Intro

Die Klangqualität ist jetzt meßbar !

Entsprechen die Meßwerte von Verstärkern wirklich der Klangqualität?
Mit der großen Erfahrung in der meßtechnischen Analyse von Audiokomponenten haben Peter Schüller/ Laborleiter der bekannten Testzeitschrift Stereoplay und Johannes Maier ein innovatives Verfahren entwickelt, um den Zusammenhang zwischen den Meßwerten und der eigentlichen Klangqualität klar zu bestimmen.

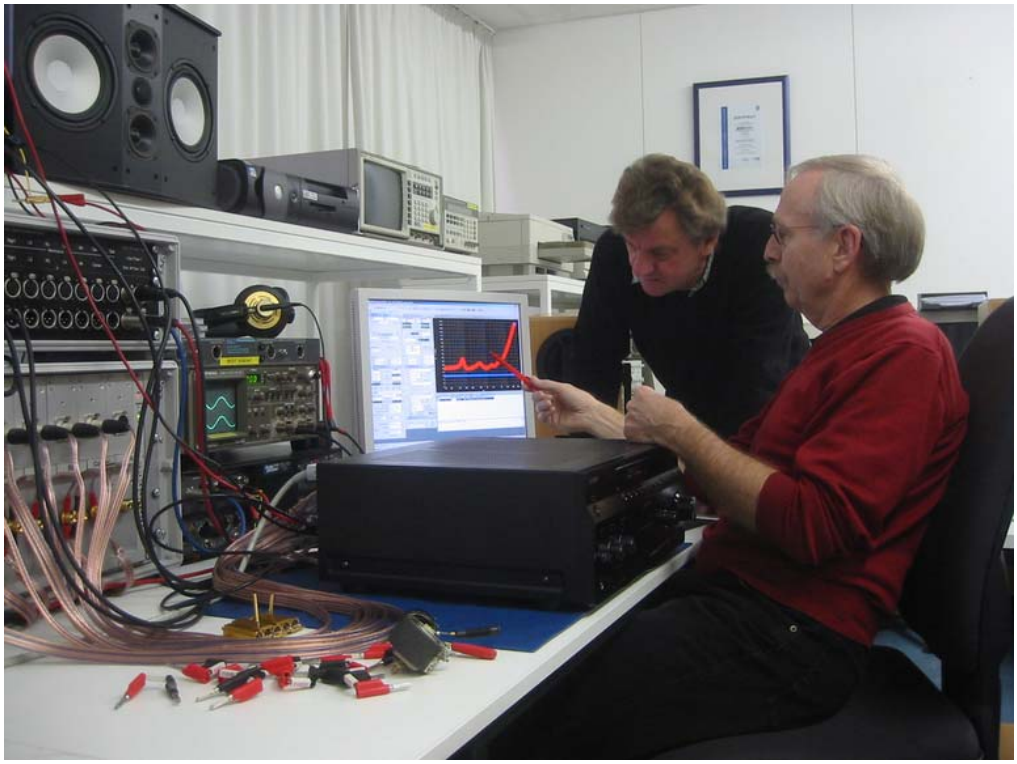
Der folgende Vortrag, gehalten auf der High-End Messe München 2012, gibt die entsprechenden Antworten

Intro

Now, the quality of sound can be measured!

Do amplifier measurement results really mirror the sound these amplifiers produce?
Based on his life-long experience on measurement and test technology Peter Schüller, the well known head of the Stuttgart (Germany) based test lab of Germany's most important test magazine 'stereoplay', together with his colleague Johannes Maier, has developed an innovative approach to throw comprehensible light on the relationship between amp measurement results and the quality of sound of that specific amp.

Below we find Schüller's lecture he has held on the High-End Fair Munich 2012. It will answer the question from above.



Testredakteur Johannes Maier und Peter Schüller im Stereoplay Labor

Test editor Johannes Maier (left) and Peter Schüller at the lab's test bench

Peter Schüller im Stereoplay Labor, Analyse des Klirrspektrums eines Accuphase Verstärkers

Peter Schüller at stereoplay's test bench, testing an Accuphase amp

Vortrag

Ich darf Sie ganz herzlich auf der High End 2012 im M,O,C, in München willkommen heißen und freue mich, dass Sie den Weg zur Technology Stage, dem Experten-Forum auf der High End gefunden haben. Ich darf mich kurz vorstellen: Ich heiße Peter Schüller und bin Leiter der TESTfactory, dem einzigen zertifizierten Meßlabor einer Verlagsgruppe, tätig für die Zeitschriften der WEKA Media Publishing. Bereits vor 25 Jahren begann bei stereoplay meine Laufbahn. Zuvor hatte ich über 10 Jahre lang bei Kirksaeter in Düsseldorf – einem der Mitbegründer des Deutschen High Fidelity Instituts (dhfi) - HiFi-Geräte entwickelt und gebaut.

Lecture

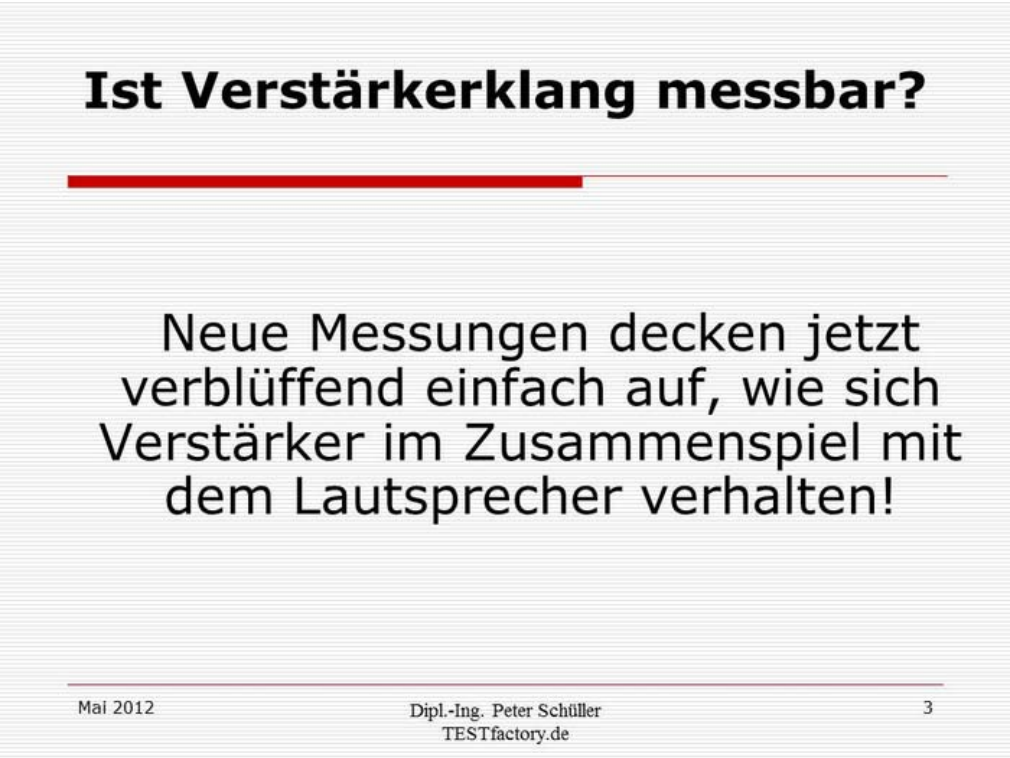
A warm welcome to you all at the MOC on Munich's High-End Fair 2012. It's really great to meet you at the Technology Stage, the High-End Fair's forum for experts.
My name is Peter Schüller and I am the head of the TESTfactory (Stuttgart). It's the only officially certified test lab of a German publishing group, here the WEKA Media Group.
25 years ago I've entered the stereoplay team. Before that I passed 10 years at Kirksaeter (Düsseldorf) by developing and building-up a lot of hi-fi equipment. Kirksaeter is a co-founder of the German Institute of High Fidelity

Wir erstellen hauptsächlich die Messungen für die Titel aus dem Unterhaltungselektronikbereich, also für Audio, Autohifi, Connect, stereoplay und Video-HomeVision.

Basically, the TESTfactory performs tests and measurements for the magazines of the above mention group, such as 'Audio', 'Connect', 'stereoplay', and 'VideoHomeVison'

Als zertifiziertes Labor führen wir auch Tests externer Auftraggeber durch (z.B. für den TÜV oder dem VDE), wobei wir uns auf einen großen Erfahrungsschatz aus dem UE-Bereich berufen können. Bei entsprechendem Prüfergebnis erteilen wir auf Wunsch dann unser eigenes Prüfsiegel. Auch von Ihnen nehmen wir gerne Aufträge entgegen

As a certified lab we also perform tests for external clients, such as TÜV (the huge test organisation for any kind of tech installation, incl. cars) and VDE (German engineering association). By doing so, we can rely on a broad bandwidth of experience in the audio/video field. If needed we also grant official seals after positive test results. Of course, if you need assistance we would like to take your orders too.



Slide 3: Are we able to measure amp sound?
Stunning easy new measurements uncover the interaction between amp and loudspeaker

Ist Verstärkerklang meßbar? So lautet das Thema meines Vortrags, und mit dieser Frage beschäftigt sich stereoplay schon seit Anbeginn. Heute kann ich diese Frage glatt mit „Ja!“ beantworten, denn ein wichtiges Argument ist nun gefunden: Das Abhängigkeitsverhältnis zwischen Verstärker und Lautsprecher. Was sich aus heutiger Sicht als verblüffend einfach herausstellte, hat aber eine lange Vorgeschichte.

„Are we able to measure amp sound?”
That's the headline of the following lecture. It's the question stereoplay deals with since the very beginning of the magazine's life (40 years ago). Today I can say: “Yes!” Because we've found the main argument: the relationship between amp and loudspeaker that makes the sound of the amp dependent on its output load.
What may look a bit simple today has a very long lasting past history.

Slide 4: stereoplay August 1985
Johannes Maier explains his theory on the special distortion impact on amps: "On the chase of sound"

Sie begann bereits in den 1980er Jahren. Damals stellte meine Kollege Johannes Maier die Klirrtheorie auf, nach der ein Verstärker nur gut klang, wenn sein Verzerrungsverhalten – oder genauer: sein Klirrspektrum bestimmten Gesetzmäßigkeiten folgte. Gut war stets - und das gilt noch bis heute - ein gleichmäßig, harmonisch abfallendes Klirrspektrum.

This history has begun with Johannes Maier's article on his special distortion theory. He found out and thus formulated that an amp would sound good if it would follow certain regularities concerning its distortion spectrum as follows: a good sounding amp always shows a regular and harmonic decline (or slope) of its distortion spectrum.

Slide 5: HP 3516 spectrum analyzer
(showing regular and harmonic decline of distortion artefacts)

Möglich wurde dies erst durch moderne Spektrum-Analysatoren, die es in Verbindung mit einer Klirrfaktor-Meßbrücke erlaubte, tief in das Verzerrungsverhalten eines Verstärkers zu schauen. Hier der Hewlett-Packard HP 3561 mit einem Dynamikbereich von immerhin mehr als 80dB.

In those old days the only measurement instrument that could dive deep into the stuff was the HP 3561 analyzer in conjunction with a sensitive distortion measurement tool.
The dynamic range of the HP was a bit better than 80dB.

Heute und schon eine Weile lang benutzen wir mit dem AP 2722 einen Audio-Analysator, der nach wie vor „State of the Art" ist und mit seinen programmgestützten Analyse-Tools die enorme Fortschritte in der Meßtechnik ermöglicht.

Nowadays we use the state-of-the-art AP analyzer 2722. With its programmable tools to analyze any kind of audio based problem it represents an enormous step forward in measurement technology.

Hier einen Blick ins HiFi-Meßlabor auf den Verstärker-Meßplatz. Neben Umschalteinheiten und Lastwiderständen ist unten links auch das eigene „Kraftwerk" zu erkennen, dass eine saubere, stabile 230 Volt Wechselspannung zur Verfügung stellt – ganz wichtig für die Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen. Vor allem die Leistungsmessung hängt überproportional von der Höhe der Netzspannung ab.

Slide 7 shows our main test bench. We find here signal switches (top) and output load resistor packages (bottom) on the desk and under the desk on the left side a special and very clean mains voltage producing "power plant". It offers the very stable 230V and 50Hz power supply for all measurements. We need that because of reproducibility purposes. We all know that each output power measurement heavily depends on the exact mains voltage.

Hier erkennt man neben den Programm-gesteuerten Umschalteinheiten auch die ohmschen Lastwiderstände für Verstärkerleistungen bis zu 8 mal 2000 Watt sowie die jetzt verstärkt zum Einsatz kommenden komplexen Lautsprecher-Nachbildungen.

Besides the program controlled signal switches (top left) we find on Slide 8 the output load power resistor bank (up to 8 x 2000W, top right) and in the middle the loudspeaker simulating complex networks

Welche Punkte auf den Verstärkerklang Einfluß nehmen, zeigt diese Folie in umgekehrter Reihenfolge ihrer Bedeutung.

