

11.6 Nichtlineare Verzerrungen

Die Nachrichtentechnik unterscheidet sehr sorgfältig zwischen linearen und nichtlinearen Signalverzerrungen: Ein lineares System verursacht nur lineare Verzerrungen, ein nichtlineares System produziert (so es speicherfrei ist) nur nichtlineare Verzerrungen. Die Vermischung von linearen und nichtlinearen Effekten versucht man dadurch zu vermeiden, dass man Untersysteme definiert, die rein lineare bzw. rein nichtlineare Verzerrungen produzieren.

Bei einem **linearen System** (z.B. Verstärker) gilt Proportionalität, Superposition und Quellenfreiheit. Die letzte Eigenschaft ist schnell erklärt: Ohne Eingangssignal kein Ausgangssignal. Zu einem von null verschiedenen Ausgangssignal \tilde{y} muss ein von null verschiedenes Eingangssignal \tilde{x} existieren. Verdoppelt man \tilde{x} , muss sich auch \tilde{y} verdoppeln – das ist Proportionalität. Man erkennt schnell, dass die "lineare Funktion" der Mathematik, die durch die lineare Gleichung $y = kx + m$ definiert wird, nur dann die Forderung nach Proportionalität und Quellenfreiheit erfüllt, wenn m gleich null ist. Der Superpositions- oder Überlagerungssatz besagt, dass die Abbildung einer Summe gleich der Summe der abgebildeten Summanden sein muss. Also: $y = T\{x\}$ stellt die Abbildung des Eingangssignals x auf das Ausgangssignal y dar. Liegt am Systemeingang die Summe zweier Signale, muss im linearen System gelten:

$$y = T\{x_1 + x_2\} = T\{x_1\} + T\{x_2\} \quad \text{Superposition beim linearen System}$$

Dass Proportionalität und Quellenfreiheit alleine nicht ausreichen, um lineares Verhalten zu spezifizieren, zeigt der ideale **Vollweggleichrichter** (der das Vorzeichen negativer Eingangssignale umdreht): Er ist quellenfrei, zum n -fachen Eingangssignal gehört das n -fache Ausgangssignal, aber sobald man am Eingang ein zusätzliches Signal (z.B. Gleichspannung) addiert, ändert sich die Ausgangskurvenform – der Gleichrichter ist nichtlinear.

Man ist versucht, das lineare System auf die Abbildungsformel $y = kx$ zu reduzieren, schließt damit aber unzulässigerweise die Gruppe der Differentialgleichungen bzw. die Speicherfähigkeit aus. Ein System, das die Geschwindigkeit eines Massepunktes auf seine Beschleunigung abbildet, ist ein (zeitlicher) **Differenzierer***. Dieses System erfüllt die Bedingungen der Quellenfreiheit [$d/dt(0) = 0$], der Proportionalität [$d/dt(kx) = k \cdot dx/dt$], und auch der Superposition: $d/dt(\xi + \mu) = d\xi/dt + d\mu/dt$. Der Differenzierer ist ein lineares System, obwohl seine Übertragungskennlinie bei Sinusaussteuerung keine Gerade, sondern eine Ellipse ist. Die von einem linearen System verursachten **linearen Verzerrungen** werden üblicherweise für die Aussteuerung mit sinusförmigen Signalen als Amplituden- und Phasen- bzw. Laufzeitverzerrungen angegeben, grafisch im Amplituden- und Phasenfrequenzgang dargestellt. Die von einem RC-Hochpass verursachte Bassabsenkung ist eine lineare Signalverzerrung, ebenso wie die Präsenzhebung eines Equalizers (der natürlich nicht übersteuert sein darf). Auf eine impulsartige Anregung reagiert der Resonanzkreis des Equalizers mit (theoretisch unendlich langem) Nachschwingen, engl. "Ringing" genannt. Eine Signalverzerrung, zweifelsohne. Aber eine lineare. Leider wird gerade bei der populär-"wissenschaftlichen" Beschreibung von Lautsprecher-Eigenschaften häufig nicht zwischen linearen und nichtlinearen Verzerrungen unterschieden. **Nichtlineare Verzerrungen** entstehen, wenn ein System mindestens eines der o.g. drei Linearitätskriterien nicht erfüllt – es ist dann ein nichtlineares System. Wann immer möglich, versucht man lineare und nichtlineare Verzerrungen in (u.U. nur modellmäßig existierende) Subsysteme aufzuteilen: Ein durch seine Übertragungsfunktion beschriebenes lineares System, und ein durch seine gekrümmte Übertragungskennlinie definiertes (speicherfreies) nichtlineares System.

* Die Formeldarstellung soll Platz sparen; sie erfüllt u.U. nicht die Erwartungen aller Mathematiker.

In vielen Fällen ist es aber nicht möglich, ein reales System in *ein* lineares und *ein* nichtlineares System aufzuteilen: Da bei nichtlinearen System die (kommutative) Vertauschbarkeit der Reihenfolge nicht mehr gegeben ist, braucht man u.U. mehrere Subsysteme – die Beschreibung kann dann hochkompliziert werden. Auch der dynamische **Lautsprecher** hat mehrere Nichtlinearitäten, die sich nicht alle im selben Subsystem modellieren lassen: Den auslenkungsabhängigen Kraftfaktor (aka. Wandlerkonstante Bl), die auslenkungsabhängige Steifigkeit der Membranaufhängung, und die ebenfalls auslenkungsabhängige Induktivität. Ist der Lautsprecher in ein dichtes Gehäuse eingebaut, kommt noch die nichtlineare Steifigkeit der vom Gehäuse verursachten Luftfederung dazu, ist er in ein Bassreflexgehäuse eingebaut, sorgt die im Tunnel entstehende Strömung für Nichtlinearitäten. All diese Nichtlinearitäten verursachen eine nichtlineare Übertragungscharakteristik, sie wirken aber auch auf die elektrische Seite zurück und erzeugen eine stark nichtlineare Lautsprecher-Impedanz. Hinzu kommen die im Verstärker und ggf. Ausgangsübertrager erzeugten Nichtlinearitäten, sodass ein kompliziertes, gekoppeltes nichtlineares System entsteht, das zu allem Überfluss auch noch ausgeprägte lineare Verzerrungen produziert.

