

Psychoakustische Optimierung einer Maschinenkomponente

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

1 Einleitung

Die meisten Lärmprobleme können durch eine Signalkette dargestellt werden, d.h. sie lassen sich in einzelne Elemente aufteilen. Hierzu gehören in der Regel ein primäres Quellsignal, z.B. eine Kraftanregung, und übertragende Systeme, z.B. Körperschallübertragung oder Abstrahlung. Bei vielen realen Signalketten sind die einzelnen Elemente nicht immer vollständig bekannt, oder ein Hersteller einer Komponente möchte sein Produkt nicht für jeden Einzelfall, sondern für generelle Anwendungen optimieren. Entsprechend dem Titel dieses Beitrags ist daher zu fragen, ob in diesem Fall eine Lärminderung an einzelnen Komponenten überhaupt sinnvoll ist, oder ob diese ausschließlich nur am Ausgangssignal durchgeführt werden kann. Der Extremfall bestände darin, dass Bauteile zwar im Einzelnen als akustisch unbedenklich eingestuft werden, im Gesamtzusammenhang aber eine unerwartete Lästigkeit des Ausgangssignals bewirken.

Um den Lärminderungserfolg am Ende der Signalkette zu prognostizieren, kann man sich zunutze machen, dass die akustischen Eigenschaften von Kettenglieder nie völlig unbekannt sind. Die zugrundeliegenden Ideen wurden schon in [1] vorgestellt.

2 Modellbildung

Lärminderung sollte neben dem A-bewerteten Schalldruckpegel immer auch psychoakustische Kennwerte (z.B. Lautheit) einbeziehen. In diesem Beitrag werden nur stationäre Geräusche untersucht, so dass sich die folgenden psychoakustischen Kenngrößen bzw. Berechnungsmodelle für die Untersuchungen eignen:

- Lautheit (nach Zwicker, DIN 45 631 [2]),
- Schärfe (nach von Bismarck [3]),
- Rauigkeit (nach Daniel und Weber [4]),
- Tonhaltigkeit (nach Pedersen u. Soendergaard [5]).

Es ist nun die Frage zu beantworten, ob für eine Lärmierungsmaßnahme an einem Einzelelement deren Wirkung im (unbekannten) Ausgangssignal prognostiziert werden kann. Es wird der einfachste Fall einer idealen, linearen Signalkette angenommen, bestehend aus einem Eingangssignal mit dem Spektrum $X(\omega)$, einem System mit der Übertragungsfunktion $H(\omega)$ und einem Ausgangssignal $Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega)$. Alle Berechnungen erfolgen mit MATLAB.

3 Wahl der Testsignale

Das Verhalten psychoakustischer Größen in Signalketten hängt in hohem Maße von den gewählten Testsignalen bzw. -systemen ab. Als extremes Beispiel enthalte $X(\omega)$ genau einen Frequenzpeak und $H(\omega)$ eine schwach gedämpfte Mode. Wenn $H(\omega)$ unbekannt ist, wäre die Rauigkeit von $Y(\omega)$ sehr schwer zu prognos-

tizieren, da diese ja nach Frequenzunterschied der beiden Peaks stark schwanken kann.

Solche speziellen Testsignale, die in der Literatur häufig zu finden sind, kommen in der Praxis aber kaum vor. Um ein realistisches Ergebnis zu erzielen, ergibt sich daher zunächst die wichtige Aufgabe, alltägliche Geräusche aus Industrie, Haushalt, Verkehr etc. nach typischen Signalen und Systemen aufzuschlüsseln und hieraus einen repräsentativen Querschnitt über die anzusetzenden Parameter zu erhalten. So sind in Bild 1 die Spektren eines typischen Eingangssignals und einer typischen Übertragungsfunktion dargestellt.