The mechanisms that influence the sound of an amp most are given on Slide 9. The individual importance grows with growing number on the slide:

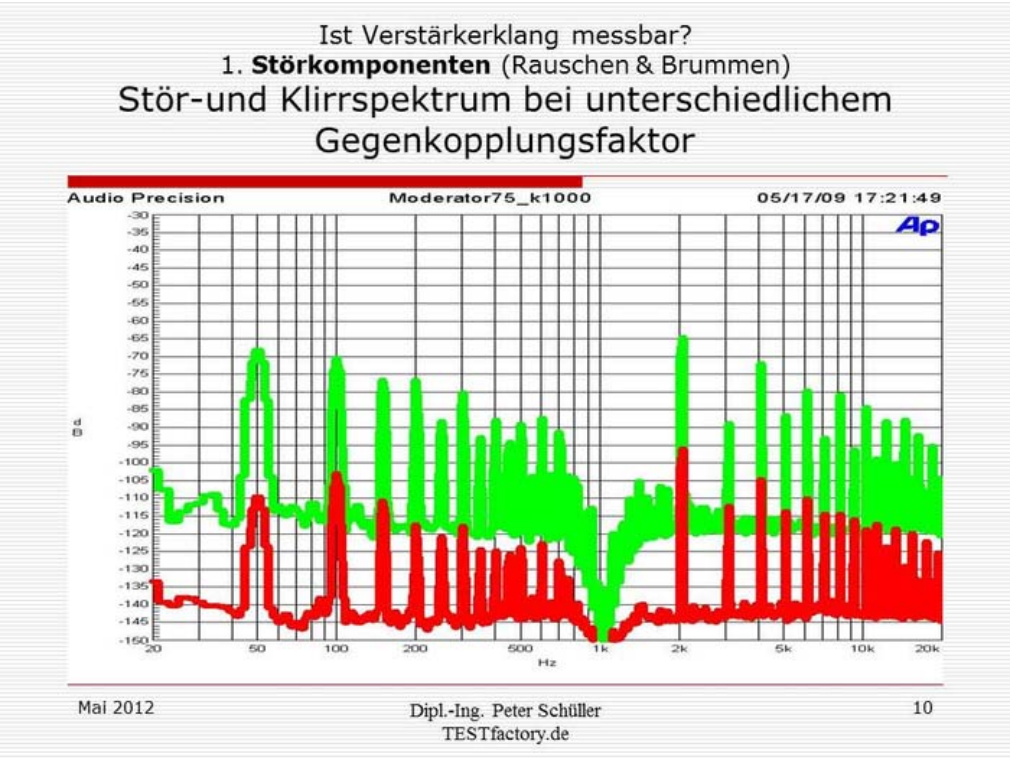
1. Hum and noise (interference factors)

2. Frequency & phase response (linear distortions)

3. Impulse & rectangular response (time response behavior)

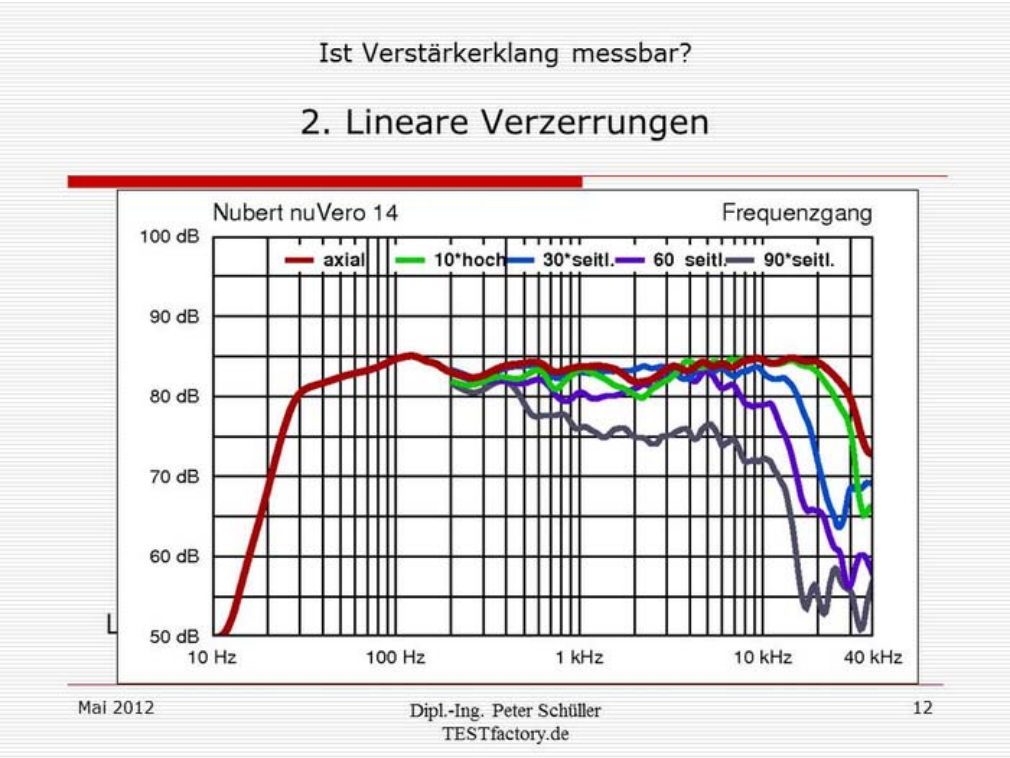
4. Distortion & intermodulation (nonlinear distortion)

5. Frequency and output load dependent distortion distribution (nonlinear distortion)



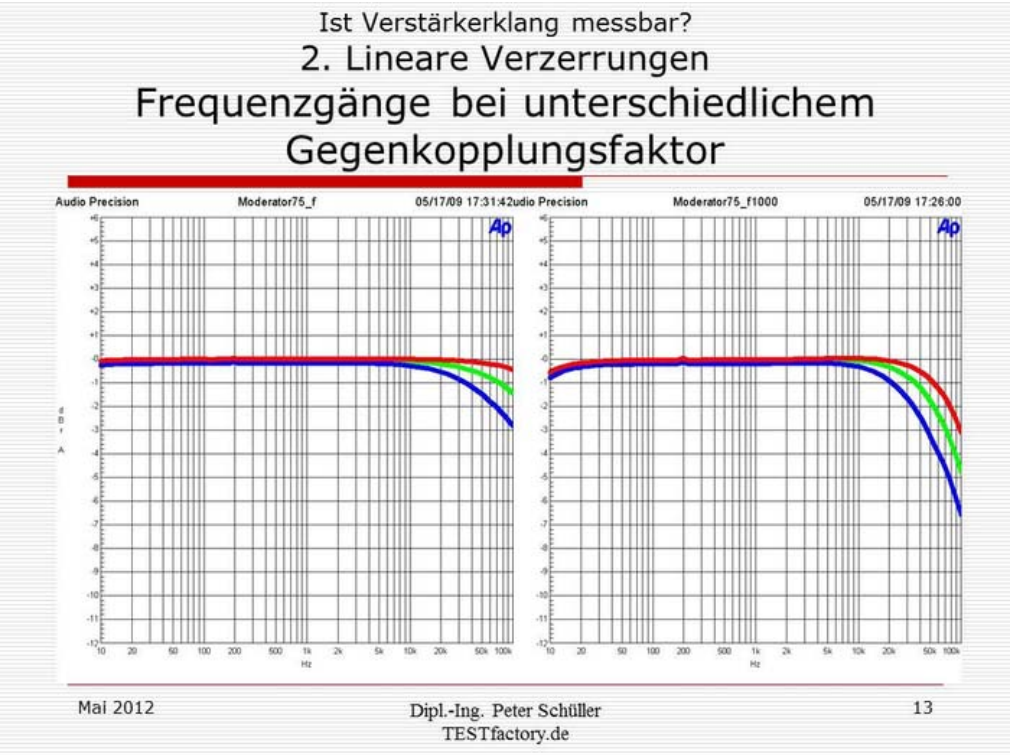
Störkomponenten, also Rauschen und Brummen, beeinflussen den Klang unserer Erfahrung nach nur in geringem Maße, solange sie klein genug gegenüber dem Nutzsignal – der Musik - bleiben. Das Diagramm zeigt die Spektralanalyse eines 1-Kilohertz-Sinussignals bei unterschiedlich hoher Gegenkopplung. In den sechziger Jahren hielten bei Verstärkern Transistoren Einzug und machten endlich große Ausgangsleistungen möglich. Sie hatten – und haben immer noch einen großen Nachteil: Ihre Kennlinien verlaufen nicht ideal, was zu unerwünschte Verzerrungen führt. Deshalb „erfand" man die Gegenkopplung. Sie führt einen Teil der Ausgangsspannung zum Eingang des Verstärkers zurück und vergleicht es mit dem Eingangssignal. Jede Abweichung erzeugt ein Korrektur-Signal, dass Verzerrungen, aber auch Rausch- und Brummkomponenten deutlich reduziert, wie man an der roten Kurve sieht – dies um so stärker, je höher die sogenannte Leerlaufverstärkung ist. Mithin eine gute Sache, sollte man meinen. Doch es gibt auch eine Kehrseite, auf die ich später noch zurückkomme.

Based on our experience hum and noise (1st point on the Slide 9 list) do not influence very much the sound of the amp-loudspeaker-chain – as long as they keep small compared with the original signal level.
Slide 10's diagram shows the spectrum of a 1kHz sinus at the output of an amp based on two different feedback factors: green = low FB, red = high FB. In the 60-ies of last century transistors allowed to develop amps that could produce very high output power. Nevertheless, these transistors contained an enormous disadvantage: their non-linearity led to unwanted distortions (green curve on Slide 10). That's why someone invented the feedback approach: parts of the output signal are fed back to the input. Any deviation from the input signal creates an inverse correction signal that could massively decrease noise and hum artefacts (see red curve on the slide). There was a simple rule for that process: the higher the idle gain of the amp the better the suppression of the unwanted disturbances.
However, there is a drawback. I'll come back to it a bit later.



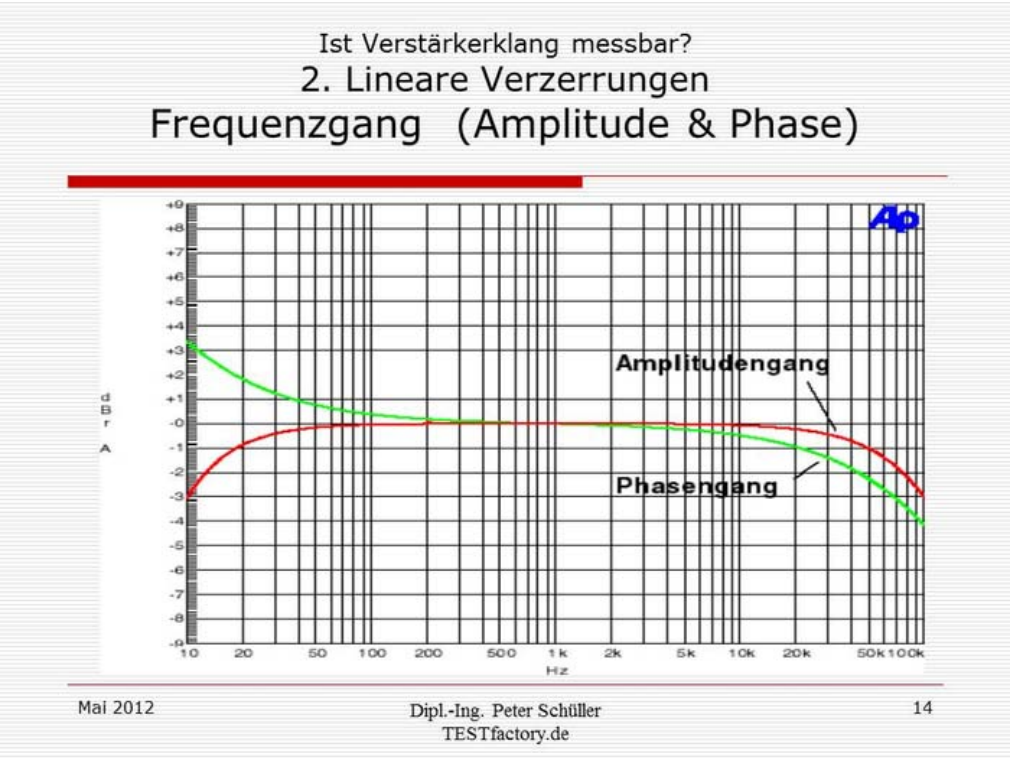
Damit kommen wir schon zu Punkt 2: Lineare Verzerrungen – nicht zu verwechseln mit dem Klirrfaktor! Am deutlichsten treten sie bei Lautsprechern auf, deren Frequenzverlauf oft alles Andere als völlig ebenmäßig ist. Obwohl das hier gezeigte Beispiel schon ein sehr ausgewogenes Exemplar seiner Gattung ist, gibt es doch deutliche Abweichungen von der ideal geraden, waagerechten Linie – vor allem im Tiefbaßbereich. Bei unterschiedlichen Abstrahlrichtungen treten im Hochtonbereich zusätzliche Abweichungen der Linearität auf.

Next point on the Slide 9 list (2nd) is the issue with the frequency & phase response, a special kind of linear distortion. Slide 12 shows a rather balanced loudspeaker example with a nearly flat frequency response. However, in most cases this won't be the case and the linear distortion becomes rather extensive. Nevertheless, the presented red trace shows significant deviation from an ideally flat transfer curve at the low-end of the frequency spectrum as well as in the high frequency region where linearity declines with growing deviation of the central listening direction (green: 10° high, horizontal: blue: 30°, violet: 60°, grey: 90°)



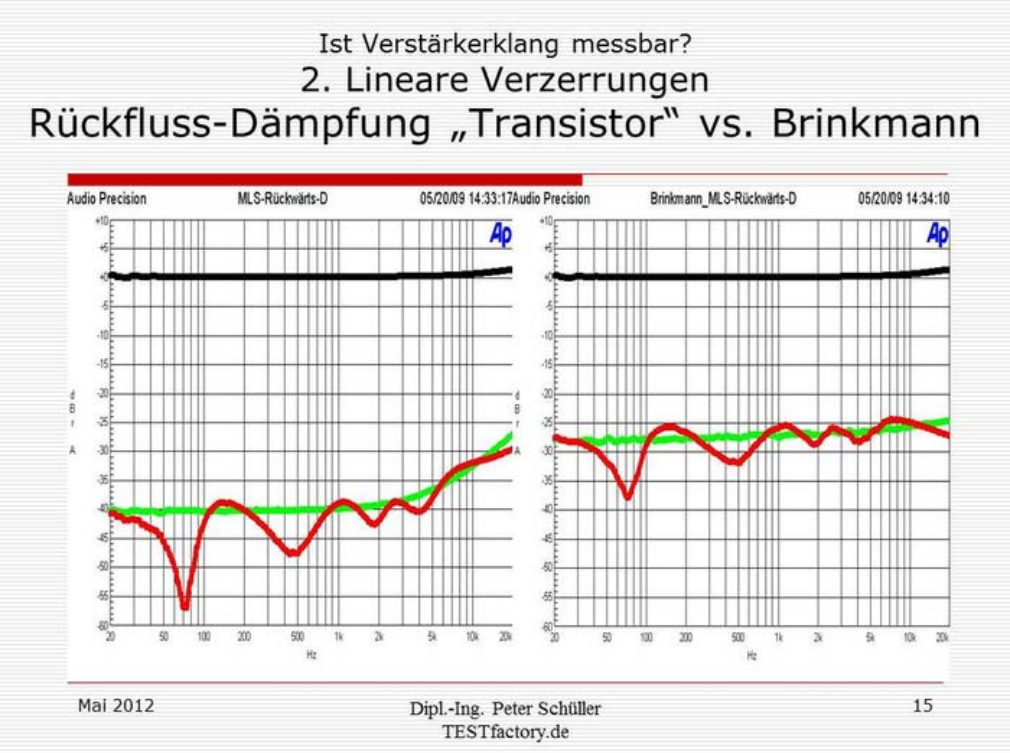
Verstärker haben es da sehr viel leichter dem Ideal der waagerechten Linie nahezukommen. Allerdings nur im direkt hörbaren Bereich. Doch oberhalb 20 kHz fällt auch bei ihnen üblicherweise früher oder später der Frequenzgang ab. Das hängt wiederum vom Maß der Gegenkopplung ab, die nicht nur Verzerrungen , Rauschen und Brummen reduziert, sondern auch den Frequenzgang erweitern und linearisieren kann, wie an den 2 Beispielen hier zu sehen ist. Gegenkopplung scheint also nur Gutes zu tun, oder? Doch hier ist auch schon ein 1. Nachteil zu erkennen: Die Kurven zeigen Messungen bei Belastung mit 8, 4 und 2 Ohm. Zu erkennen ist, dass an 2 Ohm die Kurven deutlich früher abfallen. Dieser Verstärker verändert also sein Verhalten an unterschiedlicher Last je nach Stärke der Gegenkopplung unterschiedlich stark – ein erster Hinweis, dass Gegenkopplung nicht nur Gutes tut.