Bei einem in ein rückseitig offenes Gehäuse eingebauten Lautsprecher darf man die Nichtlinearität der Luft vernachlässigen. Tieffrequent kann man zunächst auch die Induktivität außer Acht lassen, sodass als erste Näherung ein nichtlineares mechanisches Subsystem und ein nichtlineares magnetisches Subsystem übrig bleiben. Mechanisch nichtlinear ist die Steifigkeit der Membranaufhängung, also die innere Zentrierung (Spinne, Spider) und die äußere Befestigung (Sicke, Surround). Lenkt man die Membran langsam aus ihrer Ruhelage aus, arbeitet man gegen eine progressive Feder, die um so steifer wird, je weiter man auslenkt. Die Federsteifigkeit ist eine Systemgröße, die Auslenkung ist eine Signalgröße. Wenn eine Systemgröße signalabhängig ist, liegt immer ein nichtlineares System vor. Die offensichtliche Nichtlinearität des Magnetsystems ist die Wandlerkonstante (der Kraftfaktor): Sie stellt als Systemgröße Bl die Proportionalität zwischen Strom und Lorentz-Kraft her: $F = Bl \cdot I$. Diese Proportionalität erfordert aber, dass die Systemgröße Bl signalunabhängig ist; im Speziellen: Auslenkungsunabhängig. Ist sie aber nicht, denn mit zunehmender Auslenkung entfernt sich die Schwingspule aus dem Magnetfeld, und somit nimmt Bl ab. Hierbei kann ein weiterer Effekt eine Rolle spielen: Bei Stromfluss überlagern sich zwei Magnetfelder: Das Permanentfeld des Dauermagneten, und das den Schwingspulendraht umgebende Wechselfeld. Da die im Magnetkreis liegenden Ferromagnetika alle eine nichtlineare Charakteristik aufweisen (die spezifische Magnet-Leitfähigkeit μ ist feldabhängig), können "Magnetfeldmodulationen" entstehen. Einige Hersteller versuchen mit Kurzschlussringen diese Modulationen zu verringern, einige unternehmen nichts dagegen und sehen sie als typisch an. Und da beginnen die Besonderheiten der **Gitarrenlautsprecher**: Während bei HiFi-Boxen Einigkeit herrscht, dass ihre Nichtlinearitäten möglichst gering sein sollten, divergieren die Meinungen beim Gitarren-Lautsprecher erheblich. Da ist einerseits zu hören (bzw. zu lesen), dass ein Gitarren-Lautsprecher doch auch ein Lautsprecher sei (richtig), und dass deshalb nicht falsch sein kann, was in angestammten HiFi-Gefilden jahrzehntelang richtig war (?). Andererseits lassen (positive) Bewertungen wie "dirty midrange" hoffen, dass zumindest einige Konstrukteure die klangformende Funktion des Gitarren-Lautsprechers erkannt haben.

Es soll aber nicht verschwiegen werden, dass nicht nur bei den Herstellern, sondern auch bei den Gitarristen Meinungspluralismus vorherrscht. Da ist der Jazzgitarrist, der die mühsam in die Gitarre gezauberten Brillanzen brutal mit dem Tone-Poti abwürgt, der County-Gitarrist mit schneidenden Höhen, der crunchende Blueser und der sägende Metalller, der Tanzmucker und der volkstümelnde Almdudler, und viele andere mehr. Der Wunsch nach standardisierten Lautsprecher-Verzerrungen darf in diesem heterogenen Meinungsmix nicht erwartet werden.

Ein Beispiel aus der Lautsprecher-Historie: **JBL**, der große amerikanische Lautsprecher-Hersteller, blickt auf eine lange Tradition als Ausstatter von Kinos, Studios und Wohnzimmern zurück. High Fidelity pur, mit – natürlich – geringen nichtlinearen Verzerrungen: ... *"low distortion which have been always associated with JBL products"*. Anfang der Sechzigerjahre wächst nun die Nachfrage nach Instrumental-Lautsprechern, und so modifiziert man bei JBL ein bewährtes Arbeitspferd, den D-130, zum Gitarrenlautsprecher **D-130F**. Die Änderungen betreffen im Wesentlichen den Luftspalt, der nach Aussage des Konstrukteurs (Harvey Gerst) geringfügig vergrößert wurde, um Beschädigungen vorzubeugen. Und die Typbezeichnung: Das zusätzliche F steht für **Fender**, den größten Kunden. Jahre später folgt der **K-130**, mit gegenüber seinem Vorgänger verdoppelter Belastbarkeit, aber immer noch *"clean at any volume level"*. Was man von den zugehörigen Musikern wohl nicht immer sagen konnte. Sowohl der D-130F als auch der K-130 waren mit Alnico-Magneten bestückt, die darauffolgende Generation der **E-Serie** bekommt aber Keramik-Magnete. Was JBL's Mastermind John Eargle zu einem Statement veranlasst, da ja Alnico für seine *"inherently low distortion performance"* bekannt war. Doch die neue E-Serie, so J.E., ist noch besser: *"The improvement has been in reducing second harmonic distortion"*, erzielt mit der *"symmetrical field geometry"*. Hiermit eignet sich dieser Lautsprecher dann bestens *"für Gesang – und Gitarre"*. Vermutlich ist die in der Werbung aufgeführte Liste der JBL-benutzenden Musiker damit noch länger geworden. Aus Platzgründen kann ihrer leider nicht im vollen Umfang gedacht werden, deshalb nur ein Auszug: Count Basie, Harry Belafonte, Tony Curtis, Sammy Davis jr., Doris Day, die unvergessene Carmen Dragon, Duke Ellington, Ella Fitzgerald, Hugh Hefner (!), Dean Martin, Frank Sinatra, und nicht zu vergessen: Richard Nixon und John Wayne*. Alles Weltstars, alles JBL-User. Das ruft natürlich die Konkurrenz auf den Plan, die damals wirklich noch so heißt, und noch nicht Wettbewerb. Und so geschah es, dass **Electro-Voice** zum Gegenschlag ausholt und verkünden lässt: *"Symmetrical magnet gap structures have been promoted as desirable in a guitar speaker. We have found this to be a fallacy"*. Weil: *"A coil moving in an asymmetrical magnetic gap will generate a mixture of odd and even harmonics, resulting in a more complex, richer sound."* Wie sagt der Bayer hierzu so treffend: Für den, der's mog, is des des Häxde. Oder, FJS gedenkend: Non est disputandum.