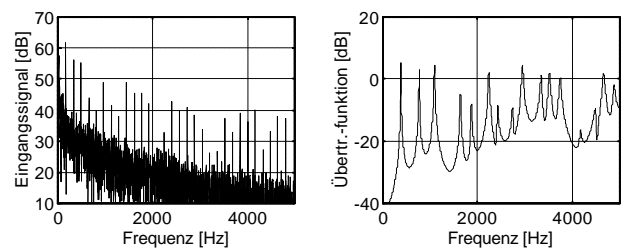


Bild 1 Typisches Eingangssignal und typische Übertragungsfunktion

Zu den Parametern, die sich auf psychoakustische Größen auswirken, zählen u.a. für das Eingangssignal:

- Verhältnis zwischen deterministischen und stochastischen Anteilen,
- Grundfrequenzen (der deterministischen Anteile),
- Amplituden- und Phasenschwankungen deren Obertöne,
- Verhältnis von tief- zu hochfrequenten Anteilen,
- Amplituden- und Frequenzmodulationen,

und für die Übertragungsfunktion

- mittlere Verstärkung der Gesamtenergie,
- Modenabstand (Mittelwert und Schwankung),
- Amplitudenschwankungen der Moden,
- Dämpfung bzw. Güte,
- Verhältnis von tief- zu hochfrequenten Anteilen.

Anhand dieser Parameter lassen sich beliebige Signale und Systeme synthetisieren, wobei in einem späteren Schritt die Betrachtung genau eines Signals bzw. Systems auf größere Signalketten auszuweiten ist.

4 Variation eines Parameters

Es soll nun getestet werden, wie sich die Variation dieser Parameter auf psychoakustische Größen auswirkt. Als Beispiel werden drei exemplarische Eingangssignale erzeugt und hieran anschließend als interessierender Parameter die Grundfrequenz geändert, wobei zu hohen Grundfrequenzen hin zusätzlich der Pegel etwas erhöht wird. Alle anderen Parameter bleiben konstant. Folglich ist in Bild 2 eine monotone Zunahme der Lautheit mit der Grundfrequenz zu beobachten.

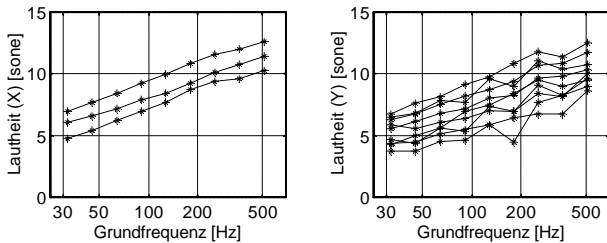


Bild 2 Auswirkung einer Grundfrequenzvariation auf Lautheit von Eingangs- und Ausgangssignal

Die Eingangssignale werden anschließend mit drei exemplarischen Übertragungsfunktionen verknüpft. Bei einigen der resultierenden neun Ausgangssignale ist zu beobachten, dass die Lautheit trotz sinkender Grundfrequenz steigt. Verursacht wird dies offenbar durch die Interaktion von Obertönen und Moden, die das Signal verstärken, wenn sie zufällig übereinanderliegen. Eine unbekannte Übertragungsfunktion vermag somit den Lärminderungserfolg im Ausgang zu vermindern.

Umfangreiche Untersuchungen analog zu diesem Beispiel werden derzeit durchgeführt. Anstelle einer ausführlichen Auflistung der bisher erzielten Einzelergebnisse ist es zweckmäßiger, anhand einer kompakten Darstellung zu zeigen, welche generellen Änderungen zwischen Ausgang und Eingang im allgemeinen Fall zu erwarten sind.

5 Variation aller Parameter

Hierzu werden 12 synthetische Eingangssignale und 8 Übertragungsfunktionen erzeugt, und durch die Kombination ergeben sich 96 Ausgangssignale. Bei den Signalen und Systemen wurden nun alle in Kap. 3 genannten Parameter nach dem Zufallsprinzip variiert, so dass sich die Eingangssignale in ihrer Lautheit, Schärfe etc. unterscheiden. Es wird geprüft, wie stark sich das Verhältnis dieser Werte untereinander im Ausgangssignal verändert.