Modern amps mostly do not suffer from non-linear horizontal lines in F&P response diagrams; however, this is true only in the audible frequency range. Above 20kHz there will be a falling slope forming more or less an lp. This effect also depends on the amount of feedback, and it does not only reduce hum, noise, and many distortions. It broadens and improves the frequency bandwidth too. This can be studied on Slide 13. Automatically, it raises the question: does feedback always improves things?
A further look at Slide 13 tells us that the question can be answered by yes and no. The measurements show transfer curves with an output load of 8 (red), 4 (green) and 2 (blue) ohms. The same amp works with two different feedback factors, at the left side with stronger FB than on the right side. Consequently, we obtain two different output load and feedback dependent behaviours that demonstrate that feedback does not always produce positive effects, because with eg. 2 ohm the right example shows less good transfer characteristics.



Jeder Abweichung vom ebenen Frequenzgang zieht auch eine Veränderung der Phase nach sich. Bevor überhaupt eine Änderung der Amplitude sichtbar wird, hat sich die Phase bereits bewegt, wie in dieser Simulation leicht zu erkennen ist. Obwohl eine Phasenabweichung nicht unmittelbar hörbar ist, reagiert die Gegenkopplung darauf aber prompt.

Each deviation from a flat frequency response (red) automatically creates a change in the phase response (grn). On Slide 14 we can see that phases do always react faster than frequencies, even in cases where we don not see any change of a flat frequency response. Although we do not hear small phase changes they immediately push the amp's feedback to work.

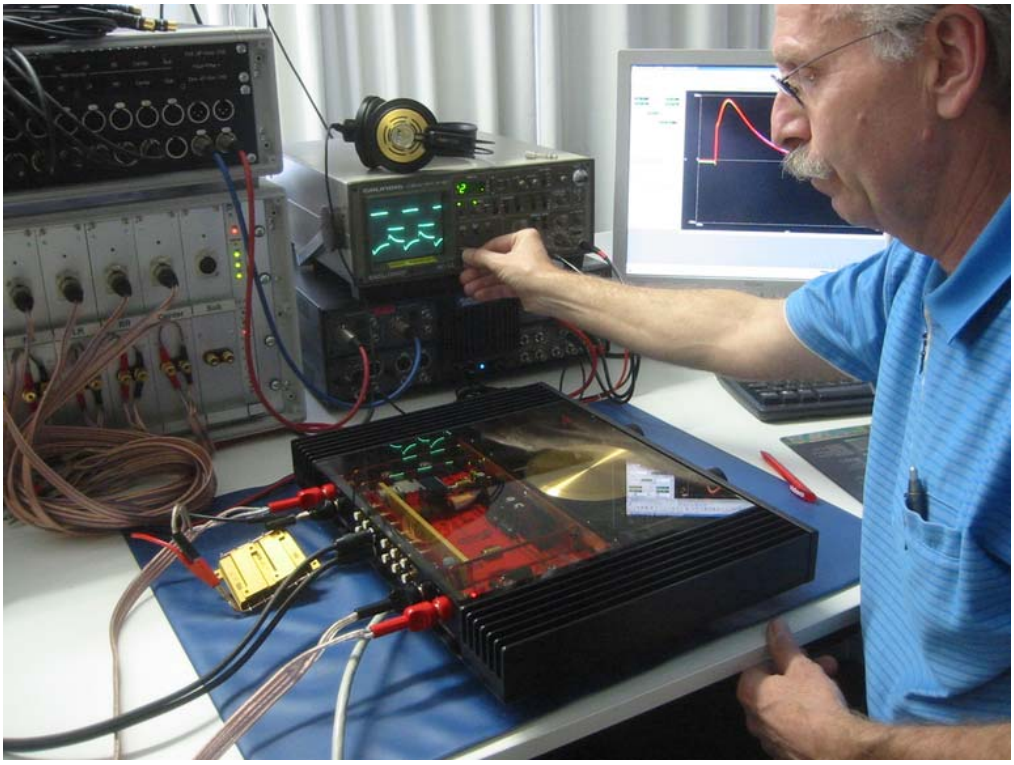


Zu den linearen Verzerrungen kann auch ein nichtlinearer Verstärker-Ausgangswiderstand beitragen. Auf der Suche nach Messungen, die einen Bezug zum Hörergebnis zeigen, habe ich auch die Verstärker-Ausgangsimpedanz untersucht, die sich gemeinhin im sogenannten Dämpfungsfaktor ausdrückt. Von der Überlegung ausgehend, dass die Gegen-EMK eines Lautsprechers einen Strom zurück in den Verstärker schickt, habe ich in den Beispielen hier die Rückflußdämpfung mit gemessen. Nicht mit einem Sinussignal, sondern mit einem der Musik sehr viel ähnlicheren breitbandigen Rauschen (den Lautsprecher-Meßtechnikern MLS-Signal bekannt), das über einen 8-Ohm-Widerstand in die Lautsprecherklemmen des Verstärkers eingespeist wird. Ein idealer Verstärker mit Null-Ohm Ausgangswiderstand würde das Signal vollständig unterdrücken. Reale Verstärker lassen davon noch etwas übrig, je nach Bauart und Stärke der Gegenkopplung unterschiedlich viel. Und das kann man leicht messen.

Among the linear distortion family we also find something that is created by the nonlinear output resistance of power stages. Hence, the search for measurement approaches that could well correlate with listening results led to a survey on output resistances (and damping factors of course) of power stages too. Usually, loudspeakers in action send a signal back to the amp that got generated by the movement of the loudspeaker coil in its magnetic field (like a microphone). Thus, any power amp with an output resistance > 0 ohm suffers from a specific structural return loss.
Slide 15 shows the measurement results of this kind of loss that got turned into a damping factor, created by feeding a broadband MLS signal (sinus is not useful here) into the amp output while the amp is loaded by an 8 ohm resistance.
The ideal power stage with 0 ohm output resistance would totally suppress any signal fed back from the loudspeaker. However, the ideal case is a very very rare one and real amps give enough room to easily measure the amp's return loss.

Im linken Beispiel ein „normaler" Verstärker mit relativ starker Gegenkopplung – sein Dämpfungsfaktor ist dadurch relativ hoch und das von hinten eingespeisten Signal wird stark „gedämpft", was ja durchaus erwünscht ist. Doch auch hier wird wieder ein negativer Einfluß der Gegenkopplung sichtbar: Die Rückflußdämpfung (grüne Kurve) wird zu hohen Frequenzen hin deutlich geringer, was der steigende Kurvenverlauf belegt. Das ganze statt mit einem ohmschen Widerstand mit einer komplexen Lautsprecher-Impedanz wiederholt (rote Kurve), zeigt schon deutlich den Einfluß des Lautsprechers auf den Verstärker.

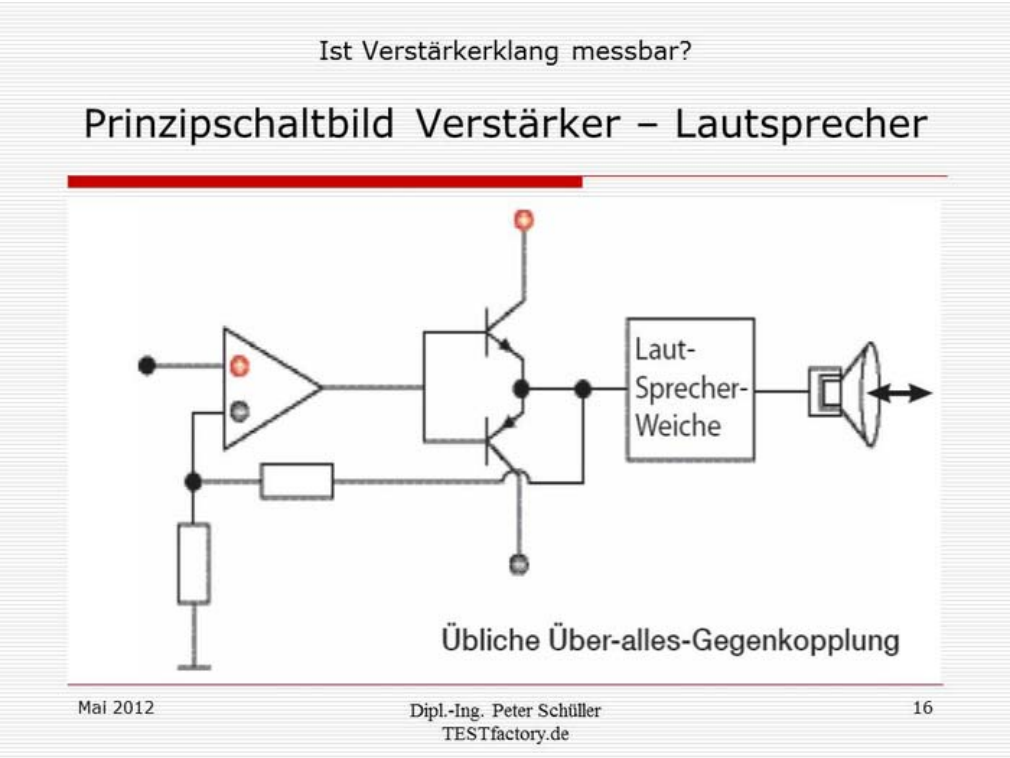
The left case on Slide 15 is an "ordinary" transistor amp with a rather strong feedback. Its output damping factor becomes thus quite high. Any return signal from the loudspeaker got damped rather strongly. That's what we normally are aiming for. But, the green return loss curve offers a strange behaviour at the high frequency side. We can see an effect that obviously comes from the amp's feedback: with growing frequency the trace decreases towards lower return loss values. The same game performed by use of a complex output load leads to the red curve. It shows the loudspeaker's influence on the amp rather drastically. Generally, it has the same tendency like the 8 ohm case.



Peter Schüller testet den Brinkmann Vollverstärker
(P. S. testing the Brinkmann amp)

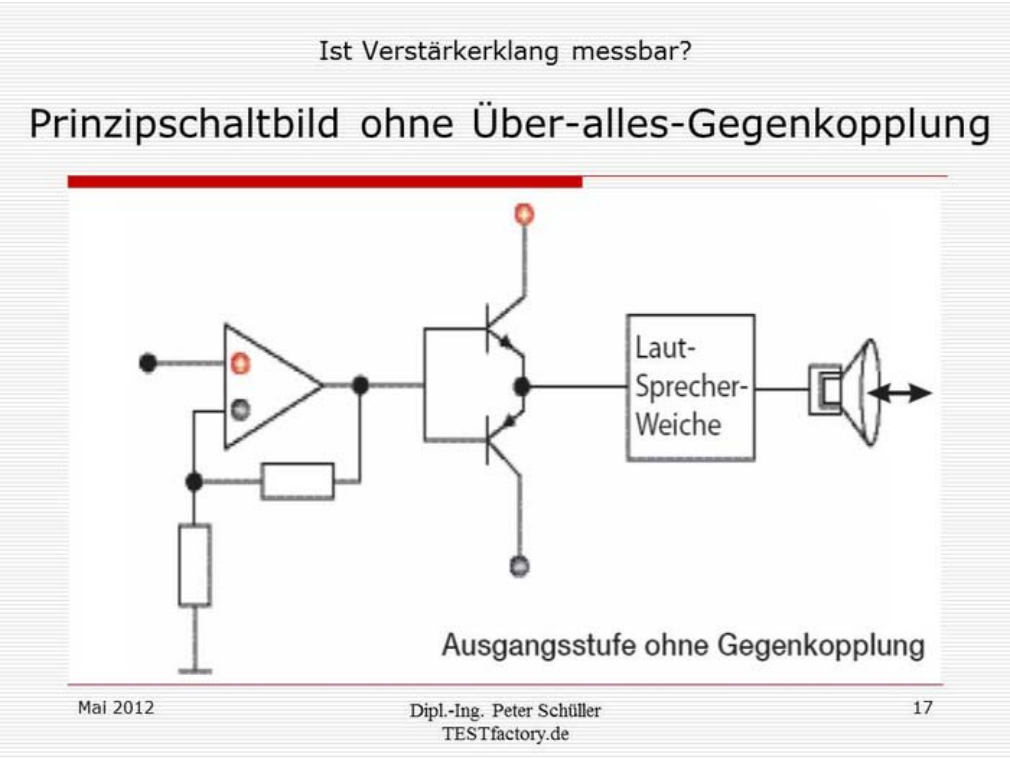
Das zweite Beispiel zeigt das Ergebnis des Brinkmann-Vollverstärkers. Warum der Brinkmann? Es war vor rund 3 Jahren, als mein Kollege Johannes Maier mit ihm ins Labor kam und sagt: „Der klingt so viel anders - nein besser, als alles Vergleichbare – da muß doch was zu messen sein". Also habe ich mich hingesetzt und alles möglich untersucht.
Eins fällt hier sofort auf: seine Rückflußdämpfung verhält sich mustergültig frequenzneutral – selbst in den obersten Höhen bleibt der Abstand zur (schwarzen) Referenzkurve weitgehend konstant, bei allerdings geringerer Dämpfung. In anderen Disziplinen hob er sich nicht sonderlich von der Konkurrenz ab. Was ist also anders an diesem Verstärker?