Gönnen wir also John Wayne den unverzerrten JBL-Sound seiner E-Gitarre (?), und Carlos Santana den aus dem Boogie tschilpenden EV-Sound – ein jeder nach seiner Façon. Was lässt sich aus physikalischer Sicht zur **magnetischen Nichtlinearität** sagen? Wenn man den Polkern (den Zylinder im Innern der Schwingspule) auf seiner ganzen Länge als Zylinder belässt, wie in **Abb. 11.63** im linken Bild dargestellt, entsteht ein unsymmetrisches Streufeld: Der Feldverlauf über der Schwingspule ist anders als unter ihr. Reduziert man hingegen den Kerndurchmesser im unteren Teil (hier etwas übertrieben dargestellt), werden die beiden Streufelder symmetrischer, mit der Konsequenz, dass auf die Schwingspule für positive und negative Auslenkungen eine symmetrische Lorentz-Kraft wirkt. Diese Kraft ist – wie schon erwähnt – strom- und auslenkungsabhängig. Die Stromabhängigkeit ist erwünscht, die Auslenkungsabhängigkeit nicht, denn sie erzeugt nichtlineare Verzerrungen. Beim symmetrischem Feld sind das Verzerrungen gerader Ordnung (gerade Funktion), bei Unsymmetrie kommen auch Verzerrungen ungerader Ordnung hinzu.

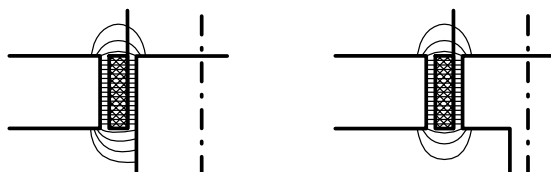


Abb. 11.63: Verschiedene Ausführungen des Polkerns. Im linken Bild rein zylindrisch, im rechten Bild abgesetzt. Das außerhalb des Luftspaltes erzeugte Streufeld hängt von der Geometrie des Polkerns ab.

* Aus JBL's 1968er Lautsprecher-Prospekt.

Die beidseitige Feldbegrenzung führt zu einer degressiven (gestauchten, "geclippten") Strom/Kraft-Kennlinie, woraus häufig die Vermutung abgeleitet wird, der Schwingungsverlauf sei nun auch begrenzt, ähnlich einem übersteuerten Verstärker. Hierbei wird jedoch übersehen, dass nur im unterresonanten Bereich die Kraft über das Hookesche Gesetz auf die Auslenkung abgebildet wird. Bei Resonanz wirkt die Membran (im einfachen Modell) als Widerstand, überresonant als Masse [3]. Wenn überresonant bei großer Auslenkung die Antriebskraft schwächer wird, reduziert dies primär die *Beschleunigung*. Natürlich ist hiervon auch die Auslenkung betroffen, aber: Auslenkung und Beschleunigung sind gegenphasig. Oder etwas präziser: Die Beschleunigung ist die zweite zeitliche Ableitung der Auslenkung. Analytisch beschrieben folgt daraus eine nichtlineare Differentialgleichung, deren Lösung näherungsweise möglich ist – aber nur mit großen Aufwand (das System ist nicht schwach, sondern extrem nichtlinear).

Die qualitativen Auswirkungen der Magnetfeld-Inhomogenität lassen sich ganz gut am einfachen **Membranmodell** studieren [3]: Reduziert man die Membran auf Feder, Masse und Dämpfer, und die Elektrik auf den reellen Schwingspulen-Widerstand, entsteht ein System 2. Ordnung, das durch **Polfrequenz** (Resonanzfrequenz) und **Polgüte** beschrieben werden kann. Die Polfrequenz ergibt sich eindeutig aus Steifigkeit und Masse, bei der Polgüte sind zwei Grenzfälle von Bedeutung: Elektrischer Leerlauf, und Kurzschluss. Im Leerlauf (Klemmen offen) fließt kein Strom, folglich überträgt das Magnetfeld keine Kraft auf die Membran, ihre Polgüte hängt nur von den mechanischen Parametern ab: $Q = \sqrt{sm}/W$. Die rein mechanische Dämpfung der Membran ist relativ klein, sodass die Polgüte deutlich größer als 1 ist (5 ist nicht ungewöhnlich). Schließt man die elektrischen Klemmen kurz, bzw. schließt man einen Verstärker mit sehr kleinem Innenwiderstand an, so wirkt der von der elektrischen Seite auf die mechanische Seite transformierte Schwingspulenwiderstand als zusätzliche Bedämpfung*, und die Polgüte nimmt auf Werte unter 1 ab. Da mit großer Auslenkung die elektromechanische Kopplung (wegen der Feldinhomogenitäten) kleiner wird, nimmt folglich bei großer Aussteuerung die Membranbedämpfung ab – die Auslenkung wird tendenziell zu groß, und nicht im Sinne degressiver Begrenzung zu klein [3, Kap. 6.2.3].

Bei asymmetrischem Magnetfeld sind die an den Extrempunkten der Membranauslenkung wirkenden Rückstellkräfte (betragsmäßig) ungleich, was bedeutet, dass der Kraft-Mittelwert nicht null ist: Es entsteht eine Gleichkraft (eine Kraft der Frequenz null), die die Membran aus ihrer Ruhelage in Richtung zum schwächeren der beiden Randfelder drückt. Und da in der Realität die Randfelder niemals exakt symmetrisch sind, tritt dieser Effekt immer auf: Eine kleine Unsymmetrie reicht, die Membran wandert etwas aus ihrer Ruhelage, dies verstärkt die Unsymmetrie, die Membran wandert weiter, und wird erst durch die einsetzende Gegenkraft der Membranaufhängung stabilisiert. Deshalb ist beim überresonanten Betrieb mit quadratischen Verzerrungen zu rechnen – auch wenn ein symmetrisches Magnetfeld vorliegt.

