

Moderatoren der Geräuschqualität komplexer Geräusche mit tonalen Komponenten

Markus Bodden*, Ralf Heinrichs**

* Ingenieurbuero Dr. Bodden, Ursulastr. 21, 45131 Essen, email: db@product-sound.de, http://www.product-sound.de

** Ford Werke AG, Acoustic Centre Cologne, Spessartstraße, 50725 Köln, email: rheinr1@ford.com

Einleitung

Tonale Komponenten spielen eine wichtige Rolle für die Geräuschqualität von Fahrzeuginnengeräuschen. Im Gegensatz zu grundlegenden psychoakustischen Erkenntnissen, die auf Versuchen mit einzelnen idealen Komponenten in einem breitbandigen, nichttonalen Maskierer beruhen, sind Fahrzeuggeräusche aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten zusammengesetzt. Die Wahrnehmung tonaler Eindrücke bei solchen komplexen Geräuschen wird im folgenden näher untersucht.

Fahrzeuginnengeräusche

Die Bewertung der Geräuschqualität von Fahrzeuginnengeräuschen stellt eine komplexe Aufgabe dar. Zum einen sind die Geräusche aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten zusammengesetzt, und zum anderen beruht die Wahrnehmung dieser Geräusche auf einem komplexen Prozeß. Dieser Prozeß basiert nicht nur auf dem rein physikalischen Signal, sondern er kann auch durch andere Modalitäten wie visuellen oder taktilen Informationen und sogar durch nichtsensorischen Moderatoren beeinflusst werden (siehe z.B. Bodden, 2000).

Die von einem Produkt erzeugten Geräusche lassen sich generell in zwei perzeptiv unterschiedliche Gruppen aufteilen: in ungewünschte und gewünschte Eigenschaften. Die erste Gruppe umfaßt Geräuscheigenschaften, welche vermieden werden sollten (z.B. Quietsch- und Klappergeräusche), die zweite Gruppe umfaßt die Anteile, welche einen „guten“ Sound formen (z.B. angenehme, sportliche, luxuriöse Wirkung).

Die ungewünschten Geräuscheigenschaften spielen hierbei eine wichtige Rolle, da sie die Geräuschqualität eines prinzipiell guten Sounds deutlich herabsetzen und damit den betriebenen Aufwand zur Optimierung des Geräusches zunichte machen können. Sie müssen deshalb in einem ersten Schritt identifiziert und soweit reduziert werden, daß sie das Gesamtgeräusch nicht negativ beeinflussen. Dies entspricht dann der sogenannten Akzeptanzschwelle, die sich von der Detektionsschwelle unterscheiden kann.

Diese Aufgabe wird unter anderem dadurch verkompliziert, daß die Klassifikation einer Geräuschkomponente in „ungewünscht“ - „gewünscht“ einer zeitlichen Veränderung unterliegen kann. Das charakteristische Geräusch eines Turboladers wird z.B. zum heutigen Zeitpunkt als nicht störend eingestuft, da es ein Feedback gibt, daß das Fahrzeug mit diesem speziellen und nicht alltäglichen Feature ausgestattet ist. Aber, in naher Zukunft, wenn Turbolader zur Standardausrüstung der immer mehr Marktanteil gewinnenden Dieselfahrzeuge gehören, kann diese Rückmeldung ihre Bedeutung verlieren und das Geräusch als störend eingestuft werden.

Ein Fahrzeuginnengeräusch besteht aus einer Vielzahl einzelner Komponenten, welche von den Hauptgruppen Motor, Reifen/Straße und Wind sowie von weiteren Beiträgen zahlreicher Fahrzeugkomponenten hervorgerufen werden. Da die Gesamtpegel und störende Geräuschanteile wie z.B.

Quietschen und Klappern von Verkleidungen in der Vergangenheit deutlich reduziert werden konnten, treten nun andere Geräuschanteile als störend hervor. Eine wichtige Klasse dieser Geräusche sind tonale Komponenten, die durch unterschiedliche Fahrzeugbaugruppen erzeugt werden können:

- das Motorgeräusch enthält Vielfache der Motorordnungen;
- Reifenprofile und Straßenoberflächen können tonale Geräusche hervorrufen;
- das Getriebe kann drehzahlabhängige tonale Komponenten hervorrufen;
- Servolenkung, Öl- und Benzinpumpen, Steuerketten und elektrische Motoren erzeugen weitere tonale Anteile.

