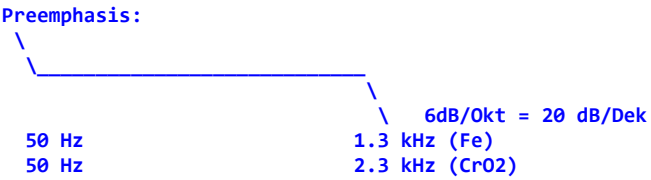

Abb 1: Aufnahme-Entzerrung (PreEmphasis) bei Kassetten

Für die Emphasis/Deemphasis-Filter gelten folgende Eckfrequenzen:

Bandtyp	Tiefenanhebung	Höhenabsenkung
I Ferrum / III FerroChrom	τ = 3180 µs fg = 50 Hz	τ = 120 µs fg = 1326 Hz
II CrO2 / IV Metal	wie oben	τ = 70 µs fg = 2273 Hz

Eisenoxid-Bänder (Typ I) und das schnell wieder aus der Mode gekommene Zweischichtband (Typ III, FerroChrom) verwenden das selbe Filter. Die zweite Filterfrequenz findet Anwendung bei Chromdioxidbändern (Typ II) und Metalbändern (Typ IV).

Insgesamt durchläuft das Audio-Signal bis zur Wiedergabe folgende Stufen:
1. Ein Tiefenanhebung und Höhenabsenkung (Emphasis)
2. Die Aufzeichnung mit nichtlinearer Kennlinie
3. Eine Tiefenabsenkung und Höhenanhebung (De-Emphasis)

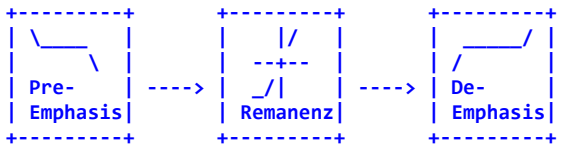

Abb 2: Pre-Emphasis, nichtlineare Kennlinie und De-Emphasis

Anmerkung: Die genauen Verhältnisse sind noch etwas komplizierter. Da der Wiedergabetonkopf höhere Frequenzen mit einem Anstieg von +6 dB pro Oktave stärker wiedergibt, als niedrige, muss eine zusätzlich generelle Absenkung um –6 dB pro Oktave eingebaut werden, die um die beiden zusätzlichen Deemphasis-Filter ergänzt wird. Dies spielt für unsere Betrachtungen jedoch keine Rolle, da dies nur die Übertragungsfunktion des Wiedergabekopfes kompensiert.

Um die Auswirkungen der nichtlinearen Kennlinie zu kompensieren, muss diese ganze Prozedur rückwärts durchlaufen werden. bzw. genauer ausgedrückt

1. Höhen müssen wieder abgesenkt, und Tiefen angehoben werden (so, wie sie auf dem Band gespeichert sind)
2. die invertierte Kennlinie ist anzuwenden
3. Höhen sind anzuheben und Tiefen abzusenken (inverse Emphasis)

Die folgende Abbildung verdeutlicht die nichtlinearen Eigenschaften des Bandes. Wir haben zwei verschiedene nichtlineare Effekte – die Hysterese im Nulldurchgang und die Sättigung bei großen Feldstärken.
Der Einfluss der Hysterese wird kompensiert, indem dem Signal eine zusätzliche Hochfrequenz überlagert wird (meist aus dem ohnehin vorhandenen Löschgenerator – typischerweise ca. 60 kHz).