Eine weitere Quelle quadratischer Verzerrungen ist die "Feldmodulation": Ein Teil des bei Stromfluss erzeugten Magnetfeldes überlagert sich dem stationären Feld des Dauermagneten, dessen Flussdichte schwankt somit synchron zum Erregerstrom. Damit erhält die Kraft einen Anteil, der vom *Quadrat* des Stromes abhängt, und dies bedeutet quadratische Verzerrungen. Diesen Effekt könnte man auch anders erklären: Stromfluss bewirkt Anziehungskräfte zu den benachbarten (felddurchflossenen) Ferromagnetika. Diese Anziehungskräfte sind vorzeichenunabhängig, und erzeugen somit (wie ein Vollweggleichrichter) Verzerrungen gerader Ordnung. Abhilfe, so man möchte: Ein Kurzschlussring drängt das Wechselfeld aus dem Magnetkreis, die quadratischen Verzerrungen nehmen ab.

* Ein ähnliches Prinzip bremst als Wirbelstrombremse Lastwagen und Züge ab.

Einen ersten Eindruck von der Linearität bzw. der Nichtlinearität eines Lautsprechers liefert die Analyse des Stromes bei Spannungseinprägung. Die mechanische Membranimpedanz F/v wird über das Quadrat der Wandlerkonstante auf die elektrische Seite transformiert. Die elektrische Impedanz besteht (bei Vernachlässigung der Induktivität) aus zwei Komponenten: Dem Schwingspulenwiderstand (z.B. 6Ω), und der transformierten mechanischen Impedanz. Nichtlinearitäten der elektrischen Impedanz (**Stromverzerrungen** bei Spannungseinprägung) können somit zwei Ursachen haben: Eine nichtlineare Wandlerkonstante (Bl), und/oder eine nichtlineare Membranimpedanz. Beim Lautsprecher sind beide Effekte anzutreffen: Sowohl die Steifigkeit der Membranaufhängung, als auch die Wandlerkonstante sind auslenkungsabhängig. In **Abb. 11.64** sind Stromverläufe für den Betrieb in Resonanznähe dargestellt, die Verzerrungen sind ganz erheblich. Dabei beträgt die Spannung nur $10 V_{\text{eff}}$, das bedeutet für diesen $8\text{-}\Omega$ -Lautsprecher (eines 60-W -Verstärkers) nominell 12.5 W . Und da die Impedanz in Resonanznähe maximal wird, ist die tatsächlich aufgenommene Leistung noch wesentlich geringer, sodass keinesfalls von unzulässigem Überlast-Betrieb gesprochen werden kann. Die Kurven offenbaren eine starke quadratische Verzerrung, wobei die Amplitude der zweiten Harmonischen bis auf 67% der Amplitude der ersten Harmonischen ansteigt; dies entspricht einem Strom-Klirrfaktor von $k_2 = 56\%$ (die Näherung U_2 / U_1 sollte bei derartigen starken Verzerrungen nicht mehr verwendet werden). Es liegt jenseits der Zielsetzung dieses Kapitels, die einzelnen Ursachen dieser Verzerrungen zu lokalisieren bzw. zu trennen – der Aufwand wäre zu groß. Stattdessen werden vergleichende Verzerrungsmessungen vorgestellt, die übereinstimmend ergeben, dass alle untersuchten Lautsprecher auch bei moderater Ansteuerung stark nichtlineare Systeme sind. Was bei Gitarristen ja nicht generell unerwünscht ist.

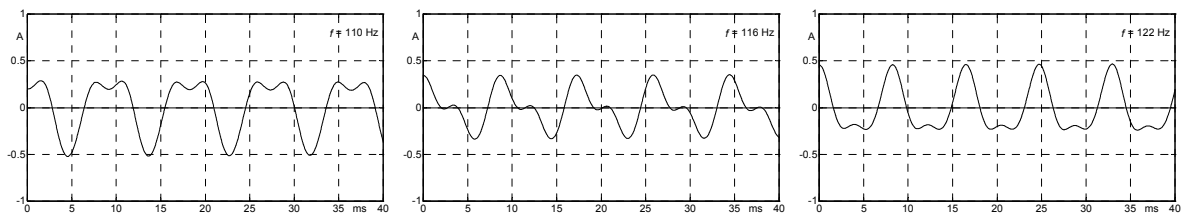


Abb. 11.64: Zeitfunktionen des Lautsprecherstroms bei Spannungseinprägung, $U = 10\text{V}$; VOX AD60-VT.

Die Verzerrungsfrequenzgänge (**Abb. 11.65**) zeigen, dass die maximale Stromverzerrung bei der Hauptresonanz (116 Hz) entsteht; in diesem Bereich ist auch die Auslenkung maximal. Dass die quadratischen Verzerrungen derartig groß werden, hat zwei Ursachen: Bei der Resonanz wird aufgrund der o.a. Nichtlinearitäten die zweite Harmonische des Stroms maximal, gleichzeitig wird aber der Gesamtstrom (wegen der Impedanzzunahme) minimal; die Differenz der beiden zugehörigen Pegel, die Klirrdämpfung, hat deshalb ein ausgeprägtes Maximum. Die Stromverzerrungen beschreiben aber vor allem das elektrische Verhalten, Nichtlinearitäten in der Schallabstrahlung müssen gesondert analysiert werden.

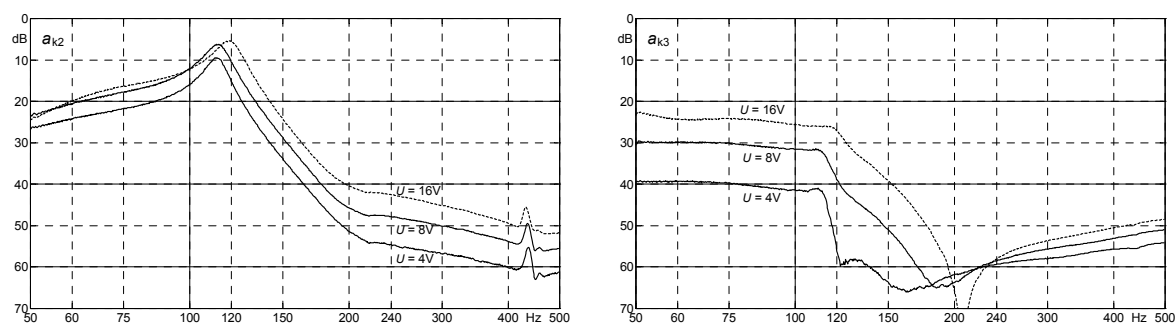


Abb. 11.65: Frequenzabhängigkeit der Strom-Klirrdämpfungen bei Spannungseinprägung (wie **Abb. 11.64**). Die aussteuerungsabhängige Verschiebung des Maximums ist eine Auswirkung der starken Nichtlinearität.

