

Die Messung impulsiver Signalverzerrungen durch nichtlineare Systemidentifikation

Wolfgang Klippel
Klippel GmbH, Dresden, www.klippel.de

Einleitung

Das Übertragungsverhalten von nichtlinearen Systemen wird im allgemeinen mit Hilfe einer Verzerrungsmessung untersucht. Die bekannten traditionellen Methoden regen das System mit einem speziellen Testsignal (Einzelton oder Tonkomplex) an und führen eine Spektralanalyse (FT) des Ausgangssignals durch. So können die Harmonischen und Intermodulationen von den angeregten Grundschwingungen einfach getrennt werden. Standardisierte Verzerrungsmaße erfassen die Amplitude der Verzerrungskomponenten im Verhältnis zur Amplitude des Gesamtsignals. Die Phaseninformationen der Verzerrungsprodukte wird in der Regel nicht ausgewertet. Diese Methoden eignen sich sehr gut für die Beschreibung von nichtlinearen Systemen, die eine Nichtlinearität niedriger Ordnung besitzen (quadratische, kubische Kennlinie). Das trifft zum Beispiel für den elektro-dynamischen Antrieb und die mechanische Aufhängung der Membran im Lautsprecher zu. Andere Nichtlinearitäten, zum Beispiel die Signalbegrenzung in einem Verstärker oder mechanische Defekte (Aufschlagen der Membran, Reiben der Schwingspule im Spalt, Schwingen der Litze) im Lautsprecher verursachen Störungen die durch Spektralanalyse nicht oder nur sehr schwer nachgewiesen werden können. Abbildung 1 zeigt die Spektren eines reproduzierten Tones von einem funktionstüchtigen und einem defekten Lautsprecher. Die Amplitude der Harmonischen niedriger Ordnung sind nahezu identisch. Das sind die für den Lautsprecher typischen (regulären) Verzerrungen. Ihre Amplitude ist in der Regel sehr hoch (10 %). Signifikante Unterschiede ergeben sich erst beim Vergleich der Harmonischen zwischen der 10 und 40 Ordnung. Allerdings sind die Amplituden dieser Symptome so klein (0.01 %), dass sie unter realen Produktionsbedingungen vom Umgebungsgläusch verdeckt werden und zur Qualitätssicherung nicht verwendet werden können.

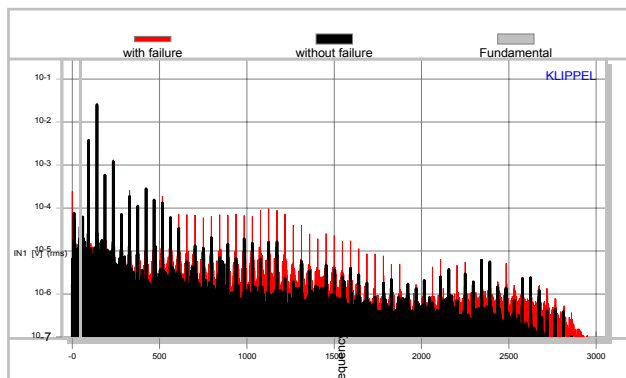


Abbildung 1: Spektren eines 50 Hz Tones reproduziert von einem funktionstüchtigen und einem defekten Lautsprecher

Analyse im Zeitbereich

Eine sinnvolle Alternative stellt die Verzerrungsmessung im Zeitbereich dar. Wird das gemessene System (Lautsprecher) mit seinen gewünschten Übertragungseigenschaften modelliert, dann können die Signalverzerrungen durch die Anordnung in Abbildung 2 separiert werden. Das Modell wird mit dem Eingangssignal $x(t)$

gespeist und erzeugt das gewünschte Ausgangssignal $y'(t)$. Das Fehlersignal

$$e(t) = y(t) - y'(t) \quad (1)$$

ist die Differenz zwischen dem gemessenen und dem modellierten Ausgangssignal. Ein Parameterschätzer passt das Modell in optimaler Weise an das System an. Ist das Modell streng linear, dann werden alle linearen Übertragungseigenschaften kompensiert und das Fehlersignal $e(t)$ enthält ausschließlich nichtlineare Verzerrungen. Ist das Modell nichtlinear, dann können neben den linearen auch nichtlineare Effekte des Systems erfasst werden. Das ist zum Beispiel bei Lautsprechern wichtig, um die Verzerrungen des nichtlinearen Antriebs und der Aufhängung als reguläre Eigenschaften eines funktionstüchtigen, typischen Lautsprechers zu akzeptieren und im Fehlersignal $e(t)$ ausschließlich Lautsprecherdefekte aufzuzeigen.