The example amp for the right side of Slide 15 is the integrated Brinkmann amplifier that includes pre and power stage. Why did we choose this one? Three years ago my colleague Johannes Maier came into my office by claiming that this amp would sound completely different, even far better than any other one he ever had heard before. There must be something that we could measure, he assumed. Well, I did my very best. We immediately noticed that the return loss curves look rather linear and far less frequency dependent. The difference to the shown black reference curve keeps rather constant throughout the whole frequency range. However, the output damping factor is lower than that of the left example and the comparison results with other figures of the two amps did not differ much.
This led to the fundamental question: "What makes the difference?"



Dieses Bild zeigt das Prinzip eines üblichen Verstärkers mit einer Spannungsverstärkerstufe vorn und einer Leistungsendstufe. Die übliche Gegenkopplung greift für den Soll-Ist-Vergleich das Signal direkt vom Ausgang ab und sorgt dafür, dass am Ausgang das verstärkte, ansonsten aber möglichst unveränderte Signal erscheint. So weit, so gut.

Slide 16 shows the principal set-up of the widely used amp configuration with overall feedback from the output to the input: a voltage amp (VAS) is followed by a power stage, driving a loudspeaker via a crossover (squared box). The output signal gets compared with the input signal, thus automatically eliminating any unwanted interference. So far so good!

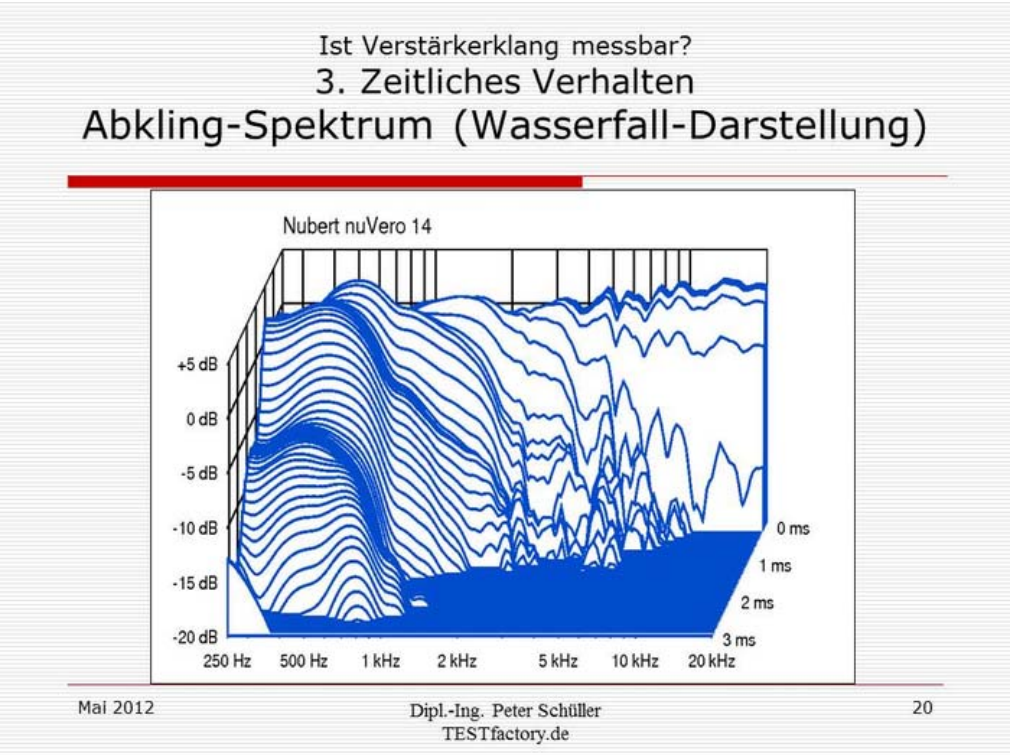


Brinkmann macht es anders: Wie hier zu sehen greift er das Korrektursignal vor der Endstufe ab – ausgerechnet der verzerrungsträchtigste Teil des ganzen Verstärkers bleibt also außerhalb der Gegenkopplungs-Korrekturschleife - und handelt sich damit eine Menge Nachteile ein.
Warum macht Brinkmann das?
Immerhin bleibt der Ausgangswiderstand Brinkmann Vollverstärkers frequenzneutral und verhält sich annähernd wie ein ohmscher Widerstand, womit sich der Einfluss des Lautsprechers auf das Verhalten des Verstärkers stark verringert. Ist das des Rätsels Lösung für guten Klang?
Doch so einfach ist es auch dann doch nicht!

In contrast to the usual amp configuration from above we see on Slide 17 that the Brinkmann looks very different: the feedback signal is picked-up between the most distortion producing stage, the power stage, and the VAS. Thus, on the first sight, the Brinkmann looks rather disadvantageous.
But why did they configure the Brinkmann that way?
Quickly we found out that the power stage's output resistance becomes rather frequency independent and it behaves thus more or less like a normal resistance. It decreases drastically the loudspeaker's influence on the whole amp. Will this fact be the final solution for the good sound problem? No, things don't look that simple!

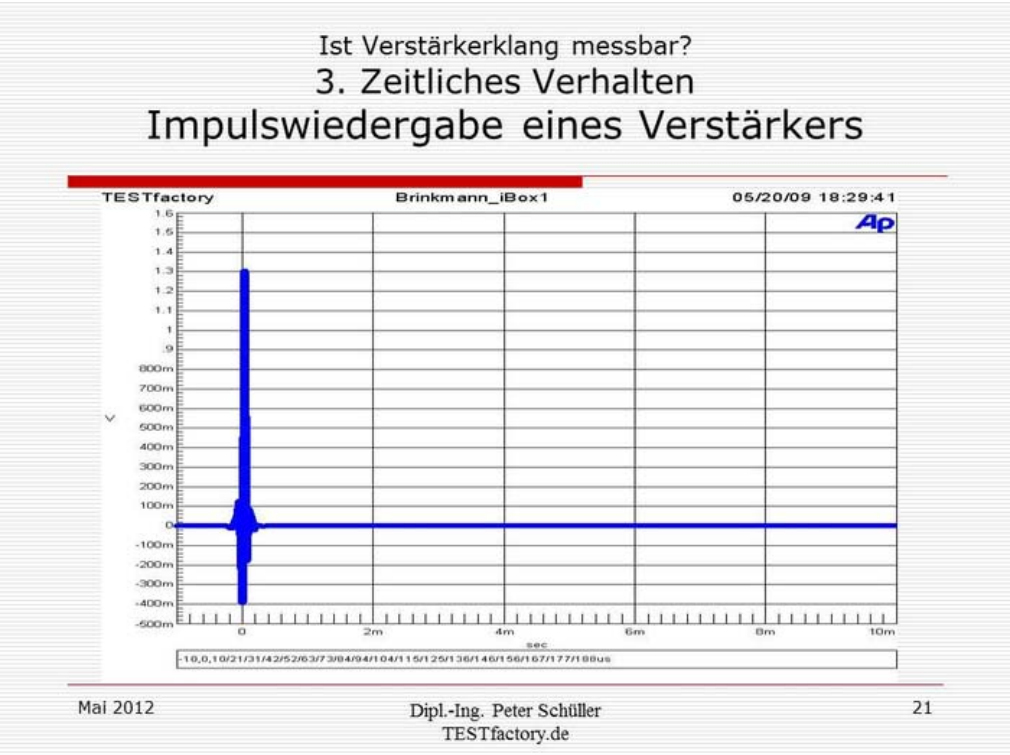
Bei Lautsprechern ist es gängige Praxis mittels Impulsantwort seine Übertragungseigenschaften zu untersuchen. Wie hier im Beispiel zu sehen ist sie mit zahlreichen kleinen Artefakten überlagert, die aus kleinen Resonanzen, Massenträgheiten oder anderen Unvollkommenheiten des Lautsprechers resultieren.

According to good practice loudspeaker transfer function measurements can be performed by impulse response measurements. Slide 19 gives an example that shows many additional small artefacts that disturb the clean basic curve, created by resonances, mass inertia, or other loudspeaker imperfections



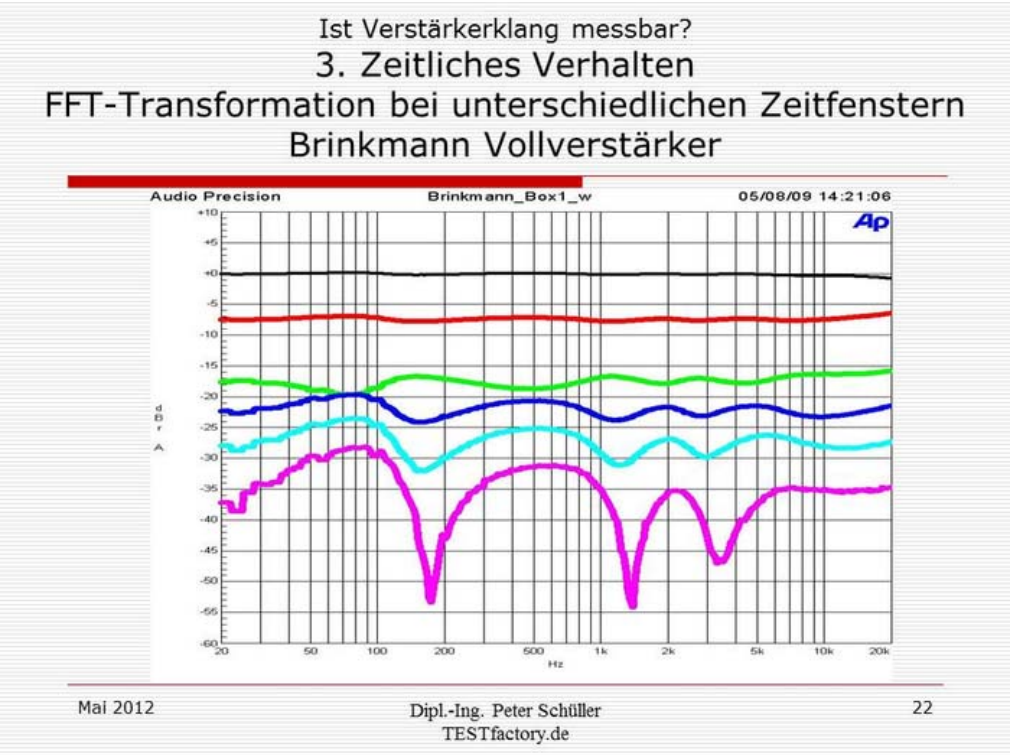
Mittels Fourier-Transformation läßt sich aus dieser Impulsantwort zum Beispiel das Abklingspektrum – auf Grund seines Aussehens auch Wasserfalldarstellung genannt – errechnen. Es drückt aus, wie schnell der Lautsprecher bei welcher Frequenz nach Abschalten des Signals zur Ruhe kommt. Auch der Frequenzgang wird aus der Impulsantwort ermittelt – hier schon als erste (hintere) Kurve zu erkennen.

By application of the Fourier transformation we can extract a waterfall diagram from the impulse response. Slide 20 shows for all frequencies the dying out time after the loudspeaker feeding signal is switched off. In addition, the frequency response of the loudspeaker can be calculated and displayed too: it is the diagram's top curve in the background.



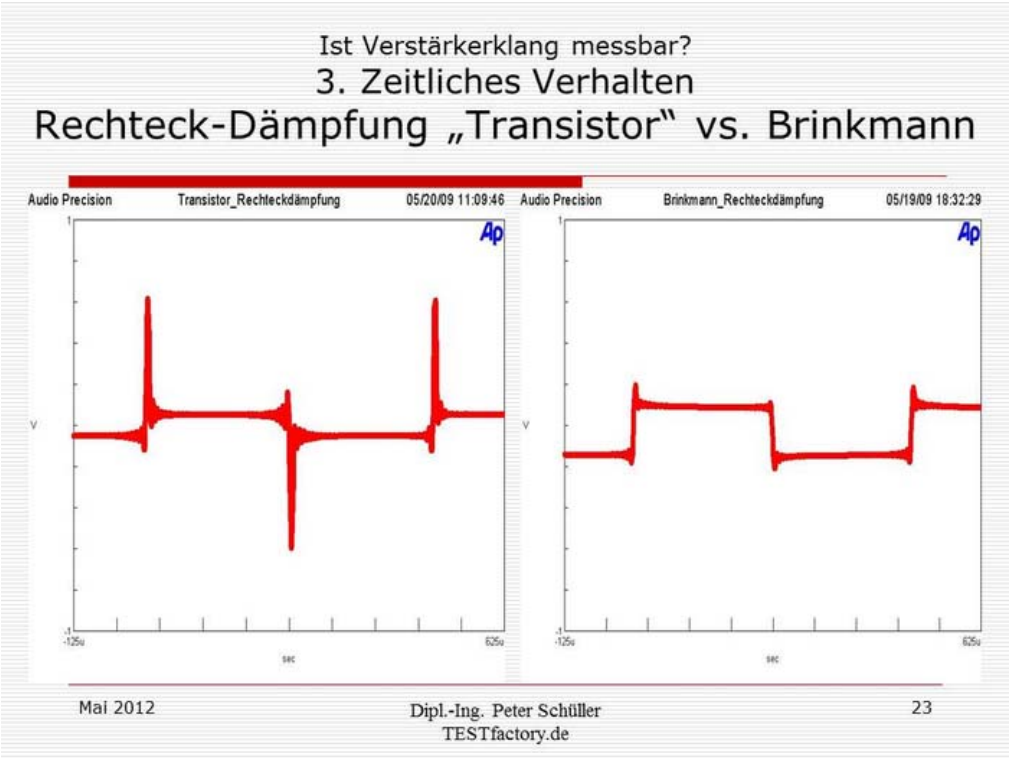
Was beim Lautsprecher so gut funktioniert, könnte doch auch bei Verstärkern Hinweise für ihre Klangeigenschaften geben. Aufgrund des normalerweise sehr viel größeren Übertragungsbereichs bleibt die Impulsantwort nur eine schmale Nadel – im Gegensatz zu Lautsprechern ohne erkennbare Probleme. Trotzdem habe ich eine dem Wasserfall ähnliche Messung vorgenommen.