Zur Messung der (nichtlinearen) Schalldruckverzerrung wurde der Lautsprecher im Gehäuse des VOX AD60-VT mit Spannungseinprägung betrieben; die Messung erfolgte im RAR, das Mikrophon befand sich in 3m Abstand auf Achse (**Abb. 11.66**). Die Messergebnisse sind für einen dynamischen Tieftonlautsprecher nicht untypisch: Tieffrequent entstehen sehr starke nichtlineare Verzerrungen, ab 70 Hz nehmen die kubischen Verzerrungen schneller ab als die quadratischen, ab ungefähr 150 Hz bleibt der Klirrfaktor unter ca. 1%. Verglichen mit den Stromanalysen (**Abb. 11.65**) haben die Verzerrungen zumeist noch zugenommen.

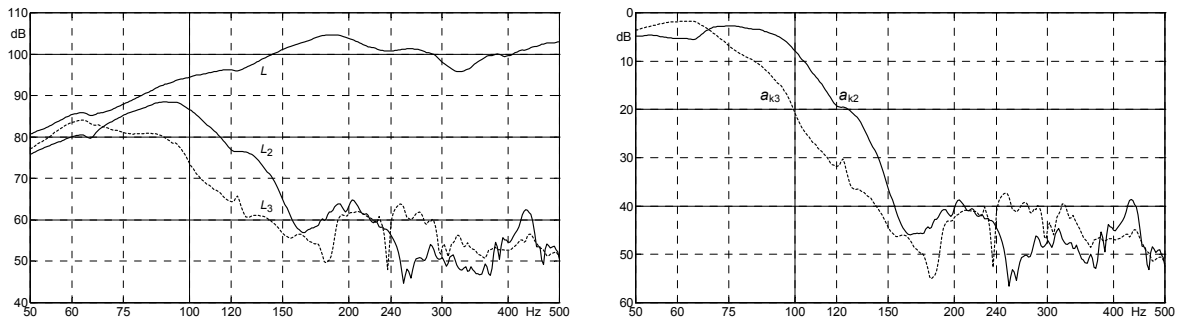


Abb. 11.66: Pegel- (links) und Klirrdämpfungs-Frequenzgänge des Schalldrucks. VOX AD60-VT, $U = 10V$.

1% Klirrfaktor ist für Gitarren-Lautsprecher aber keinesfalls das erklärte Ziel – manche erreichen auch leicht zehnmal so große Verzerrungen: **Abb. 11.67** zeigt Messungen eines anderen Celestion-Lautsprechers, der mit gleicher Spannung im AD60-VT-Gehäuse betrieben wurde: Der Celestion "blue". Und dieser 8- Ω -Lautsprecher ist keinesfalls kaputt – nur stellen für ihn 10 V Spannung schon den Betrieb in der Nähe seiner Belastungsgrenze (15 W) dar. Was nun aber auch wieder nicht heißt, dass 10% Klirrfaktor für den Grenzleistungsbereich typisch sein müssen: Der darunter abgebildete Vintage-30 ist mit 60 W spezifiziert, und verzerrt bei 10 V ähnlich stark wie der Celestion "blue". Da der Vintage-30 offensichtlich als Nachfahre des Blauen konzipiert wurde, ist es nur folgerichtig, dass er ähnlich stark wie dieser verzerrt.

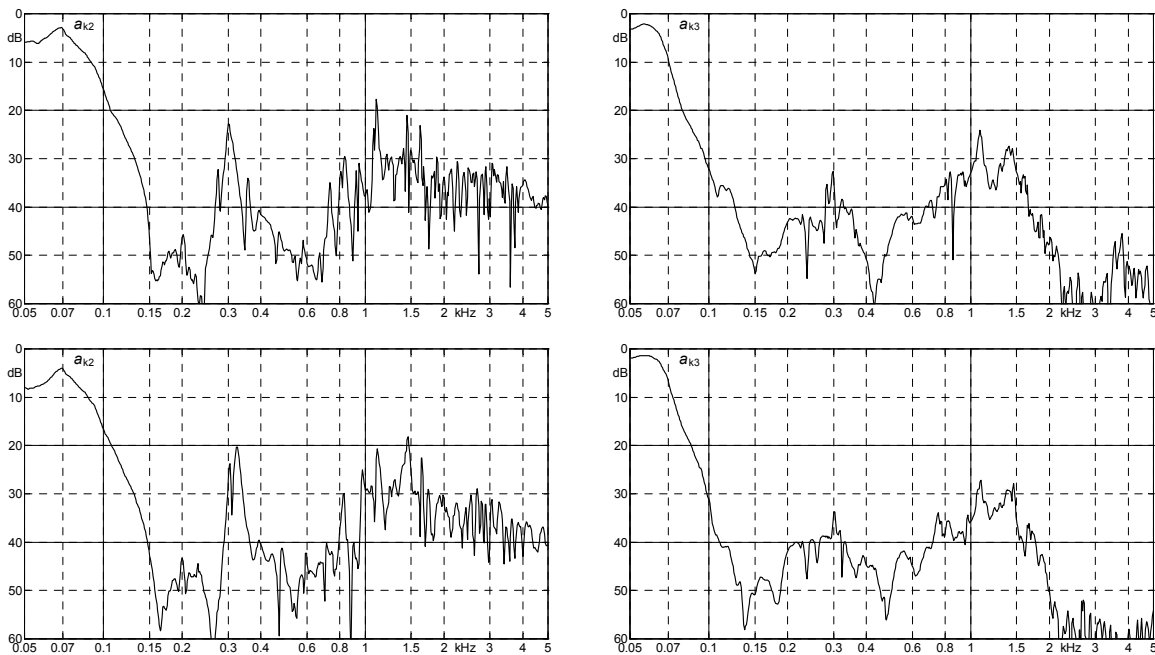


Abb. 11.67: Quadratische und kubische Klirrdämpfungen. Gehäuse = VOX AD60-VT, $U = 10V$, $d = 3m$. Erste Bildzeile: Celestion "blue" ($P_{max} = 15W$); zweite Bildzeile: Celestion Vintage-30 ($P_{max} = 60W$).