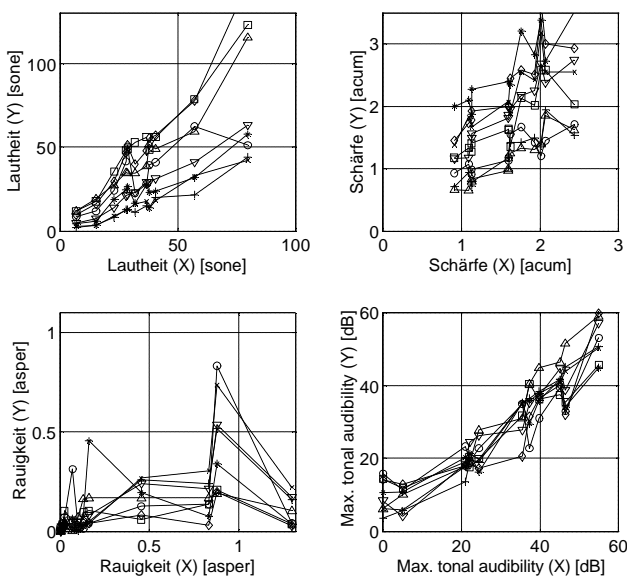


Bild 3 Psychoakustische Größen von Eingangs- und Ausgangssignal bei Variation aller Parameter

Die entsprechenden Ergebnisse zeigt Bild 3, wobei alle jeweils einer Übertragungsfunktion zugeordneten x/y -Wertepaare durch eine Linie verbunden sind. Hieraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Eine Lautheits-, Schärfe- oder Tönhaltigkeitsminderung im Eingangssignal hat nur im Durchschnitt eine entsprechende Absenkung im Ausgang zur Folge. In vielen Einzelfällen sind mehr oder weniger größere Abweichungen vom linearen Verhalten zu beobachten.
- Minderungen durch Variation der Übertragungsfunktion sind bei Lautheit, Schärfe und Rauigkeit möglich, hohe Tönhaltigkeitswerte im Eingang lassen sich hierbei aber nur schwerlich verringern.
- Bei der Rauigkeit ist aufgrund der starken Schwankungen schwer vorherzusagen, wie sich eine Minderung im Eingang auf den Ausgang auswirkt. Andererseits ist der Einfluss eines unbekanntes Systems insofern nicht kritisch, da sich die Rauigkeit des Ausgangssignals fast immer gegenüber dem Eingangssignal verringert oder zumindest nie größer wird.

6 Ausblick

Die hier vorgestellte Simulation hat gezeigt, wie sich psychoakustische Größen in einfachen Signalketten bei Variation der Signal- und Systemparameter verhalten. Es zeigt sich, dass lärmindernde Maßnahmen an einem Einzelteil nicht immer die gewünschte Wirkung im Ausgang haben. Wenn von den unbekanntes Kettengliedern zwar nicht alle, aber zumindest einige relevante Parameter bekannt sind, ist die Wirkung in vielen Fällen prognostizierbar bzw. mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation zumindest statistisch einzugrenzen [1].

Umfassende Untersuchungen zu diesem Thema werden derzeit durchgeführt, wobei u.a. die Komplexität realer Signalketten, starke Kopplungen und die binaurale Wahrnehmung einzubeziehen sind. Ebenso muss die Frage gestellt werden, inwiefern man diese Ergebnisse allgemein auf die "Lästigkeit" übertragen kann. Schließlich sollen die prognostizierten Effekte mit Messergebnissen an realen Fallbeispielen verglichen werden.

7 Literatur

- [1] M. Klemenz, Wie linear verhält sich die Lautheit innerhalb einer Signalkette? Proc. DAGA 2000, S. 492, Oldenburg, 2000
- [2] Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. DIN 45 631, 1991
- [3] G. von Bismarck, Sharpness as an Attribute of the Timbre of Steady Sounds. Acustica 30, S. 159, 1974
- [4] P. Daniel, R. Weber, Psychoacoustical Roughness: Implementation of an Optimized Model. Acustica 83, S. 113, 1997
- [5] T.H. Pedersen, M. Soendergaard, Objective Method for Assessing the Audibility of Tones in Noise. Proc. Inter-Noise 2000, S. 3252, Nice, 2000