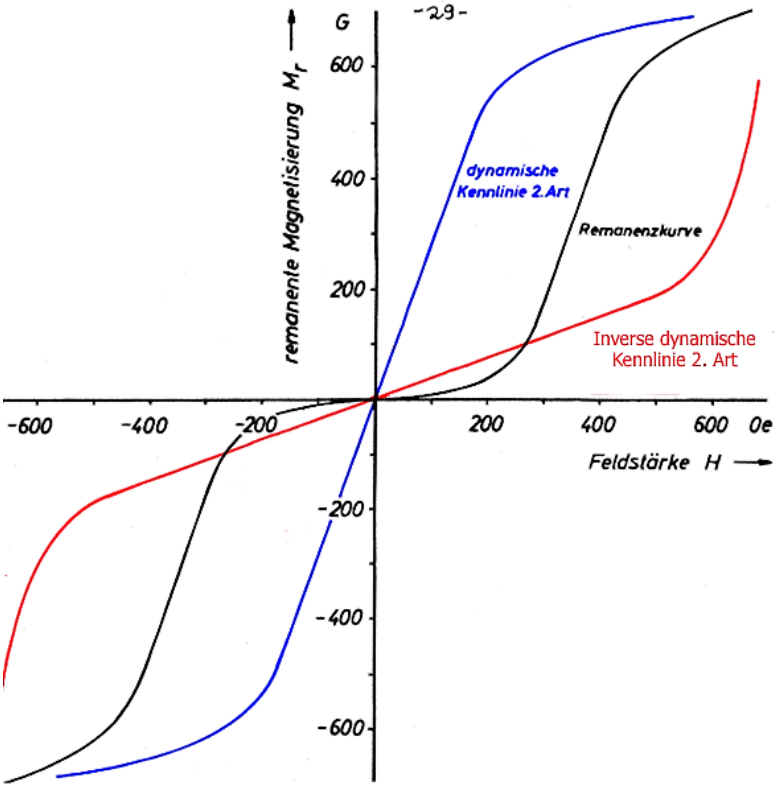

Abb 3: Nichtlineare Kennlinie (von www.magnetbandmuseum.info)

Schwarze Kurve – Remanenz, also die Mangnetisierbarkeit des Bandes mit Hysterese
Blaue Kurve – linearisierte Bandkennlinie, die durch Überlagerung von HF entsteht (auch als dynamische Kennline 2. Art bezeichnet)
Rote Kurve – invertierte dynamische Kennline 2. Art (Vertauschung von x- und y Achse)

Praktische Versuche

Nach diesen theoretischen Überlegungen wollen wir uns ansehen, wie groß die Verzerrungen bei einer realen Kassettentonbandaufnahme sind.
Wir basteln uns zunächst ein Testsignal mit einer Sinusfrequenz von 500 Hz (also außerhalb der beiden Filterfrequenzen).

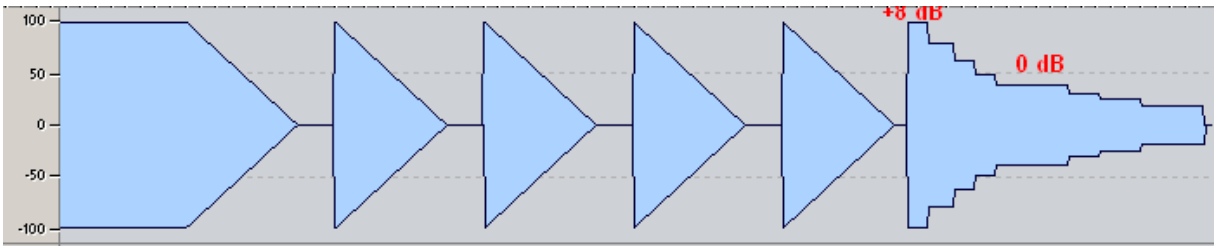

Abb 4: Testsignale (500 Hz mit Rampen und 2 dB Abstufungen)

Der erste Abschnitt besitzt maximale Amplitude und dient zum Einpegeln des Kassettenrecorders. Es folgen sägezahnförmige Abschnitte mit einem linearen Abfall der Amplitude. Der letzte Abschnitt besitzt stufenweise Absenkungen um 2 dB.
Die Aussteueranzeige meines Kassettenrecorders endet bei + 8 dB. Empfohlen wird eine Aussteuerung bis 0 dB, und kurzzeitige Spitzen bis +6 dB sind erlaubt.

Dieses Signal habe ich ohne Verwendung einer Rauschunterdrückung auf eine Ferrum-Kassette aufgezeichnet und das Ergebnis wieder digitalisiert. Den Record-Level habe ich so eingestellt, dass im lautesten Teil +8 dB angezeigt wurden.

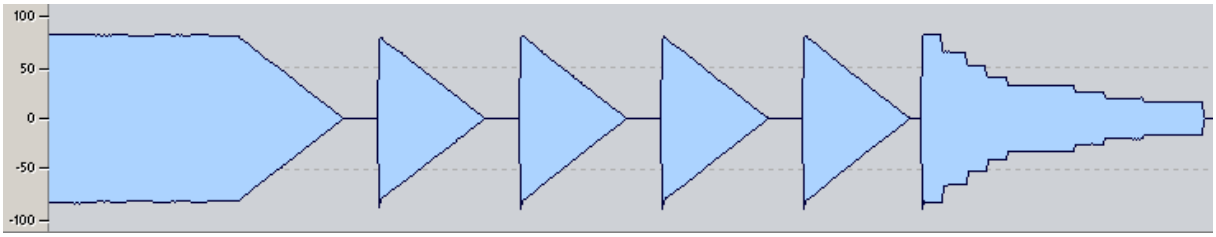

Abb 5: Das Testsignal aus der digitalisierten Bandaufnahme

Und so sieht das Ergebnis aus. Man erkennt kleine Amplitudenschwankungen durch Störungen im Bandlauf.

Als erstes wollen wir sehen, ob sich die (schon deutlich hörbaren) Verzerrungen bei Maximalaussteuerung sichtbar auswirken. Sie wären als Abweichungen von der Sägezahnform der Hüllkurve zu erwarten.