What works well with loudspeakers should equally work well with amps and the application of the above given approach should lead to answers on our basic question on amp sound. Because of the very much broader frequency spectrum the impulse response of an amp will always look very much thinner than that of a loudspeaker (see Slide 21).
Nevertheless, I've performed a waterfall like measurement with the amps.



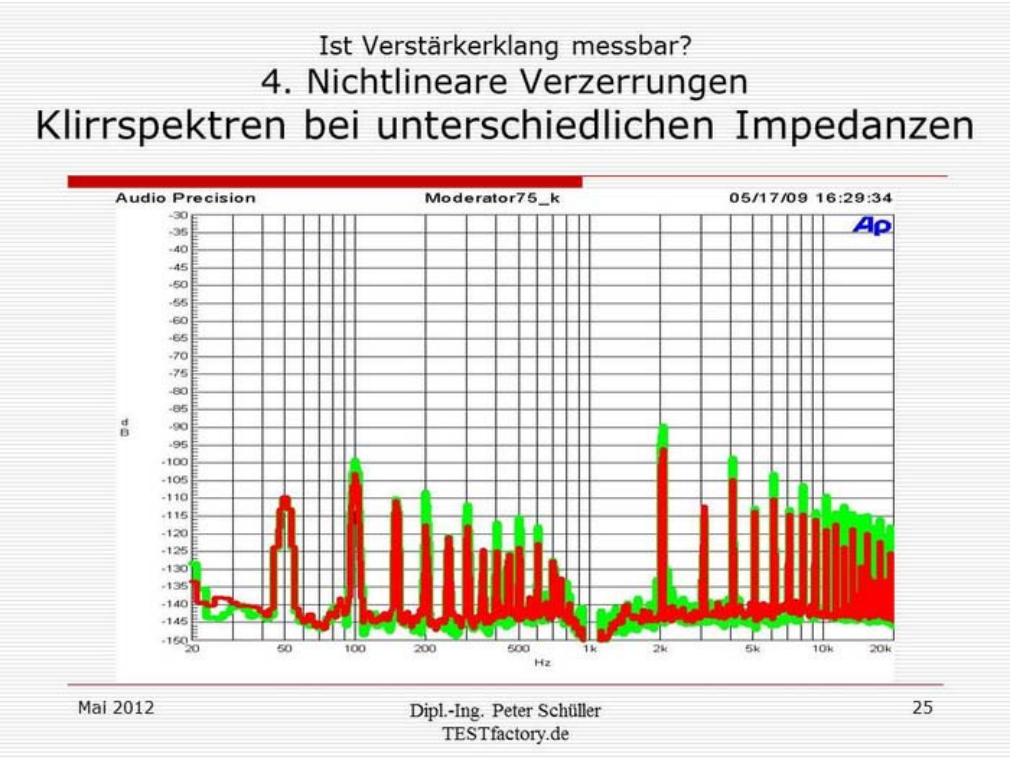
Tatsächlich ergeben sich an komplexer Lautsprecherlast gemessen Unterschiede zwischen verschiedenen Verstärkern, wobei sich jener Brinkmann positiv hervorhob. Allerdings stößt man – wie sich im Nachhinein herausstellte – an die Grenzen des Meßsystems. Zudem hatten der Übertragungsbereich des Verstärkers einen verfälschenden Einfluß auf das Ergebnis und bracht uns auf der Suche nach klangrelevanten Messungen nicht weiter.

Slide 22 shows the results for the Brinkmann amp, loaded by a complex load. Depending on the selected time window we can expect very different behaviour curves for various kinds of amps. The Brinkmann showed the most positive and promising curves. The most significant drawback using this kind of measurement is always set by certain measurement equipment boundaries. In addition, we found out that the frequency range of the amp has a great influence. Hence, this path alone didn't lead us to a satisfying answer on our basic question.



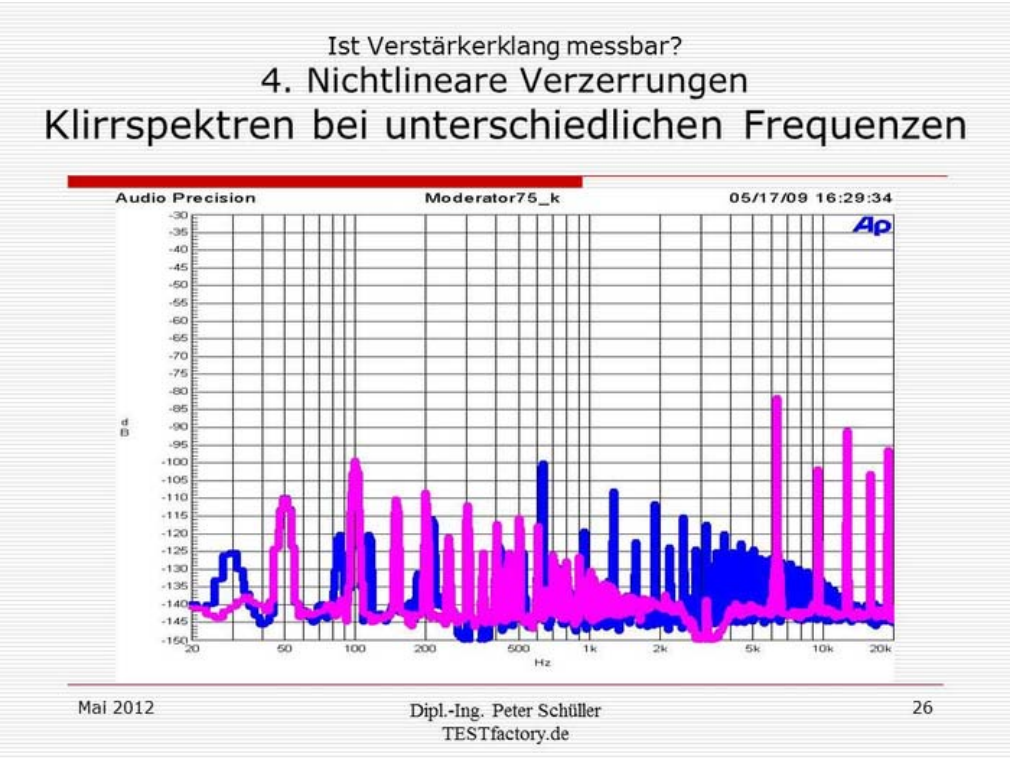
Schon eher Messungen mit einem Rechteck, das rückwärts eingespeist deutlich macht, welch negativen Einfluß die Gegenkopplung noch haben kann. Bevor sie erkennt, dass am Ausgang sich plötzlich der Zustand ändert, vergeht eine gewisse Zeit um gegenzusteuern – was an den hohen Überschwingern zu erkennen ist. Der Brinkmann Vollverstärker verhält sich hier zeitlich deutlich besser, allerdings ist die Dämpfung des Signals bei ihm geringer.

We tried the rectangle measurement approach. The signal got fed into the amp at its output. Its negative influence on the feedback is demonstrated on Slide 23. A sudden signal change forces the input of the VAS to create a correction signal as fast as possible. However, this correction signal needs time, shown as overshots on the slide. The Brinkmann (right) looks very much better, however, the signal damping is lower than the one of the left example (= amount of pp signal amplitude is higher).



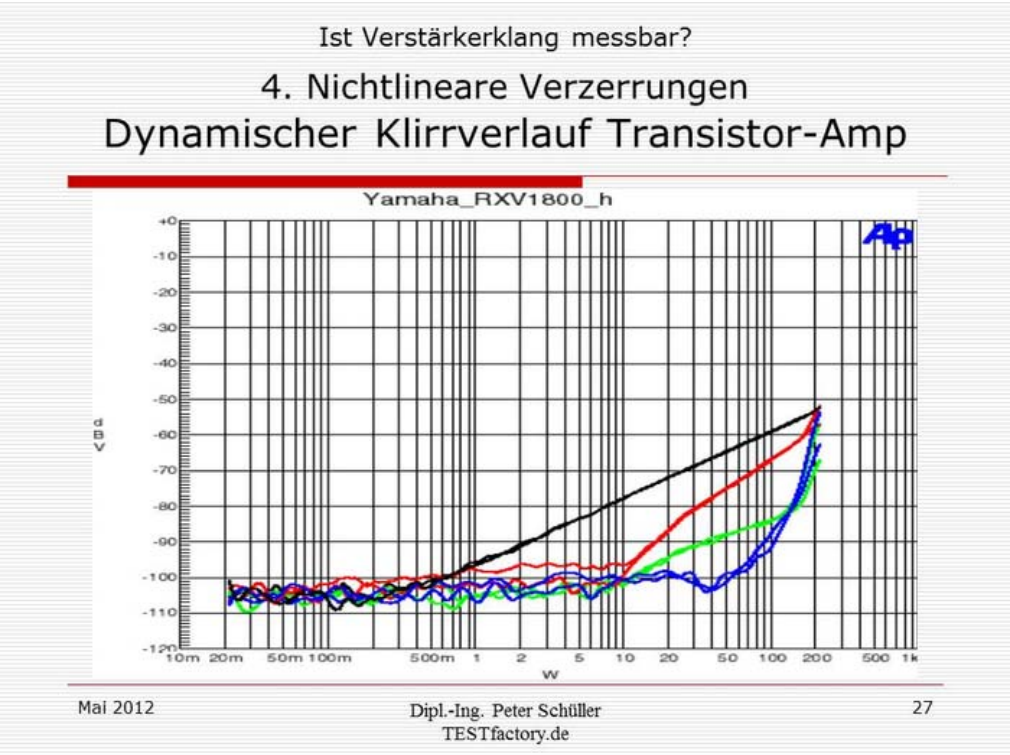
Kommen wir nun zu den auf den Verstärkerklang bezogenen wichtigsten Punkten: Den nichtlinearen Verzerrungen.
Wie ich eingangs bereits sagte, hat sich in der jahrelangen Erfahrung die von meinem Kollegen Johannes Maier im Jahr 1985 aufgestellt Klirrtheorie immer aufs Neue bestätigt. Stets zeigten gutklingende Verstärker ein ähnliches, gleichmäßig zu den höheren Harmonischen hin abfallendes Klirrspektrum – wie hier beispielhaft gezeigt. Dabei kommt es nicht darauf an, wie hoch (in Prozent) die Verzerrungen sind, sondern welcher Art sie sind. Was zwar bekannt, aber nicht weiter beachtet wurde, ist die Last- und Frequenzabhängigkeit der Verzerrungen. Trotzdem vermutete ich schon lange, dass dies nicht bedeutungslos sein kann und habe Verstärker stets an 8 und 4 Ohm (teilweise auch an 2 Ohm) gemessen. Dass der Klirr bei stärkerer Belastung durch den 4-Ohm-Widerstand (siehe grüne Kurve) steigt, ist ja eigentlich völlig normal.

Now we are approaching the points that really count when talking about amp sound: the nonlinear distortions. Already mentioned at the beginning of this short lecture the findings of Johannes Maier concerning his 1985 theory on distortions became - again and again – fully valid during the past 27 years. Good sounding amps always showed distortion spectra with regular declining behaviour towards growing harmonics. An example is given on Slide 25. The absolute percentage of a distortion artefact is not important here. It's the kind of the frequency dependent decline and the dependency on the output load that count. Since a long time I assumed that there is an influence by the kind of output load (I always measured at 8 and 4 ohm, sometimes at 2 ohm too). And, as expected, the distortion got increased by an output load change from 4 ohm (red) to 8 ohm (green).



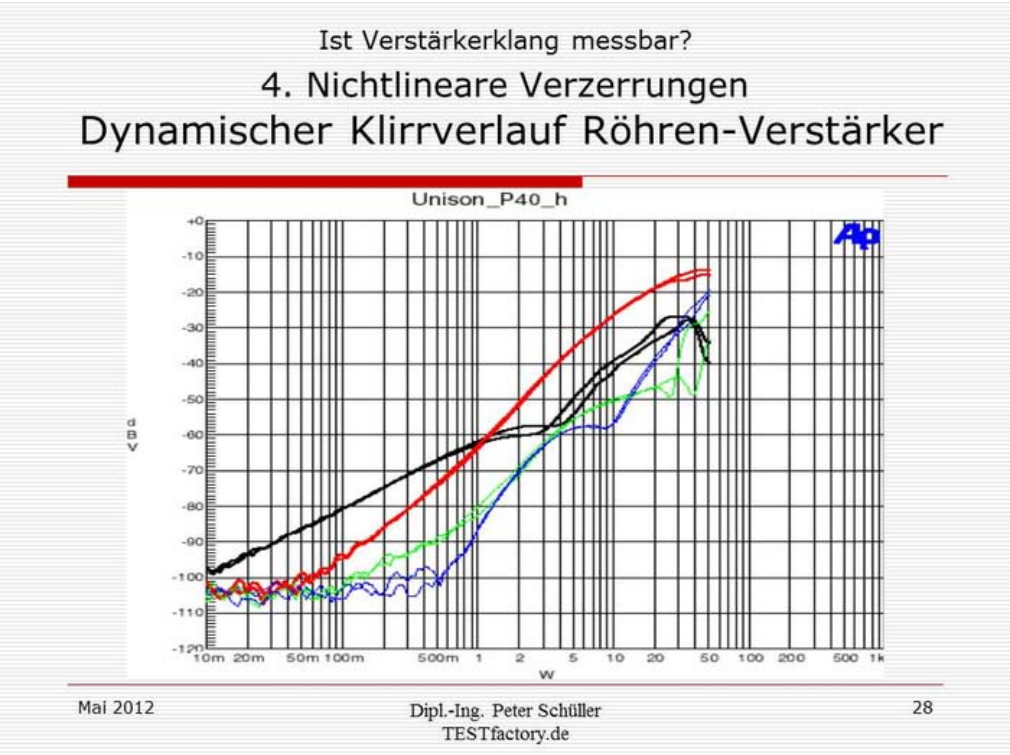
Gemessen habe ich nicht nur bei 1 kHz, sondern zusätzlich auch bei einer tieferen und höheren Frequenz. Dass der Klirr zu höheren hin Frequenzen mehr oder weniger stark steigt, ist auch meist zu beobachten. Doch wie wirkt sich dies auf den Klang aus, wo doch die höheren Harmonischen schnell oberhalb des Hörbereichs liegen? Bei einer Meßfrequenz von 3150 Hertz sind es gerade noch 4 Oberwellen (k2 bis k5), die in den Bereich bis 20 kHz fallen.