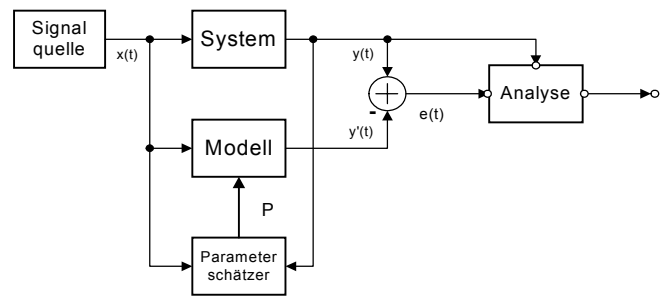


Abbildung 2: Verzerrungsanalyse im Zeitbereich

Das zeitveränderliche Fehlersignals $e(t)$ hängt von den Eigenschaften des zu messenden Systems, des Modells und den momentanen Signaleigenschaften des Anregungssignals $x(t)$ ab. In einem weiteren Analysemodul in Abbildung 2 werden diese Abhängigkeiten genauer untersucht. Wird zum Beispiel ein Gleitsinussignal als Anregungssignal benutzt, dann kann der Fehlersignal als Funktion der momentanen Signalfrequenz f oder anderer Zustandsvariablen des Systems dargestellt werden.

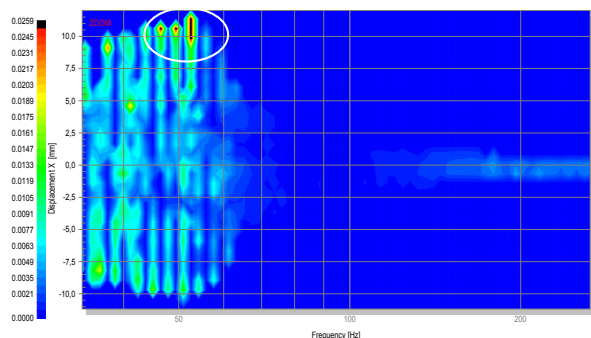


Abbildung 3: Fehlersignal $|e(x,f)|$ dargestellt über die Frequenz f und der Schwingspulenaußenlenkung x

Bei einem Lautsprecher ist zum Beispiel zweckmäßig, den Betrag des Fehlersignals als Funktion der Momentanfrequenz des Gleitsinustons und der Schwingspulenaußenlenkung darzustellen. Abbildung 3 zeigt, dass der Lautsprecher bei einem Anregungston von 50 Hz und bei einer positiven Schwingspulenaußenlenkung von 12 mm

kurze impulsive Störungen erzeugt, die durch Anschläge der Membran am Schirm verursacht werden.

Verzerrungsmaße

Durch Anwendungen zweckmäßiger Normierungen und statistischer Signalanalyse können die folgenden Verzerrungsmaße gebildet werden, die mit bekannten standardisierten Maßen vergleichbar sind.

Momentwert der Verzerrungen (ID)

Für ein beliebiges Zeitsignal $y(t)$ werden die relativen momentanen Verzerrungen ID (instantaneous distortion)

$$d_{ID}(t) = \frac{|e(t)|}{y_{RMS}} \quad (2)$$

definiert als das Verhältnis zwischen dem Betrag des Fehlersignals und dem Effektivwert des Gesamtsignals im Intervall $t_k \leq t < t_{k+1}$ mit

$$y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} y^2(t) dt}. \quad (3)$$

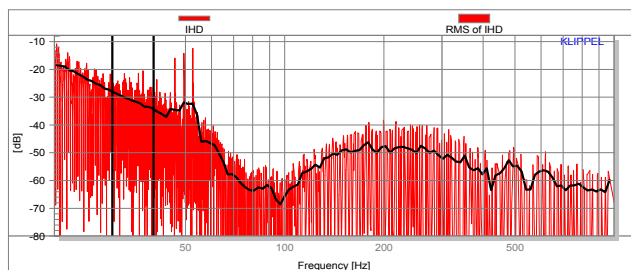


Abbildung 4: Momentane harmonische Verzerrungen (IHD) und mittlere harmonische Verzerrungen (MHD)

Mittelwert der Verzerrungen (MD)

Bei Vernachlässigung der Phase des Fehlersignals und somit seiner zeitlichen Feinstruktur ergibt sich der Mittelwert MD (mean distortion)

$$d_{MD}[k] = \frac{e_{RMS}}{y_{RMS}} \quad (4)$$

im Intervall $t_k \leq t < t_{k+1}$, unter Benutzung des Effektivwertes des Fehlersignals

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} e^2(t) dt}. \quad (5)$$

und des Gesamtsignals $y(t)$ entsprechend Eq. (3). Ist das gewünschte Modell linear dann ist der Mittelwert MD identisch mit den bekannten harmonischen Gesamtverzerrungen ($THDN$).