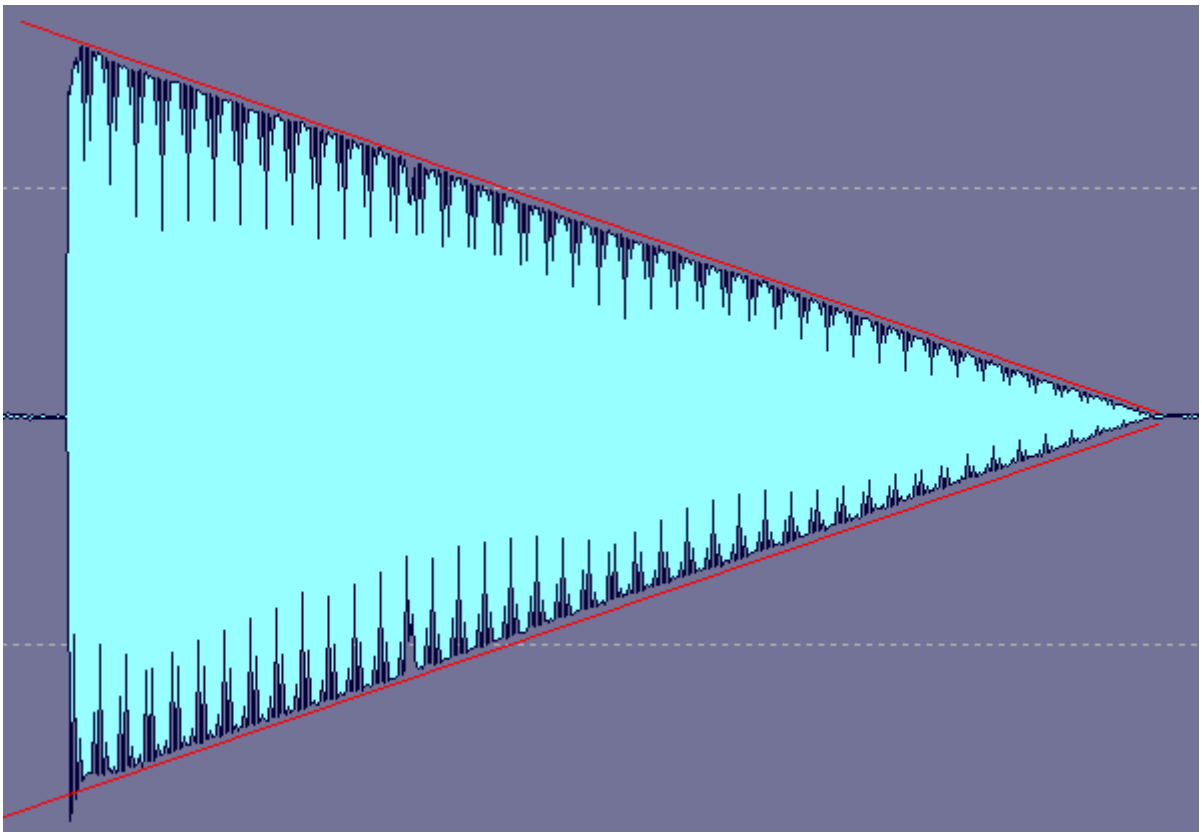

Abb 6: Linearer Abfall aus der Testaufnahme in Vergrößerung

Wie wir sehen, sind die Abweichungen vom linearen Verlauf so gering, dass wir sie praktisch nicht sehen. Dies korrespondiert zu der Aussage, dass Verzerrungen guter Kassettenrecorder nur im Bereich von 2…3 % liegen – das ist nicht schlechter als das, was auch normale billige Lautsprecher zur Verzerrung beitragen.
Doch das Ohr hört diese Verzerrungen deutlich.

Einen genaueren Blick erreichen wir per FFT, indem wir uns das Spektrum des aufgezeichneten Signals ansehen. Hier fällt auf, dass in der Aufzeichnung neben dem Eingangssignal von 500 Hz nun auch Oberwellen auftauchen, die im Eingangssignal gar nicht enthalten waren. Hier fallen vor allem die 3-fache Signalfrequenz (1.5 kHz) und die 5-fache Signalfrequenz ins Auge (2.5 kHz).