I performed distortion measurements not only with a 1kHz test frequency. Additionally, low and high test frequencies came into the game too. It's not a surprise that the distortion of higher test frequencies (magenta trace on Slide 26) look worse than that of lower test frequencies (blue trace). But, how does it influence the amp sound? High test frequencies very quickly produce harmonics outside the audible range. At a test frequency of 3150Hz there are only 4 harmonics that fall into the 20kHz bandwidth (k2 … k5).



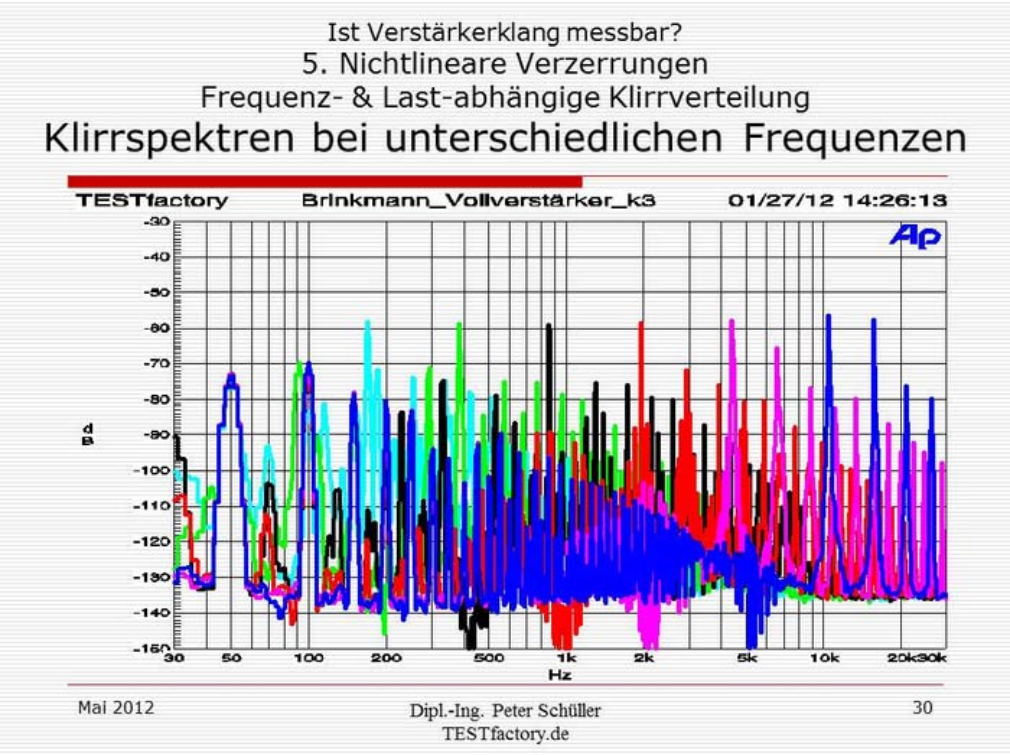
Hinzu kommt noch die Abhängigkeit von der Leistung an sich. Das Audio Precision AP 2722 erlaubt mit einem speziellen Programm, die Amplituden dieser einzelnen Harmonischen bei steigender oder fallender Leistung zu verfolgen und als Diagramm darzustellen. Das Beispiel hier eines AV-Receivers zeigt, wie es sein soll: Die Amplituden der betrachteten 4 Oberwellen steigen schön gleichmäßig an und sind günstig abgestuft, das heißt, die höheren Harmonische k4 (grün) und k5 (blau) sind stets niedriger als die klanglich bedeutendsten Komponenten k2 (schwarz) und k3 (rot). Dieser dynamische Klirrverlauf war ein großer Fortschritt zur messtechnischen Beurteilung von Verstärkern. Zumal durch Messung bei steigender und fallender Leistung auch thermische Effekte oder Arbeitspunktverschiebungen sichtbar werden, die das Verzerrungsverhalten negativ beeinflussen und klanglich zu Irritationen führen. Davon ist hier jedoch nichts zu erkennen weil die Kurven bei steigender und fallender Leistung übereinanderliegen – so, wie es stets sein sollte.

The dependency on the output load plays an additional role. The AP 2722 allows measuring and displaying all harmonics differently, no matter if we measure with increasing or decreasing output power. The Slide 27 example of an audio-video amp demonstrates how it should look like. The amplitudes of the 4 harmonics are very nicely growing with growing output power and the higher harmonics k4 (green) and k5 (blue) become always smaller than the more sound-making ones of k2 (black) and k3 (red). This kind of dynamic distortion course turned out to become a very important progress in judging amplifier sound by measurements.
Even thermal effects and thus changing operating points can be observed now with growing or falling output power. Obviously, these effects have an influence on the distortion behaviour of an amp too and thus will lead to sound confusions. The latter effects can't be studied on the Slide 27 example because the traces shown are placed always in an identical sequence, no matter if we study growing or falling output power levels. That's the way it should always look like!



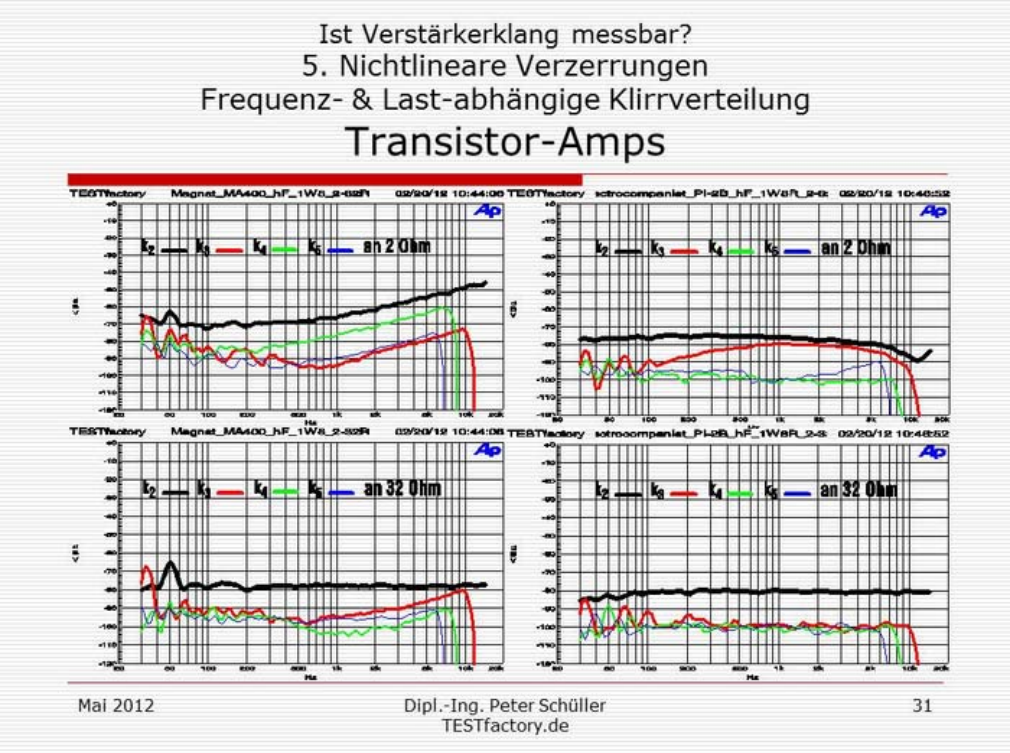
Im nächsten Beispiel eines Röhrenverstärkers ist dies nicht so perfekt gelungen. Nur bis rund 1 Watt verhält er sich mustergültig. Doch bei weiter steigender Leistung (bis zu für Röhrenverstärker beachtlichen 50 Watt an 4 Ohm) wechseln k2 (schwarz) und k3 (rot) ihre Dominanz. Bei großer Lautstärke wird dieser Verstärker also anders klingen, als in leisen Passagen. Erkennbar ist auch, dass sich k2 bei fallender Leistung anders verhält, hier allerdings vernachlässigbar wenig - da gibt es ganz andere Beispiele.

A further example is shown on Slide 28: a tube amp that demonstrates that nothing is perfect under the sun. Up to 1W it looks wonderful. With growing output power (up to 50W at 4 ohm) k2 (blk) and k3 (red) change dominance. Hence, this amp will sound better or different at low output power rather than at high output power. We also can see that with falling output power k2 does not behave in the same way like the other harmonics. In the case here this is nearly ignorable. However, there are many more worse looking examples.



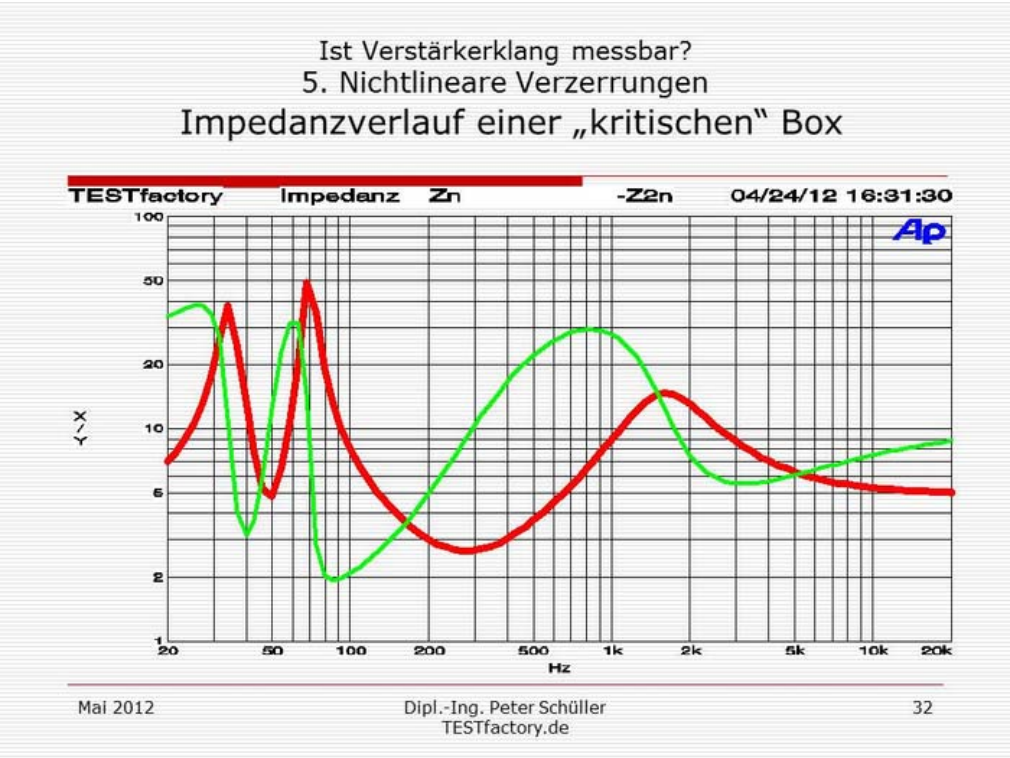
Kommen wir nun zur Frequenz- und Lastabhängigkeit der nichtlinearen Verzerrungen. Dazu habe ich bei einem Verstärker das Klirrspektrum bei unterschiedlichsten Frequenzen gemessen. Auf den ersten Blick scheint er sich frequenzneutral zu verhalten, denn die dominante Komponente bleibt stets auf gleicher Höhe. Und in der Tat würde eine übliche Klirrfaktormessung bei tiefen und hohen Frequenzen nahezu den gleichen Wert (in Prozent) anzeigen. Bei genauer Betrachtung fällt allerdings auf, dass höhere Harmonische bei den hohen Frequenzen stärker vertreten sind, als bei tieferen Tönen.

Let's move now to the frequency and output load dependency of the nonlinear distortions. To get it right I've measured an amp's distortion spectrum at different frequencies. At the first sight the amp on Slide 30 (the Brinkmann again) looks as if it behaves neutral at all frequencies, because all dominant harmonic spikes show the same level. Indeed, the usual distortion measurement at high or low test frequencies will yield rather equal distortion percentages. However, a closer look into the diagram will lead to the knowledge that there is a higher number of higher harmonics from higher test frequencies than from lower test frequencies.



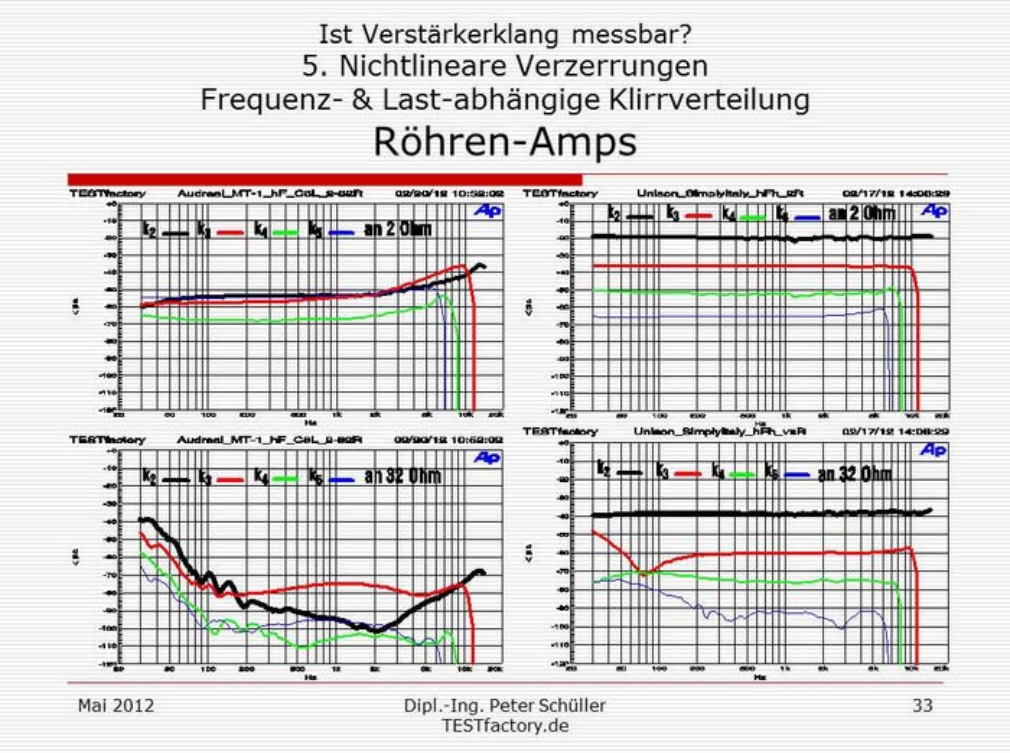
Das hat mich veranlasst, den „Harmonic Analyzer“ des AP 2722 umzuprogrammieren: Nun soll er die Amplituden der wichtigen 4 Oberwellen nicht über die Leistung, sondern über die Frequenz darstellen. Heraus kann erstaunliches. Wie hier an 2 Transistor-Amps gezeigt, verlaufen die einzelnen Oberwellen sehr unterschiedlich und zudem unterschiedlich bei niedrigen und hohen Impedanzen. Hier dargestellt an 2 Ohm und an 32 Ohm. Idealerweise sollten die Harmonischen bei jeder Last und Frequenz auf gleicher Höhe verharren, solche höherer Ordnungszahl (k3, k4, usw.) entsprechend mit abgestufter Amplitude.

