

Wie linear verhält sich die Lautheit innerhalb einer Signalkette?

Martin Klemenz, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, D-52056 Aachen

1 Einleitung

Typischerweise besteht ein Lärmproblem aus einer Signalkette, die sich aus mehreren Elementen (z.B. Krafteinleitung, Körperschallausbreitung, Abstrahlung etc.) zusammensetzt. Es sind hierbei diejenigen Modifikationen an einzelnen Gliedern zu ermitteln, mit denen am Ende der Kette, d.h. am Ohr des Empfängers, eine größtmögliche Lärminderung erreicht werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass

- einerseits eine gehörgerechte Lärminderung nicht nur eine Reduzierung des A-bewerteten Schalldruckpegels umfasst, sondern auch psychoakustische Kennwerte (z.B. Lautheit, Schärfe) einbeziehen sollte, und
- andererseits nicht immer alle Kettenglieder bekannt sind, wodurch eine Prognose des Optimierungserfolgs am Ende der Kette erschwert wird. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn ein Maschinenhersteller die Struktur, an welche diese angekoppelt wird, in ihrem Schwingungs- und Abstrahlverhalten nicht exakt kennt.

2 Fragestellung

Es ist zu prüfen, wie "robust" sich psychoakustische Parameter verhalten, d.h. wie genau der Optimierungserfolg am Ende der Kette prognostizierbar ist, wenn die Signalkette unbekannte Glieder enthält. Ferner ist zu berücksichtigen, dass Kettenglieder nie völlig unbekannt sind, da sie zumindest allgemein als z.B. "Abstrahlung" oder "Kapselung" charakterisiert werden können, so dass sich hieraus Parameter für die Prognose ableiten lassen. Zur Klärung dieser Fragen ist eine umfassende Studie vorgesehen, wobei hier anhand eines ersten Beispiels deren grundsätzliche Methodik veranschaulicht wird.

3 Modellbildung

Ein Eingangssignal X wird modifiziert, wodurch sich seine Lautheit um DN_X verringert. Es durchfährt ein lineares, unbekanntes System H mit dem Ausgangssignal Y . Es wird geprüft, wie stark sich die Lautheitsminderung DN_Y gegenüber DN_X verändert.

3.1 Grundlagen

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Lautheitsberechnung aus Terzspektren nach DIN 45 631 [1] für stationäre Geräusche.

Es sei zunächst darauf hingewiesen, dass für die Kernlautheit (N_K), welche den Verdeckungseffekt nicht mit einbezieht [1], ein quasi-linearer Zusammenhang erstellt werden kann: Wenn sich infolge einer lärmindernden Maßnahme der Schalldruckpegel in einer Terz i um den Betrag ($L_{1,i} - L_{2,i}$) verringert, ergibt sich in der zur Terz i korrespondierenden Frequenzgruppe j folgende Verminderung der Kernlautheit ($N_{1,K,j} / N_{2,K,j}$) mit Hilfe des Exponenten $k \approx 0,23$ [2]:

$$\frac{N_{1,K,j}}{N_{2,K,j}} \approx 10^{0,1 \cdot k \cdot (L_{1,i} - L_{2,i})} \quad (1)$$

Hierzu müssen die betreffenden Pegel so hoch sein, dass der Einfluss der Ruheshwelle vernachlässigt werden kann (was bei Lärminderungsmaßnahmen meist der Fall ist). Der pegelunabhängige Faktor $a_0(f)$ bzw. $a_{0D}(f)$ [2] zur Berücksichtigung der Außenohr-Übertragungsfunktion kürzt sich in (1) heraus.

Ein lineares System mit der Übertragungsfunktion $H(\omega)$ verknüpft Eingangs- und Ausgangssignal bekanntlich durch $Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega)$. Aus (1) ergibt sich für eine einzelne Frequenzgruppe, dass die Änderung der N_K durch H nicht beeinflusst wird, da $L_{1,i}$ und $L_{2,i}$ mit identischen Pegeldifferenzen beaufschlagt werden. Wenn jedoch die N_K über alle Frequenzgruppen addiert werden, kann dieser Minderungsanteil an der Gesamtfläche - analog zum Schalldruckpegel - in Y kleiner bzw. größer ausfallen als in X , wenn die N_K in anderen Frequenzgruppen durch H verstärkt bzw. reduziert werden.

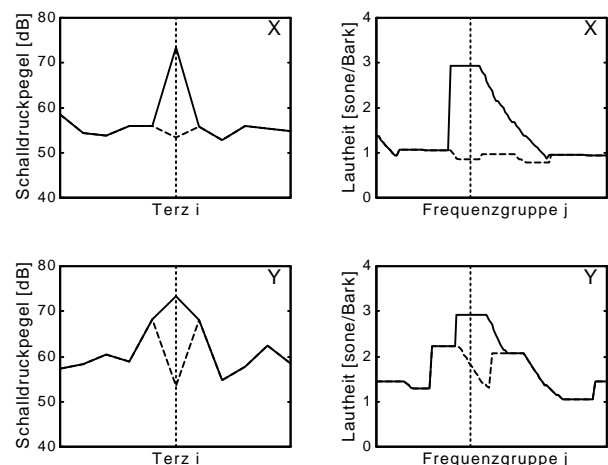


Bild 1 Lärmindernde Maßnahme bezogen auf das Eingangssignal X bzw. das Ausgangssignal Y dargestellt als Terz- bzw. Lautheitsspektrum

Für die Gesamtlautheit (N) ist zusätzlich auch der Einfluss des Verdeckungseffektes zu berücksichtigen. Die Höhe der N_k in den beidseitig benachbarten Frequenzgruppen bestimmt hierbei die Größe der verminderten Lautheitsfläche ΔN , und durch den Einfluss von H kann sich diese Fläche im Signal Y gegenüber X signifikant ändern. So fällt in dem in Bild 1 gezeigten Beispiel ΔN_Y deutlich geringer aus als ΔN_X , obwohl die Differenz der zugehörigen Terzpegel unverändert bleibt.