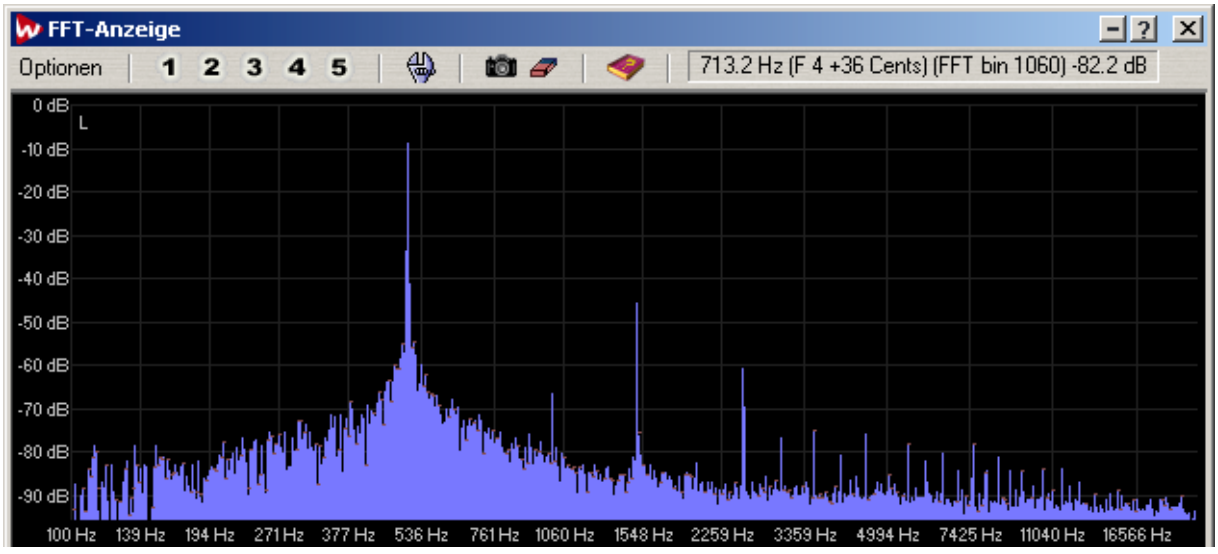

Abb 7: FFT des lautesten Abschnitts der Testaufnahme (500 Hz Sinus)

Nun wollen wir sehen, ob sich diese Verzerrungen nachträglich durch Anwenden einer nichtlinearen Kennlinie auf das Signal reduzieren lassen. Hierzu habe ich in Wavelab den invertierten Signalweg wie oben beschrieben nachgebildet.
Das entscheidende Glied ist hierbei die nichtlineare Kennlinie. Mit dem Plugin „Cyanide 2“ von Bram de Jong lassen sich beliebige Kennlinien einrichten.

Im ersten Versuch habe ich eine invertierte dynamische Kennlinie der 2. Art gemalt, so wie sie aus Abbildung 3 erwartbar ist. In der FFT erhielt ich damit jedoch *mehr* Verzerrungen (mehr Harmonische) als vorher. Das ist auch zu erwarten, denn wir wissen gar nicht, bis zu welchem Punkt die Kennlinie in einem realen Kassettenrecorder ausgefahren wurde. Wir erzeugen also mit einer falschen Kompensation noch mehr Fehler.

Daher wechselte ich auf einen rein empirischen Ansatz. Ich spielte das lauteste Testsignal aus der Aufnahme in einer Endlosschleife ab und lies mir dazu die FFT anzeigen. Nun spielte ich an der nichtlinearen Kurve und beobachtete dabei, wie sich die Höhe der unerwünschten Spektrallinien veränderte.
Man kommt mit dieser Methode relativ schnell zu einer Annäherung an eine bessere Kurvenform. Die folgende Abbildung zeigt die so gewonnene Korrekturkurve.

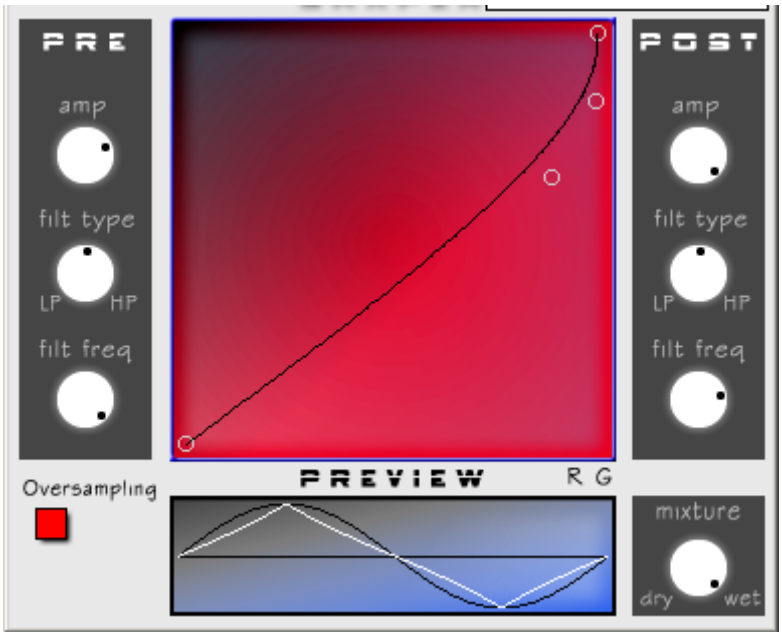

Abb 8: Korrekturkurve für eine Aufzeichnung mit + 8 dB auf einer Ferrum-Kassette

In der folgenden Abbildung habe ich die resultierenden Oberwellen (rot) den original enthaltenen Verzerrungen gegenübergestellt. Man sieht, dass sich nach Anwendung der Kompensation der Anteil der ersten Oberwelle bei 1500 Hz um –6 dB reduziert.