Dokumentationen über Lautsprecher-Nichtlinearitäten beschränken sich häufig auf Klirrfaktormessungen, was daran liegen könnte, dass diese ein Standardwerkzeug der Systemanalyse sind. Seit Brüel&Kjaer die legendäre Gerätekombination 2010/1902 auf den Markt brachte, sind bei bandbegrenzten Systemen auch noch Differenzton-Messungen gebräuchlich – es gibt aber noch einen nichtlinearen Verzerrungsmechanismus, der speziell bei Lautsprechern anzutreffen ist: **Subharmonische**. Damit ist die Erzeugung von Verzerrungstönen gemeint, deren Frequenzen niedriger sind als die Anregungsfrequenz, z.B. $f/2$ oder $f/4$. **Abb. 11.68** zeigt hierzu zwei aus dem Schalldruck ermittelte Spektren. An den Lautsprecherklemmen war eine Sinusspannung (10 V) eingepreßt, $f = 1.6$ bzw. 1.5 kHz. Grau hinterlegt sind die (leakageverbreiterten) Spektrallinien, die als normale "harmonische Verzerrung" zu erwarten wären; zusätzlich entsteht aber auch eine Subharmonische, und deren Frequenz-Vielfache. Die Doppelzacken im rechten Bild weisen auf schnelle zeitvariante Vorgänge hin: Das Spektrum entstand aus einem Sweep, die "subharmonischen Verzerrungen" ändern ihre Pegel sehr schnell.

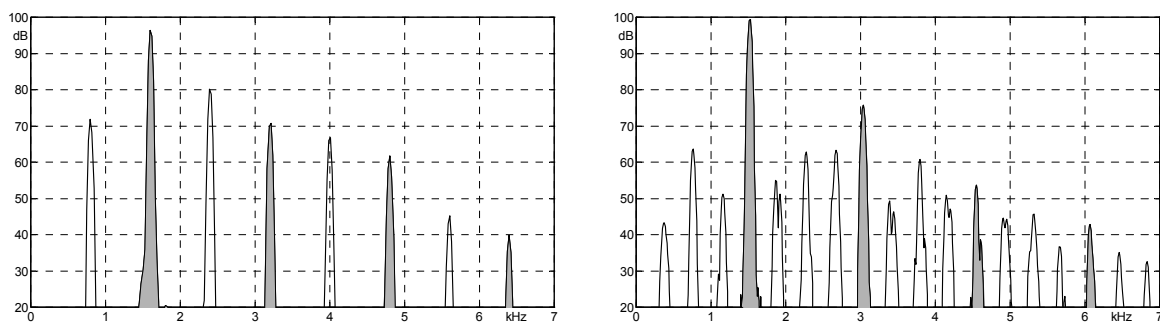


Abb. 11.68: Subharmonische bei der halben (links) bzw. viertelnten Anregungsfrequenz (rechts).

Derartige Subharmonische treten – wenn überhaupt – nur in schmalen Frequenzbereichen auf. **Abb. 11.69** zeigt zwei Spektrogramme, die den Pegel als Grauwert über der f/t -Ebene darstellen. Die unterste ansteigende Kurve gehört zum Pegel der ersten Harmonischen, darüber kommen die Pegel der höheren Harmonischen. Die in der rechten Bildhälfte auftauchenden grauen Punkte bzw. Punktegruppen deuten auf Subharmonische (und deren Frequenzvielfache) hin. Der links analysierte Lautsprecher (Jensen P12-N) zeigt nur bei ca. 1760 Hz Anregungsfrequenz subharmonische Verzerrungen, der rechte (Celestion G12-Century) hingegen ab 920 Hz in mehreren Bereichen. Die Impedanz beider Lautsprecher beträgt 8Ω , beide wurden mit 10 V gemessen. Die maximale Belastbarkeit des C12-N ist mit 50W spezifiziert, die des G12 mit 80W – keiner der Lautsprecher wird also nahe am Limit betrieben.

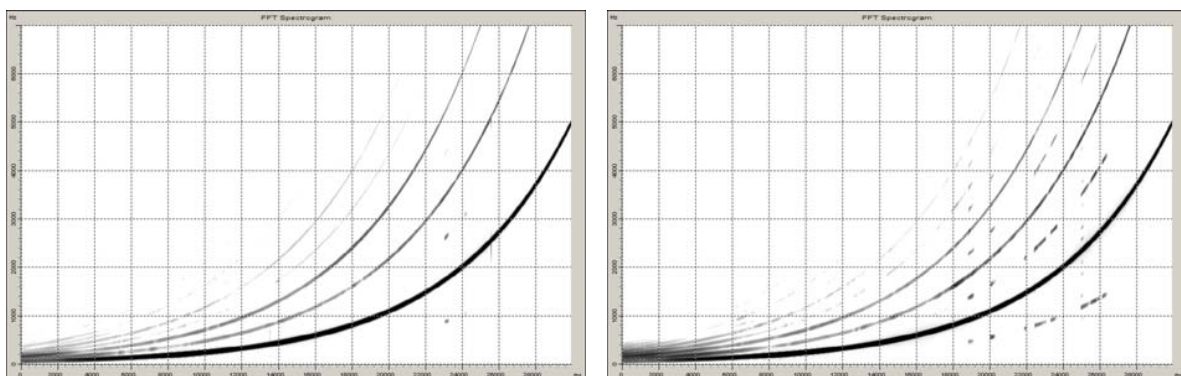


Abb. 11.69: Sweep-Spektrogramme $f = 50 - 5000$ Hz, $U = 10$ V. Der links analysierte Lautsprecher produziert nur bei ca. 1760 Hz subharmonische Verzerrungen, der rechte hingegen in mehreren Frequenzbereichen. Abszissenskalierung: Sweep-Zeit = 0 – 30 s; Ordinatenkalierung: Frequenz = 0 – 7 kHz.