The gained knowledge from above gave rise to develop a new procedure for the AP 2722's harmonic analyzing part. Now, it should display the amplitudes of the 4 most important harmonics versus frequency - and no longer versus output power. The measured results can only be described as remarkable. Slide 31 demonstrates the whole thing with two different transistor amps (left: a Magnat at 2 and 32 ohm, right: an Electrocompaniet at 2 and 32 ohm too). The traces of the harmonics show very different behaviours at different output loads. In the best case they should all have a flat response at all frequencies and output loads, showing a sequence of steadily decreasing levels for k2, k3, k4, k5, etc..



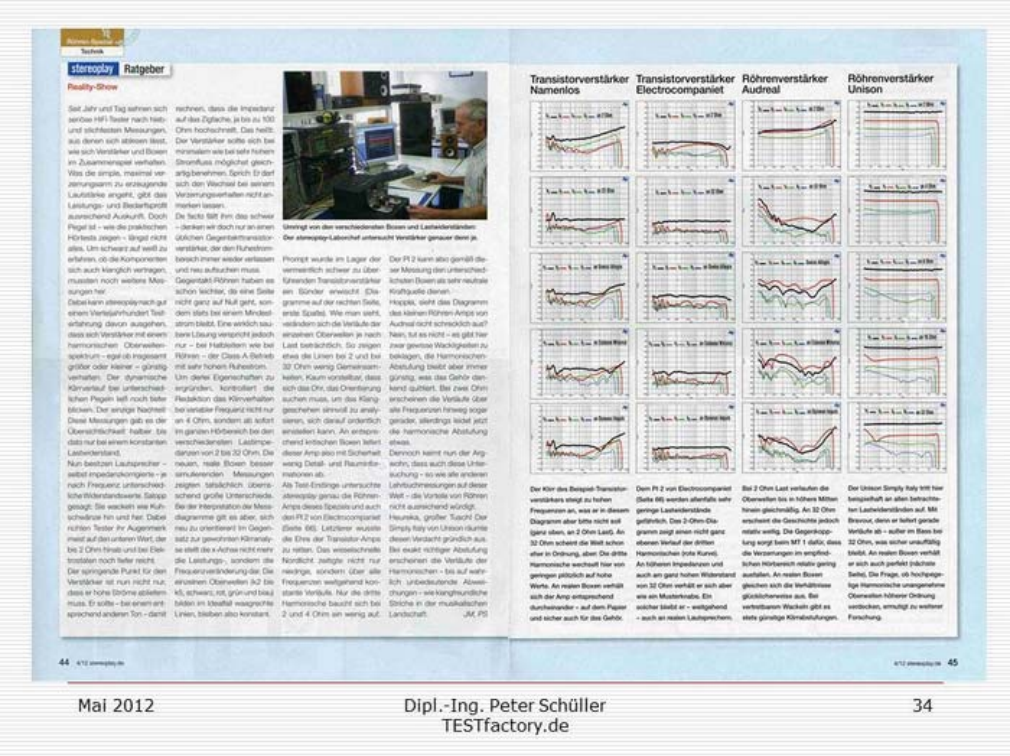
Warum auch an 32 Ohm? Normalerweise ist doch der niedrigste Impedanzwert der kritische. Schaut man sich den Impedanzverlauf verschiedener Boxen an, schwankt er oft extrem stark: zwischen 1 Ohm und 100 Ohm ist alles möglich. Im Beispiel hier zwischen 2,8 und 50 Ohm und mit Phasenschwankungen zwischen -70 und +50 Grad (grüne Kurve).

But why do we need a measurement with 32 ohm output load? Normally, the most critical output load is set by 2 ohm or even at smaller values. A look at the impedance response of loudspeakers shows that the impedance fluctuates, sometimes between 1 and 100 ohm. The Slide 32 example has an impedance minimum and maximum at 2.8 and 50 ohm (red) and a phase response between -70° and +50° (green).



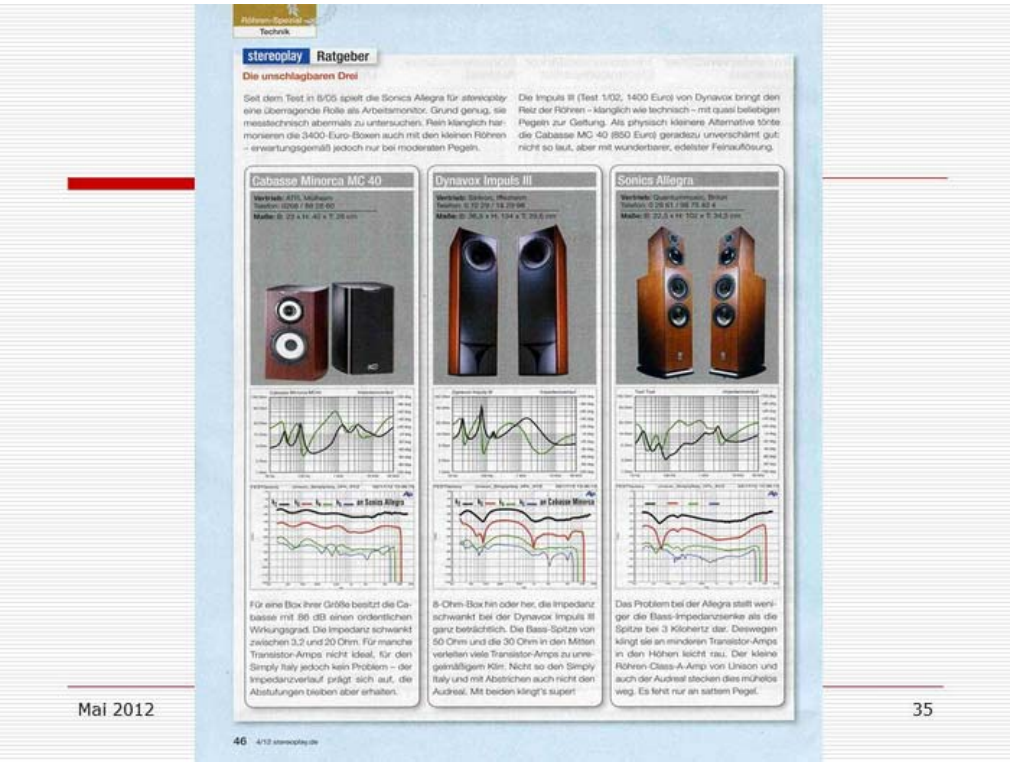
Zunächst mit einer „normalen", gegengekoppelten Röhre (hier links im Bild) gemessen zeitigte ein eher mäßiges Ergebnis: Die Unterschiede am niedrigem und hohem Lastwiderstand waren sehr groß. Erstaunlich dass gerade an 2 Ohm gemessen (Röhre und 2 Ohm – das funktioniert doch nicht!) bis auf den unerwünschten Klirranstieg zu hohen Frequenzen die Welt noch in Ordnung war. Doch bei hoher Impedanz sackte k2 (schwarze Kurve) ab in den Keller. Schaute man sich aber auch die bei 4, 8 und 16 Ohm gemessen Kurven an, blieb immerhin die Abstufung im klanglich wichtigen mittleren Frequenzbereich erhalten. Der Unison Simply Italy, ein relativ leistungsschwacher, bezaubernd schön klingender Trioden-Röhrenverstärker zeigte dann in aller Klarheit, worauf es wirklich ankommt: Bei ihm bleibt unter allen Umständen die Klirrabstufung erhalten, wie hier rechts zusehen ist.

Let's jump again to tube amps next. The left example of Slide 33 (Audreal) gives a rather moderate result. The differences between low and high output load generated results are very strong. Astonishing enough and despite the growing distortions in direction of high test frequencies this amp produces rather good looking results at only 2 ohm (tubes and 2 ohm: does it really work well?) But, at higher output loads, k2 (blk) went drastically down. Fortunately, a look at the 4, 8, 16 ohm results signals the right steps in the most important sound region of the medium frequency range. The other example (on the right), the Unison Simply Italy clearly shows the right direction where to go to. Despite its rather low output power capabilities the shown traces demonstrate what really matters: in all cases the grading of the harmonics keeps preserved. That's why this amp sounds enchanting well – in all load cases.



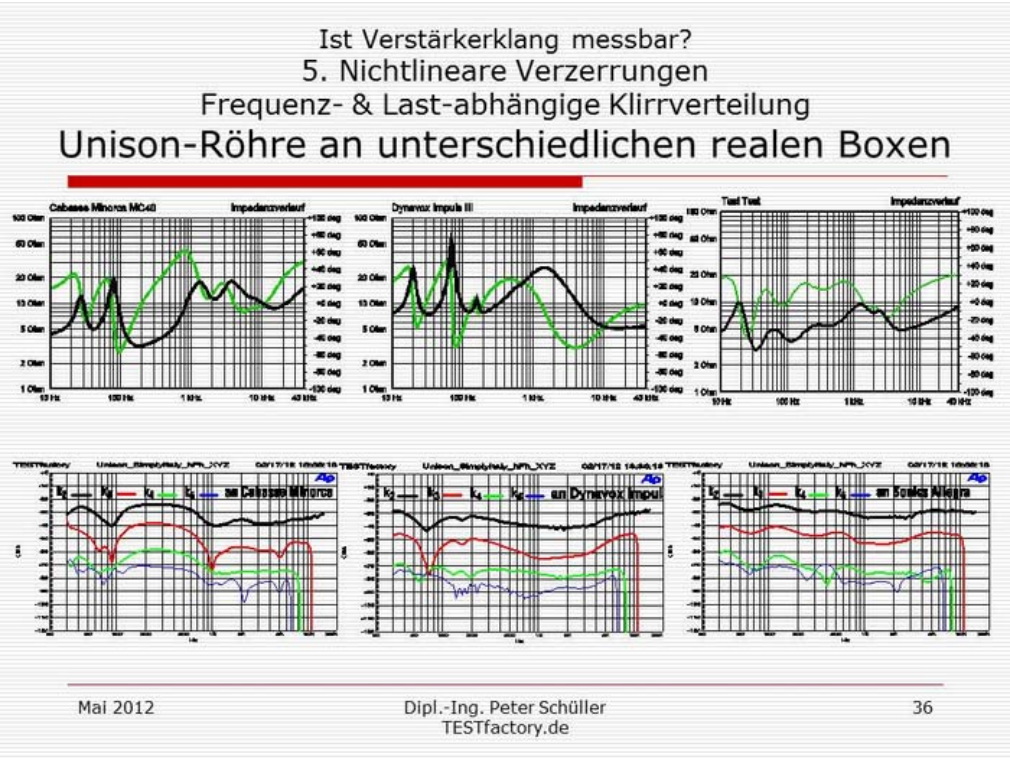
Wer es noch ausführlicher studieren will: Im Aprilheft 2012 von stereoplay haben wir auf den Seiten 44 und 45 alles ausführlich erklärt und mit verschiedenen Beispielen aufgezeigt, worauf es dabei ankommt.

You can study more on the above given findings in the April 2012 magazine (Slide 34).



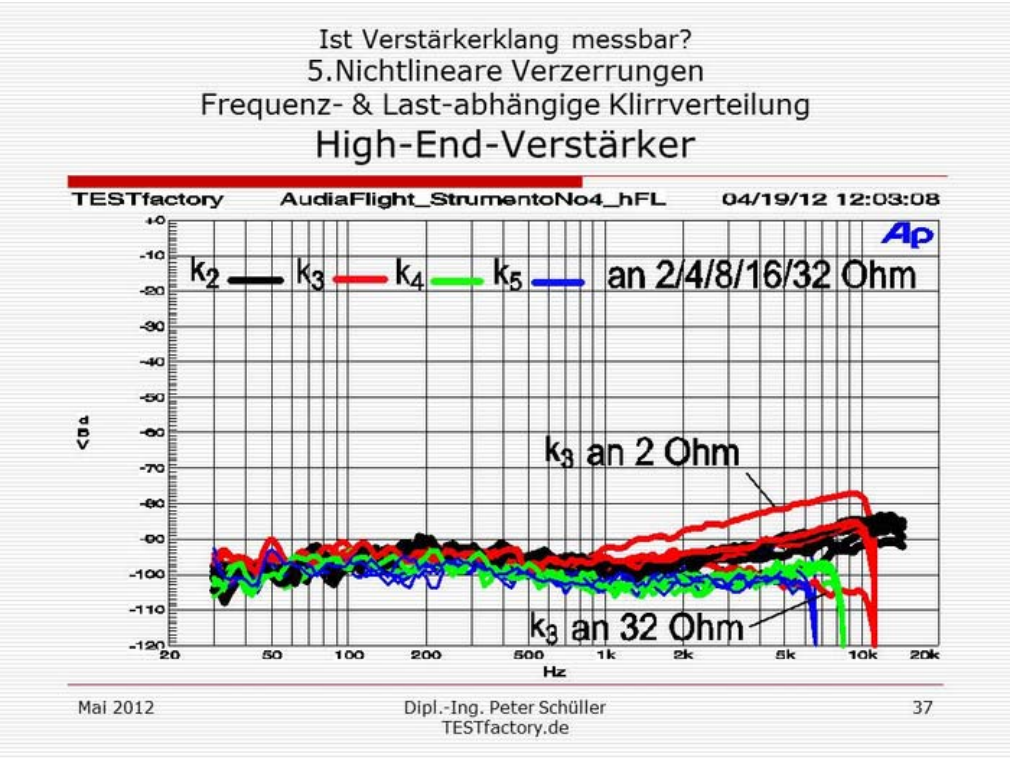
Am Beispiel der Simply Italy-Triode haben wir auf Seite 46 diese Messung auch an verschieden realen Lautsprechern aufgezeigt. Doch Vorsicht: Hier hat der Druckteufel zugeschlagen, Diagramme vertauscht und falsche eingebaut. Wie es richtig ist, zeigt die folgende Folie.