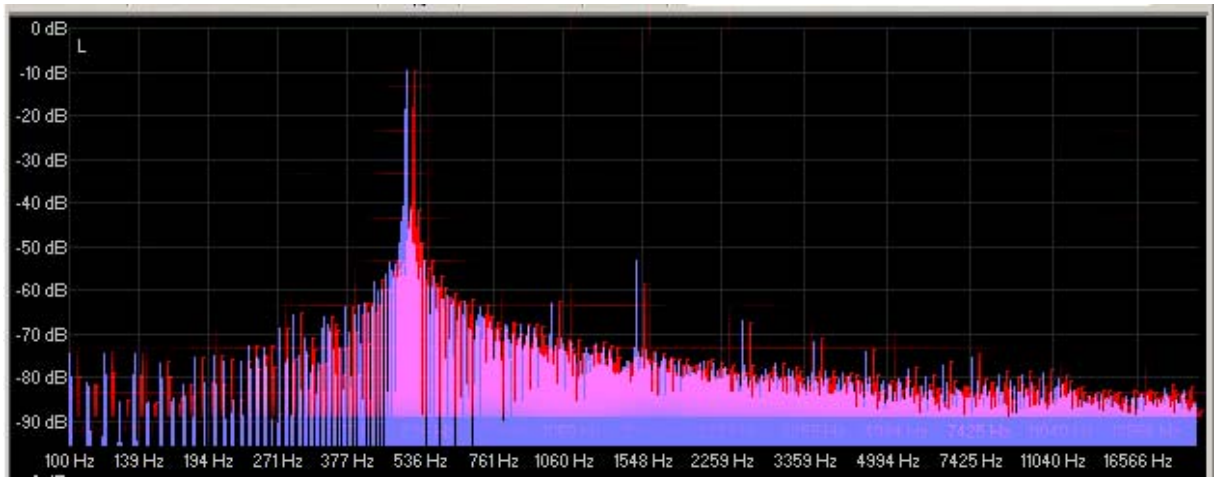

Abb 9: Vergleich der Oberwellen aus der Aufzeichnung mit den reduzierten Oberwellen nach Anwendung der nichtlinearen Kennlinie(rot)

Probleme des Verfahrens

Eine gemischte Anwendung von linearen Filtern und nichtlinearen Verfahren (Amplitudenkennlinie) ist eine recht trickreiche Geschichte. Wir müssen nämlich erreichen, dass das Signal nicht nur im Frequenzgang wieder dem entspricht, was auf Band aufgezeichnet wurde, sondern auch im Phasengang (!). Denn erst durch die korrekte Phasenlage der verschiedenen Teilfrequenzen zueinander entsteht wieder die originale Amplitudenform, mit der das Signal auf Band gespeichert war.

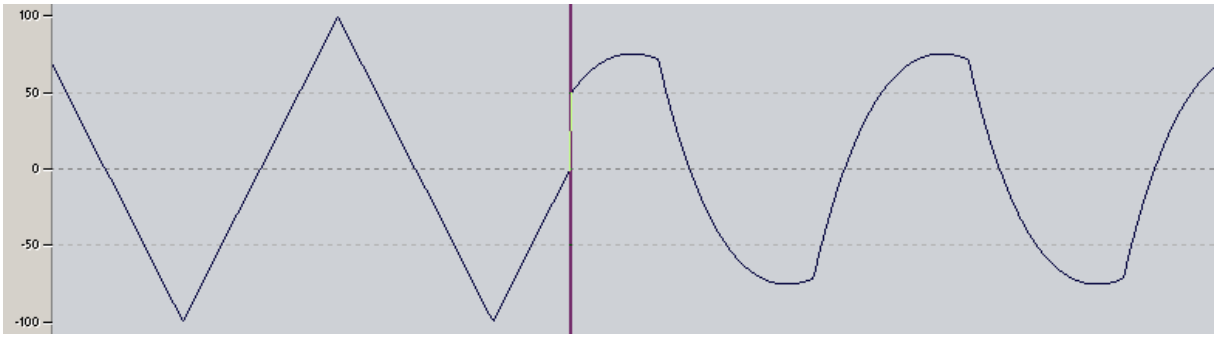

Abb 10: Ein Dreiecksignal und das selbe Signal nach Durchlaufen eines Allpass-Filters, der den Phasengang ändert, aber den Anteil der enthaltenen Oberwellen nicht beeinflusst(hier 220 Hz Signal und 2 kHz Allpass)

Wenn unsere Korrekturfilter andere Phasengänge erzeugen, als die im Kassettengerät verwendeten R-C-Netzwerke, so entsteht bei der Rekonstruktion eine völlig andere Form des Signals, und folglich wird diese durch Anwendung einer Kennlinie dann auch falsch verändert.