Spitzenwert der Verzerrungen (PD)

Für ein beliebiges Zeitsignal $y(t)$ ist der Spitzenwert PD (peak distortion) definiert als

$$d_{PD}[k] = \frac{e_{peak}}{y_{RMS}} \quad (6)$$

mit

$$e_{peak} = \max_{t_k \leq t < t_{k+1}} [|e(t)|] \quad (7)$$

und dem Effektivwert des Gesamtsignals in Eq. (3).

Abbildung 4 zeigt, dass bei dem Testlautsprecher bei 50 Hz Störungen auftreten, die einen sehr hohen Spitzenwert in den Momentanverzerrungen PD verursachen, der jedoch kaum zum Mittelwert MD beiträgt.

Scheitelfaktor der Verzerrungen (CD)

Für ein beliebiges Anregungssignal $x(t)$ kann der Scheitelfaktor der Verzerrungen CD (crest factor of distortion)

$$d_{CD}[k] = \frac{e_{peak}}{e_{RMS}} \quad (8)$$

als Verhältnis zwischen Spitzenwert und Effektivwert unter Benutzung von Eq. (7) and Eq. (5) definiert werden. Dieses Maß reflektiert die Phaseninformation der Verzerrungskomponenten, die in traditionellen harmonischen Verzerrungsmessungen kaum ausgewertet wurde. Die Nichtlinearitäten im Motor und in der Aufhängung verursachen reguläre Verzerrungen mit einem Scheitelfaktor von ungefähr 8-10 dB. Viele Lautsprecherdefekte (schwingende Litze, schleifende Schwingspule) verursachen einen weitaus größeren Scheitelfaktor. Das Anschlagen der Schwingspule bei dem Testlautsprecher erzeugte einen Scheitelfaktor von 20 dB bei 50 Hz in Abbildung 5.

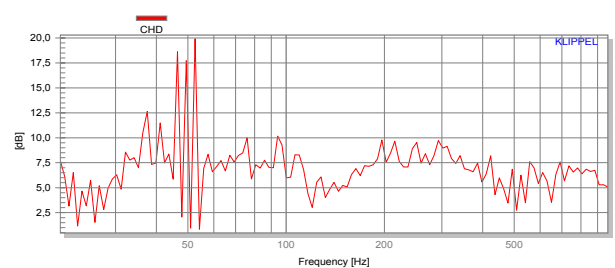


Abbildung 5: Scheitelfaktor der harmonischen Verzerrungen (CD)

Zusammenfassung

Die Messung von Signalverzerrungen durch Modellierung des gewünschten linearen oder nichtlinearen Systemverhaltens bietet die folgenden Vorteile:

- Ausnutzung der Amplituden und Phaseninformation erlaubt die Erkennung von kurven impulsiven Störungen mit niedriger Energie,
- aktive Kompensation von regulären (lautsprechertypischen) Verzerrungen, die die Symptome von Lautsprecherdefekten verdecken,
- volle Vergleichbarkeit und Kompatibilität mit traditionellen Verzerrungsmaßen ($THDN$)
- Zusammenhang zwischen Störung und den Bedingungen (z.B. Frequenz und momentane Schwingspulenauslenkung) erkennbar
- Scheitelfaktor CD fasst die Phaseninformation der harmonischen Komponenten zusammen und ist eine wichtige Ergänzung zum Gesamtklirrfaktor

[1] W. Klippel, U. Seidel, "Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and other Disturbances," presented at the 114th Convention of the Audio Eng. Soc., 2003 March 22–25, Amsterdam, The Netherlands, Preprint.

[2] W. Klippel, U. Seidel, "Anordnung und Verfahren zur Messung, Bewertung und Störungserkennung von Systemen," Deutsches Patent #10214407.

[3] Manual des Transfer Function Modules (TRF), Klippel Analyzer System, www.klippel.de