As reality test we've also tested our new measurement approach by loading the Unison with 3 different loudspeakers (Slide 35). Unfortunately, sub-editing didn't work right and some diagrams were located at the wrong places on the magazine pages. The next slide will show the right positioning.



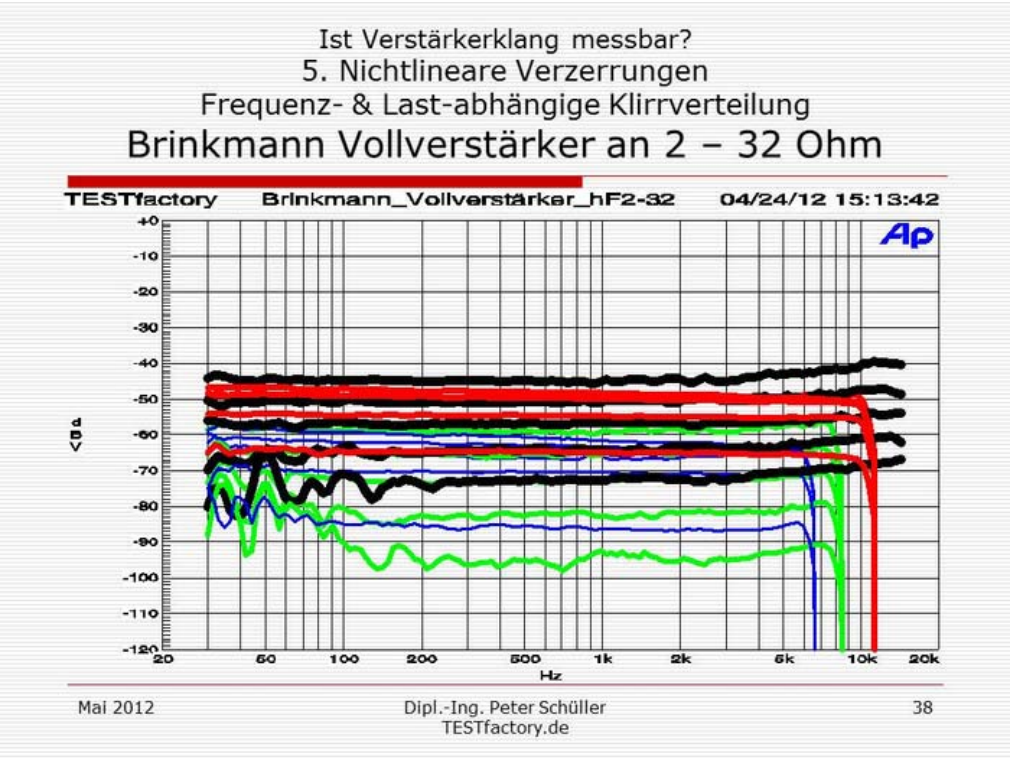
Hier die Korrektur der vertauschten und verwechselten Diagramme auf Seite 46 der April-Ausgabe von stereoplay. Gut zu erkennen ist, dass der Verlauf der einzelnen Harmonische über die Frequenz vom Impedanzverlauf umgekehrt proportional geprägt ist. Das ist zwar nicht Ideal, wichtiger scheint jedoch zu sein, dass die Ordnung, also die Abstufung der Harmonischen untereinander stets erhalten bleibt. Auch die Dominanz der Klirrkomponente k2, der sich alle höheren Harmonischen unterordnen, kann möglicherweise zum hervorragenden Klangergebnis dieses Ausnahmeverstärkers beigetragen haben.

Here comes the correction. On Slide 36 we've moved the diagrams at the right places and we can understand now that the frequency dependent course of each single harmonic becomes triggered reverse proportional to the course of the output load. This is not the ideal case, of course. However, it seems to be an important issue that the grading of the harmonics becomes always preserved. Probably, the dominant k2 may add significantly to the extra sound reproducing capabilities of this exceptional amp.



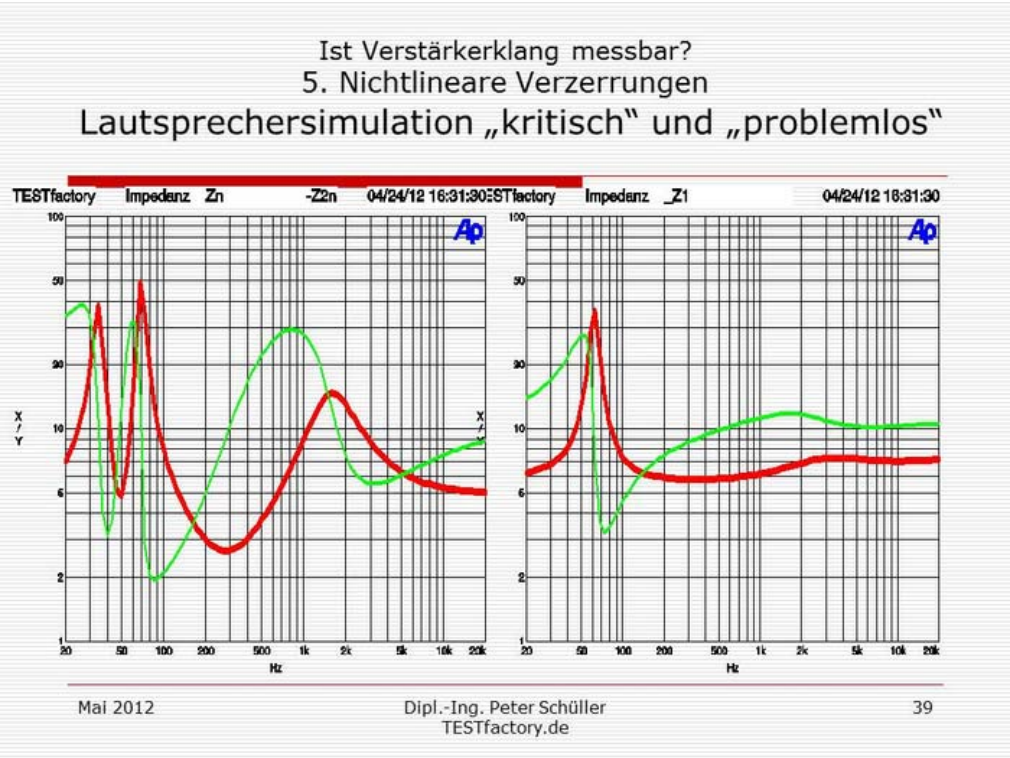
Wie soll also der Ideale Verstärker beschaffen sein? Er darf keine linearen Verzerrungen aufweisen, also extrem breitbandig sein, auch an niederohmiger Last, sein Ausgangswiderstand muss niedrig sein und sich wie ein ohmscher Widerstand verhalten, rückwärts eingespeiste Rechtecksignale dürfen keine Überschwinger hinterlassen und nichtlineare Verzerrungen dürfen möglichst erst gar nicht entstehen. Nicht möglich? Mit extremen Aufwand, wie hier beim High-End-Verstärker von Audia Flight, kann man dem Ideal schon sehr nahe kommen. Lediglich bei der Klirrkomponente k3 verläuft, wie hier zu sehen, noch nicht ganz perfekt.

Now, how should the ideal amp look like?
On Slide 37 we see the frequency and load dependent harmonic traces of the high-end amp Audia Flight. It should answer the question by the following measures:
1. No linear distortions
2. Extremely broad frequency bandwidth
3. Output resistance low and it must behave like a pure resistance
4. Rectangle signals fed into the amps loaded output should show no overshots
5. Nonlinear distortions must be prevented from coming into being.
Not possible?
The Slide 37 example comes close to the perfect state. With one exception: k3 still shows a nasty behaviour with growing frequency.



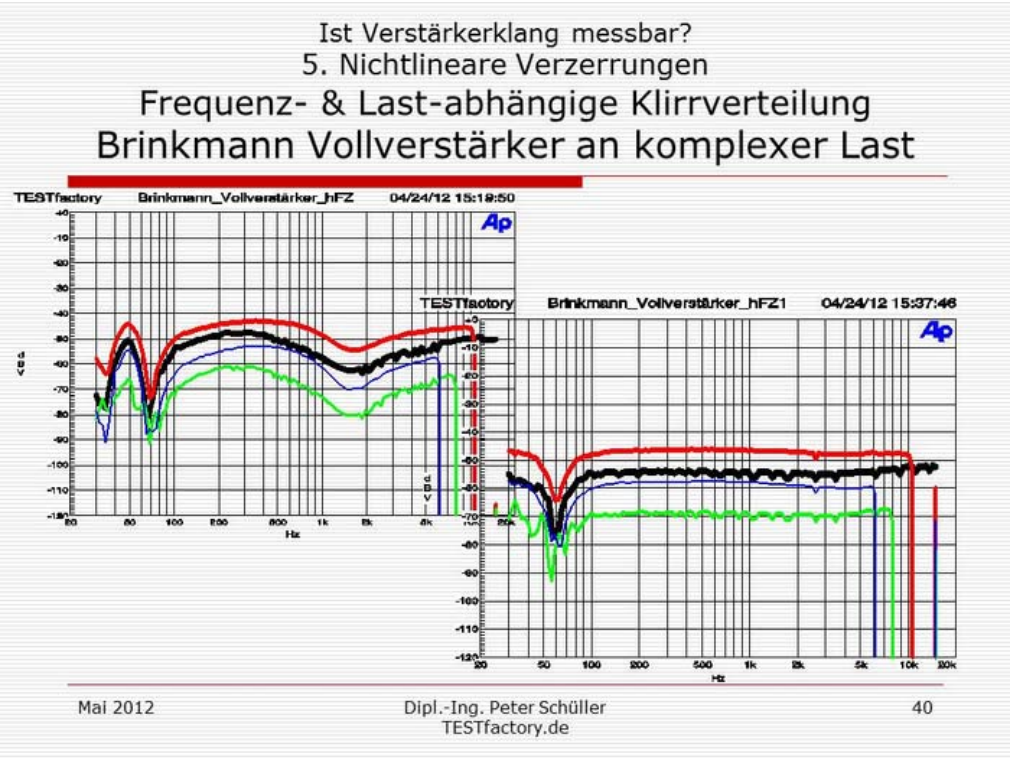
Und der Brinkmann? Hält er auch der neuen Klirr-Analyse stand? Wie hier zu sehen, schlägt er sich ganz wacker mit sehr frequenzneutralen Klirrkomponenten – zumindest an unterschiedlichen ohmschen Lasten bleibt die Harmonischen-Abstufung gut erhalten.

Well, let's move back to the above mentioned Brinkmann now. How does it behave under the light of the new measurement approach? The Slide 38 traces show a rather good performance with rather neutral frequency dependent grading of the harmonics versus the different resistive output loads.



An komplexen Lautsprechernachbildungen, die hier einen „schwierigen" und einen problemlosen Lautsprecher darstellen, werden auch beim Brinkmann die Klirrverläufe von den Impedanzen beeinflußt.

In contrast to Slide 38 and by loading the Brinkmann output with different complex loads (Slide 39 left: difficult load; on the right: more simple solution) we get the corresponding impedance dependent harmonic courses on Slide 40.



Wenn auch der Klirrverlauf impedanzgeprägt ist, bleibt die Feststellung wichtig, dass die Abstufungen erhalten bleiben. Die Einflussnahme ist, wie hier zu sehen, dann besonders gering, wenn ein Lautsprecher mit ausgewogenem Impedanzverlauf betrieben wird.
Allgemein gilt es festzuhalten, dass das Verzerrungsverhalten eines Verstärkers immer von der angeschlossenen Last verändert wird – bei komplexer Last durch die zusätzliche Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom noch stärker, als bei ohmscher Last.
Was lernen wir aus dem gesagten? Wenn schon Verzerrungen bezahlbarer Verstärker nicht gänzlich vermeidbar sind, sollten sie - zumindest an ohmschen Lasten – stets harmonisch abgestuft und frequenzneutral sein. Oder an die Lautsprecherentwickler gerichtet: Baut Lautsprechern, mit im wichtigen Hörbereich ausgewogenen Impedanzverläufen. Dann steht einer günstigen Liaison nichts im Wege.

Although the course of the harmonics on Slide 40 is impedance dependent we notice that the corresponding grading keeps valid. The influence on the harmonics becomes less severe as long as the loudspeaker offers less fluctuating impedance values.
Generally we found out that the distortion mechanisms of amps got always heavily triggered by the kind of output load; hence, it changes more or less from load to load. In addition, with a complex load the phase shift between output signal voltage and current plays a significant role too.
What can we learn from the above given findings?
It is not avoidable that low-price amps produce significant portions of harmonics. A good case would be frequency independency and regular grading of its harmonics, at least with resistive output loads. A strong appeal goes in direction of the loudspeaker development folks: Let's have more loudspeakers with balanced (flat) impedances. Then, nothing would prevent us from having a very fruitful liaison.

Und solche Lautsprecher gibt es tatsächlich auf dem Markt - beispielsweise die Elise II von Progressive Audio!

Ende des Vortrags

Well, of course, there are loudspeakers on the market that nearly fulfil the above mentioned requirements: the Elise II, produced by Progressive Audio (impedance and phase traces see Slide 41).

End of lecture