Dieses Problem ist nicht trivial. Die in VST Plugins angebotenen Filter haben meist viel zu steile Kennlinien (12 dB pro Oktave statt 6 dB pro Oktave von einfachen RC Gliedern), und diese Digitalfilter haben auch ein anderes Phasenverhalten als RC Filter.
Ich habe bisher kein Plugin gefunden, das den Frequenz und Phasengang von RC-Filtern gut nachbildet.
(Die Bezeichnung „analog“ z.B. beim Plugin „Electri-Q“ bedeutet nicht, dass hier ein analoges Filter simuliert wird, sondern sie meint nur die Einführung zusätzlicher Verzerrungen, wie sie bei Transistorverstärkern vorkommen. Das ist etwas völlig anderes, als das, was wir hier benötigen.)

Schlussfolgerungen

Die Verzerrungen durch die nichtlineare Kennlinie von Tonbandkassetten können prinzipiell auch nachträglich noch aus Aufnahmen entfernt werden.
Es ist jedoch erforderlich, dass die Kompensationskennlinie auf den realen verwendeten Bandtyp eingemessen wird. Bei einer pauschalen Korrekturkennlinie für alle Bandtypen würden in vielen Fällen zusätzliche Verzerrungen entstehen. Ein hinreichend genauer Abgleich nach Gehör oder optischen Kriterien (sichtbare Kennlinie) scheint ausgeschlossen zu sein.
Außerdem besteht eine Schwierigkeit darin, digitale Filter zu finden, die den invertierten Frequenz- und Phasengang der RC-Netzwerke aus den Wiedergabeverstärkern korrekt nachbilden.

Sven@engon.de
6.4.2012

Anhang 1 – Frequenz und Phasengang eines realen Wiedergabeverstärkers

Zunächst ein wenig Theorie: Der Aufnahmekopf eines Tonbandgerätes wird meist aus einer Stromquelle gespeist, was die Frequenzabhängigkeit des entstehenden Magnetfeldes vermeidet (Abb. 11b im Vergleich zu 11a). Als Emphasis werden im Aufnahmezweig die Tiefen angehoben und die Höhen abgesenkt (11c). Da es zu hohen Frequenzen hin Verluste bei der Aufzeichnung gibt, werden im realen Fall jedoch die Höhen sogar teilweise angehoben. Zu der vorgeschriebenen Emphasis kommen also geräteabhängige Filterkennlinien hinzu (11e).