Die Entstehung subharmonischer Verzerrungen ist alleine mit einer gekrümmten Übertragungs-Kennlinie nicht zu erklären. Wie **Abb. 11.70** zeigt, überlagert sich eine Kippschwingung halber Frequenz. Die Mathematik erklärt derartige Phänomene lakonisch (und korrekt) mit "Lösung der nichtlinearen/zeitvarianten Differentialgleichung", die Physik bietet "parametrisch erregte Eigenschwingungen eines Systems mit zeitvarianten Systemgrößen" an. Zeitvariante Größen sind sehr gut vorstellbar: Die Membran verformt sich, die ortsabhängigen Steifigkeiten der Membran sind sicher belastungs- und damit zeitabhängig. Die Schwingung der Membran muss auch keinesfalls eindimensional erfolgen, da sind Kipp- und Taumelbewegungen möglich, das Ganze ist ein komplexes nichtlineares Schwingungssystem. Gleichphasig schwingende Membranbereiche darf man auch erwarten, aber natürlich nicht im ganzen Gebiet – da entstehen Phasenverschiebungen, und da die Systemparameter zeitvariant sind, werden wohl auch die Phasenverschiebungen zeitvariant sein. Einfache Modelle versagen hier, weil z.B. schon das Überlagerungsprinzip nicht mehr angewandt werden darf.

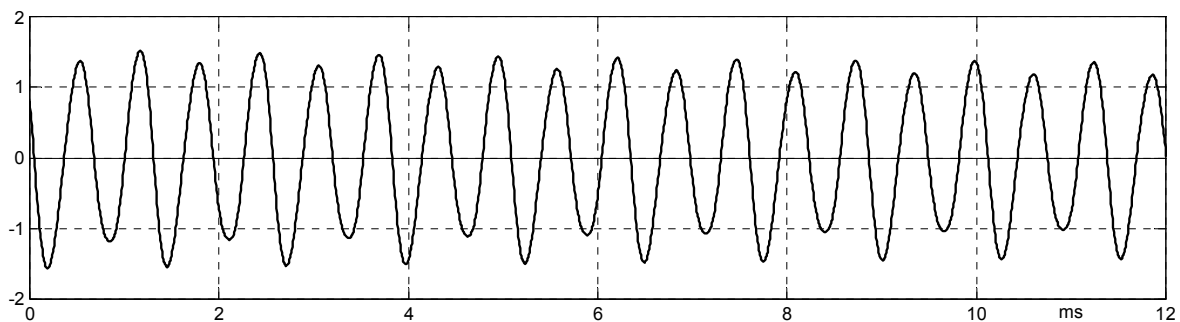


Abb. 11.70: Schalldruck-Zeitfunktion eines subharmonisch verzerrten Sinustones; $f = 1,6$ kHz.

Ein weiteres Beispiel von der Komplexität subharmonischer Verzerrungen soll **Abb. 11.71** vermitteln: Ab 1.5 kHz produziert dieser Lautsprecher nicht nur Subharmonische bei der halben Anregungsfrequenz, sondern u.a. auch bei $f/4$ bzw. $f/5$ (und Vielfachen).

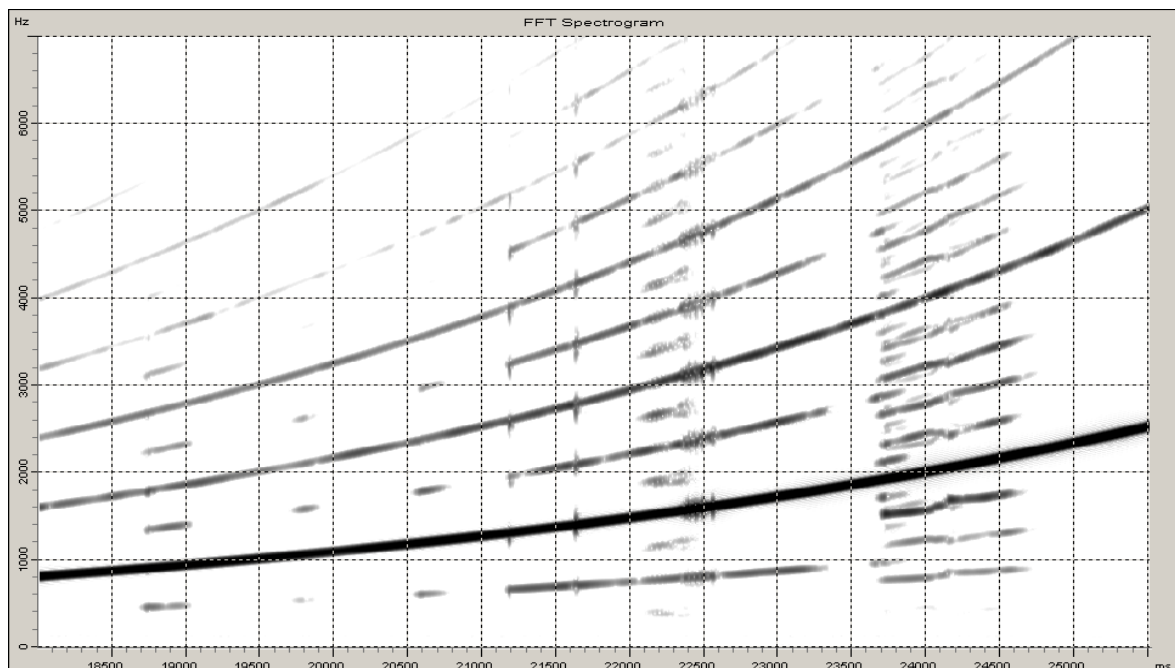


Abb. 11.71: Jensen P12-R, Sweep-Spektrogramm, $f = 800 - 2500$ Hz, $U = 10$ V.

Die **Pegel der Subharmonischen** gehorchen eigenen Gesetzen, sie zeigen nicht einmal näherungsweise die für Standardmodelle zu erwartenden Potenzgesetze. In **Abb. 11.72** ist über dem Pegel des Primärtones (f) der Pegel der Subharmonischen ($f/2$) aufgetragen. Für Primärtonpegel unter einer Schwelle (die hier bei knapp 108 dB liegt) entsteht überhaupt keine Subharmonische. Überschreitet der Primärtonpegel diese Schwelle, schwingt die Subharmonische an. Reduziert man nun den Primärtonpegel unter den Schwellenwert, bleibt der Pegel der Subharmonischen zunächst fast konstant – erst wenn der Primärtonpegel ca. 104 dB unterschreitet, verschwindet die Subharmonische wieder.