3.2 Prognose des Verlustes

Im folgenden wird die prozentuale Änderung der Gesamtlautheit $\Delta N_X/N_{X,ges}$ bzw. $\Delta N_Y/N_{Y,ges}$ als Minderung bezeichnet, und es wird versucht, den Minderungsverlust $V = \Delta N_X/N_{X,ges} - \Delta N_Y/N_{Y,ges}$ zu quantifizieren. Wenn die Übertragungsfunktion H völlig unbekannt ist, ist dies zunächst unmöglich. Allenfalls kann das Risiko, dass $\Delta N_Y/N_{Y,ges}$ gegenüber $\Delta N_X/N_{X,ges}$ geringer ausfällt, qualitativ abgeschätzt werden.

Interessant sind jedoch solche Lärminderungsaufgaben, bei denen die Übertragungsfunktion zwar nicht exakt, aber zumindest teilweise bekannt ist. Als erster Ansatz wird die idealisierte Annahme getroffen, dass die Pegel von H in jeder Terz i eine bekannte Wahrscheinlichkeitsdichte $f(H_i)$ aufweisen, z.B. die Normalverteilung. Wenn sich die Pegel H_i nur in einer einzigen Terz i ändern, kann sogar ein Erwartungswert $E(V_i)$ exakt berechnet werden:

$$E(V_i) = \int_{-\infty}^{\infty} V(H_i) \cdot f(H_i) dH_i \quad (2)$$

Die Erweiterung von (2) auf alle Terzen ist aber sehr kompliziert, da $E(V_i)$ bezüglich i keine unabhängige Zufallsvariable ist und in der Praxis oft kompliziertere Wahrscheinlichkeitsverteilungen auftreten. So ist es zweckmäßiger, die zugrundeliegenden Systeme per Zufallsgenerator zu simulieren und anschließend die resultierenden V über eine ausreichende Anzahl zu mitteln (Monte-Carlo-Simulation).

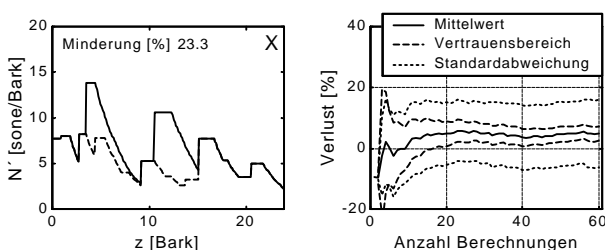


Bild 2 Lärmmindernde Maßnahme bezogen auf X und Prognose des Minderungsverlustes V mit Mittelwert, Vertrauensbereich und Standardabweichung (zum Mittelwert beidseitig hinzuaddiert) bei normalverteilten H_i ($s = 10$ dB)

Hierzu zeigt Bild 2 ein Beispiel, und zwar werden für die abgebildete Lautheitsminderung in X und normal-

verteilte Terzpegel H_i ($s = 10$ dB) Verlustwerte über mehrere Durchläufe berechnet und gemittelt. Neben der Standardabweichung ist für jeden Mittelungsschritt auch der 90%-Vertrauensbereich angegeben. Man erkennt, dass nach ca. 60 Schritten ein Vertrauensbereich von $5,0\% \pm 2,5\%$ erreicht ist; die Minderung wird folglich von 23,3% im Mittel auf ca. 18% absinken. Wegen der hohen Standardabweichung von etwa 10 % ist dieser Wert aber mit großen Unsicherheiten behaftet.

3.3 Praktische Umsetzung

In der Regel können unbekannte Übertragungsfunktionen nicht auf solch einfache Weise dargestellt werden. Vielmehr sind oft nur einzelne physikalische Parameter bekannt, wobei die Frage, wie sich diese in statistisch handhabbare Größen umrechnen lassen, jeweils nur am konkreten Fallbeispiel beantwortet werden kann.

Wenn z.B. der Abstrahlgrad einer Struktur nicht bekannt ist, kann man als Übertragungsfunktion in erster Näherung die Filterkurve eines Hochpass erwarten. Die Grenzfrequenz und die Flankensteilheiten wären dann Parameter, die im Zufallsgenerator variiert werden können. Wenn z.B. $H(\omega)$ aus einzelnen Moden zusammengesetzt ist, können Informationen über den ungefähren Abstand der Eigenfrequenzen sowie über die Güte entsprechend verwertet werden.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Notwendigkeit, für die wichtigsten typischen Signale und Systeme, die in der Lärminderung auftreten, die entsprechenden Parameter aufzudecken und diese in Form eines "Kataloges" zu klassifizieren.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Um eine wirkungsvolle Lautheitsminderung am Ende einer Signalkette zu erzielen, ergibt sich zusammenfassend die Vorgehensweise, die gesamte Kette nach bekannten und unbekanntem Gliedern zu unterteilen, für unbekannte Glieder geeignete Parameter für die Monte-Carlo-Simulation auszuwählen und hieraus die Lautheitsminderung am Ende der Signalkette statistisch einzugrenzen. Die Erstellung des o.g. Kataloges ist ebenso ein Hauptschwerpunkt der zukünftigen Arbeit wie auch die Einbeziehung weiterer psychoakustischer Größen (Schärfe, Rauigkeit und Tonhaltigkeit).

5 Literatur

- [1] Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. DIN 45 631, März 1991
- [2] E. Zwicker und H. Fastl
Psychoacoustics - Facts and Models.
Springer-Verlag, 1999