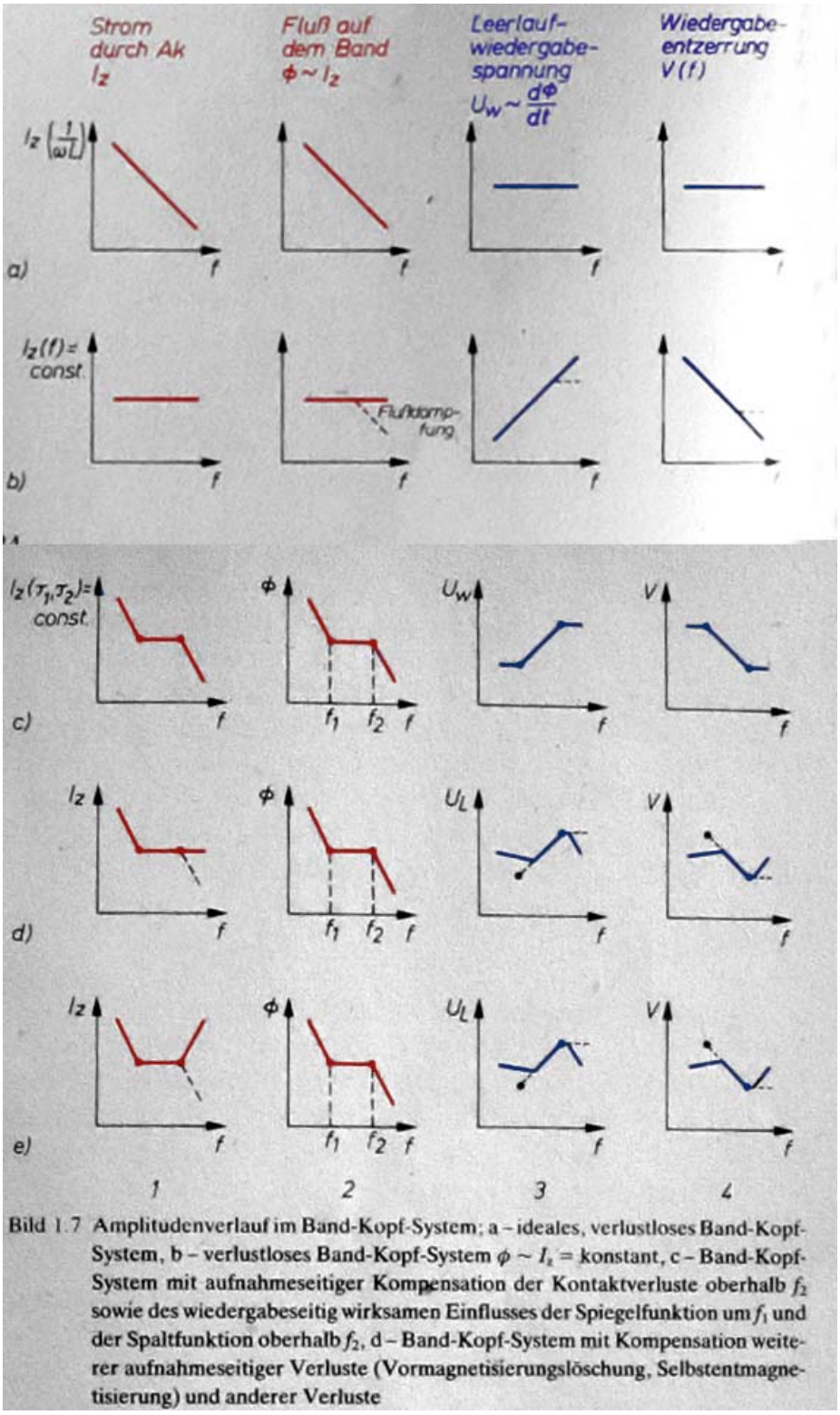

Bild 1.7 Amplitudenverlauf im Band-Kopf-System; a – ideales, verlustloses Band-Kopf-System, b – verlustloses Band-Kopf-System $\phi \sim I_z$ = konstant, c – Band-Kopf-System mit aufnahmeseitiger Kompensation der Kontaktverluste oberhalb f_2 sowie des wiedergabeseitig wirksamen Einflusses der Spiegelfunktion um f_1 und der Spaltfunktion oberhalb f_2, d – Band-Kopf-System mit Kompensation weiterer aufnahmeseitiger Verluste (Vormagnetisierungslöschung, Selbstentmagnetisierung) und anderer Verluste

Abb 11: Frequenz- und Phasengang eines realen Wiedergabeverstärkers aus einem Kassettendeck

Bei der Wiedergabe arbeitet der Tonkopf meist als Spannungsquelle (f in 11b), wodurch die Wiedergabespannung mit 6 dB pro Oktave ansteigt. Diese Übertragungsfunktion des Kopfes wird mit einem 6 dB/Okt Abfall im Wiedergabeverstärker kompensiert (4 in 11b). Hinzu kommt die Deemphasis, also eine Absenkung der Frequenzen unter 50 Hz und eine Anhebung der Höhen entsprechend der für den Bandtyp vorgeschriebenen Zeitkonstante (f_2 = 1,3 kHz oder 2,3 kHz) (Abb. 11c). Bei sehr teuren Geräten sind weitere Kompensationen der geräteabhängigen Frequenzgangeinflüsse möglich (Abb. 11e)