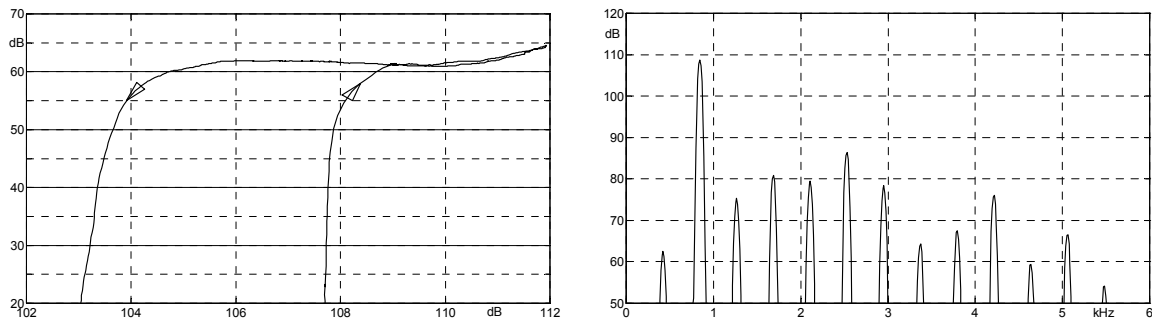


Abb. 11.72: Pegel-Hysterese (links), Verzerrungs-Spektrum (rechts). Celestion Vintage-30, $f = 844$ Hz.

Abb. 11.73 stellt für drei Frequenzen die Pegelverläufe genauer dar. Der Generatorpegel steigt während 30 s um 25 dB, hierzu sind die gemessenen Schalldruckpegel eingezeichnet. Bei 1081 Hz entsteht keine Subharmonische, die Pegel wachsen monoton. Bei ca. 1.3 kHz bildet sich hingegen bei ca. -11 dB (50W / 12.5 = 4 W) eine Subharmonische, was Auswirkungen auf alle gemessenen Harmonischen hat. Ab -9 dB entstehen hörbare Schwebungen.

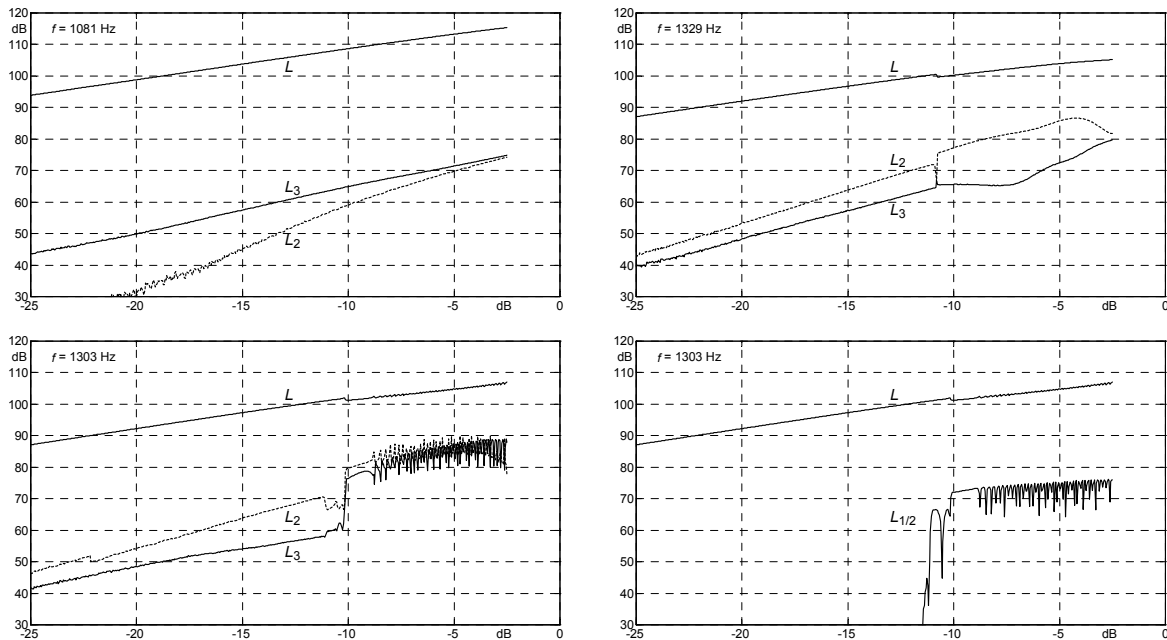


Abb. 11.73: Summen-Schalldruckpegel L und Verzerrungspegel, Eminence L-105; 0dB = Maximalleistung. Rechts unten ist für $f = 1303$ Hz der Pegelverlauf der Subharmonischen ($f/2$) dargestellt.

Die folgende **Abb. 11.74** stellt das nichtlineare Verhalten mehrerer Lautsprecher in einer Übersicht dar; ergänzende Messdaten sind im letzten der drei Bilder angefügt.



Abb. 11.74a: Klirrdämpfungen a_{k2} , a_{k3} verschiedener Lautsprecher. In der rechten Spalte sind jeweils rechts oben die Klirrdämpfungen der Subharmonischen eingezeichnet.

Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten



Abb. 11.74b: Klirrdämpfungen a_{k2} , a_{k3} verschiedener Lautsprecher. In der rechten Spalte sind jeweils rechts oben die Klirrdämpfungen der Subharmonischen eingezeichnet.

Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten



Abb. 11.74c: Klirrdämpfungen a_{k2} , a_{k3} verschiedener Lautsprecher. In der rechten Spalte sind jeweils rechts oben die Klirrdämpfungen der Subharmonischen eingezeichnet. Die eingeprägte Spannung ($10 V_{\text{eff}}$) ergibt am $8\text{-}\Omega$ -Nennwiderstand eine Leistung von 12.5 W . Alle Messungen erfolgten im RAR, die 12- Lautsprecher waren in das Gehäuse des VOX AD60-VT eingebaut, die 15- Lautsprecher in ein dichtes $36\times 74\times 40$ -Gehäuse, die 10- Lautsprecher in ein dichtes $39\times 39\times 25$ -Gehäuse.

Diese Abbildungen bleiben der Druckversion vorbehalten