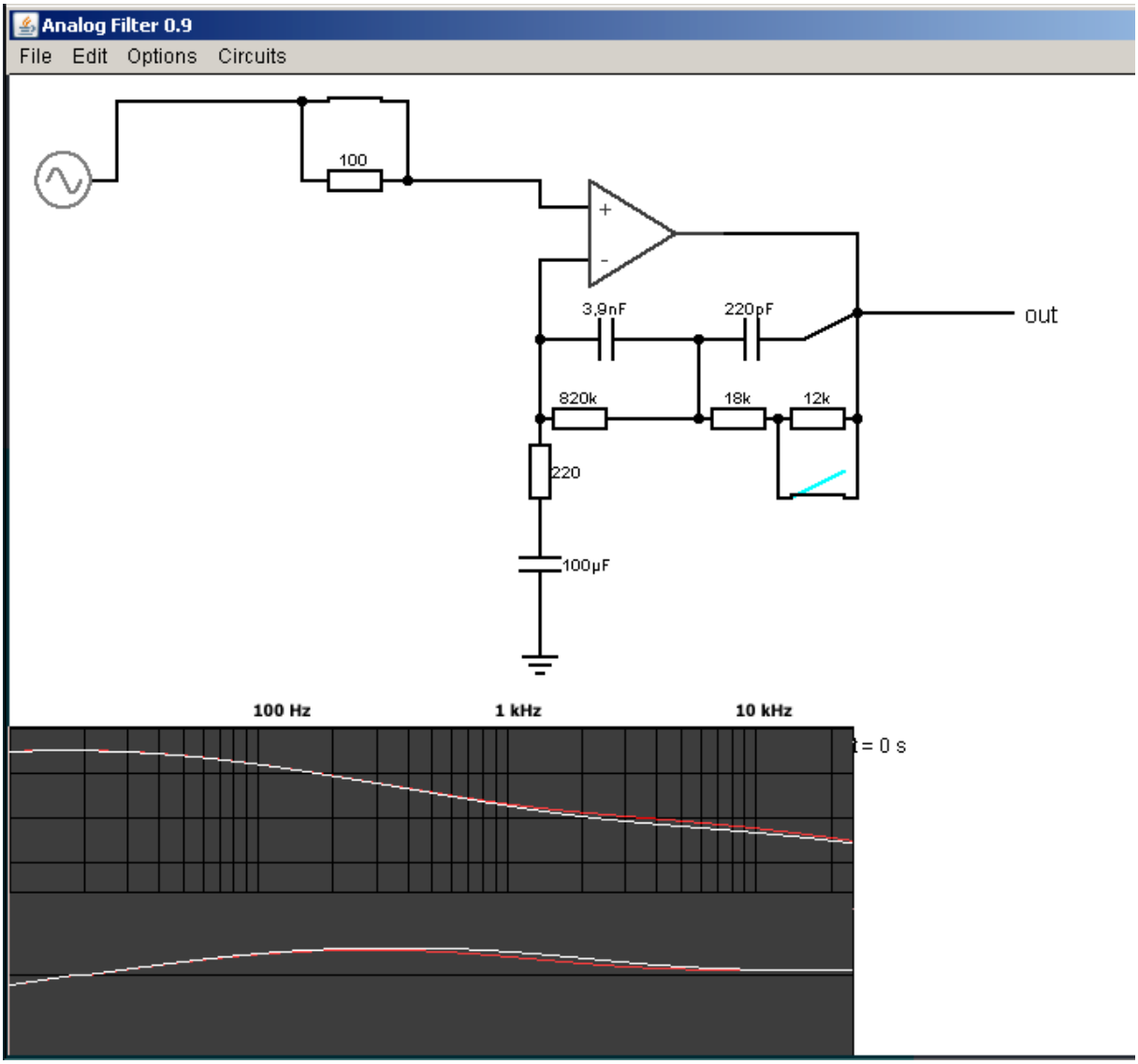

Abb 12: Frequenz- und Phasengang eines realen Wiedergabeverstärkers aus einem Kassettendeck (rote Kurve: Umschaltung zwischen Typ I und Typ II)

Abbildung 12 zeigt den simulierten Frequenz- und Phasengang eines realen Wiedergabeverstärkers aus einem guten Kassettendeck. Man erkennt den generellen 6 dB/Okt Abfall, der die Kennlinie des Wiedergabekopfes kompensiert. Dem überlagert ist die Deemphasis, also eine Absenkung unterhalb von 50 Hz und eine Anhebung oberhalb von 1,3 kHz bzw. 2,3 kHz.

Anhang 2 – ein paar Bemerkungen zu Pegelangaben in Tonbandgeräten

Die dB-Skalierung der Pegelanzeigen ist völlig willkürlich. Jeder Recorderhersteller legte sie anders, manchmal wechselte es auch mit den Modelljahren.
Pioneer war da radikal, die hatten den Nullpunkt AFAIR bei 160 nWb/m, weils cool aussieht, wenn man eine IEC 1-Kassette bis +8 dB aussteuern kann und eine IEC 4 bis +10 dB. Der Pegel kam da sogar hinter Band wieder raus.
Einige Hersteller legten den Nullpunkt auf 200 nWb/m, andere auf 250 nWb/m.
Letztere Geräte ließen sich bei identischer Qualität halt nur bis +4 oder +5 dB aussteuern und hatten den gleichen Bandfluß aufgezeichnet.

Einziger Fixpunkt ist das Dolby Doppel-D-Symbol, das glaube ich bei 200 nWb/m liegt. Wobei: mein Pioneer hat das Doppel-D bei +3 dB, wenn der bei 160 nWb/m seinen Nullpunkt hat, wären das 230 nWb/m.

Quellen

Ulrich Blaese „Magnetische Schallspeichertechnik“ (electronica 219/220, 1984)

Frequenz und Phasengang einer analogen Schaltung wurden simuliert mit der Freeware „Analog Filter 0.9“ http://www.falstad.com/afilter/

Email von Christian zu den Pegelangaben in Tonbandgeräten