Abb. 1 zeigt ein Fahrzeuginnengeräusch im Stillstand bei kaltem Motor für ein Fahrzeug mit schlechter Geräuschqualität. Es sind eine Vielzahl tonaler Komponenten zu erkennen, die in einem breiten Frequenzbereich auftreten. Eine Unterscheidung in Maskierer / zu bewertender Komponente ist hier praktisch nicht möglich. Desweiteren ist bei Fahrzeuggeräuschen zu beobachten, daß die tonalen Komponenten häufig nicht ideal sinusförmig sind, sondern sich über einen breiteren Frequenzbereich ausdehnen.

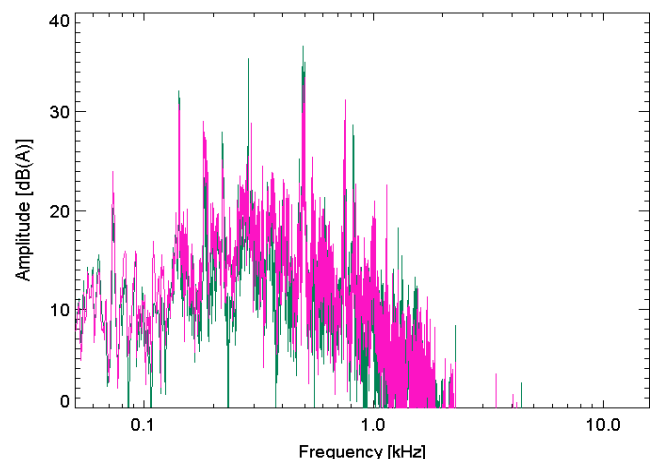


Abb. 1 Schmalbandspektrum eines Fahrzeuginnengeräusches (Idle bei 1200 rpm, rot=rechter, grün=linker Kanal)

Tonale Komponenten

Allein aufgrund der Komplexität der physikalischen Schalle zeigt sich demnach eine Untersuchung zum Einfluß tonaler Komponenten bei Fahrzeuginnengeräuschen als schwierige Aufgabe. Auf der anderen Seite blicken Untersuchungen zur Wahrnehmung tonaler Anteile auf eine lange Tradition zurück. Grundlegende psychoakustische Daten sind in der Literatur insbesondere für Maskierungs- und Detektionsuntersuchungen dargestellt (siehe z.B. Zwicker und Fastl, 1990), aber sie behandeln entweder den Fall einer einzelnen idealen tonalen Komponente in einem breitbandigen, nichttonalen Maskierer, oder die gegenseitige Beeinflussung

zweiter idealer tonaler Komponenten ohne weiteres maskieren des Geräusch. Schon die Untersuchung von Zwicker zur Maskierung von Violinklängen zeigt die Komplexität des Zusammenspiels mehrerer Komponenten, was jedoch nicht weiter verfolgt wurde.

Die Ausführungen oben zeigen, daß diese Daten nicht direkt auf die Untersuchung von Fahrzeugdaten angewandt werden können. Hinzu kommt, daß im Bereich der Geräuschqualität nicht die Detektion, sondern die Akzeptanz der tonalen Komponenten entscheidend ist. Es wurden deshalb Versuche zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit, der Rolle der Breite tonaler Komponenten sowie dem Einfluß mehrerer tonaler Komponenten konzipiert.

Alle Experimente wurden in einem schallisolierten Raum bei Kopfhörerbeschallung und Anwendung des Individualtests durchgeführt (siehe Bodden und Heinrichs, 1998). Zu den Versuchen wurden reale Fahrzeuginnengeräusche herangezogen, bei denen vorhandene tonale Komponenten gezielt durch Filterung modifiziert oder synthetische Komponenten hinzugefügt wurden. Die Versuche wurden für die folgenden Parametervariationen ausgeführt:

- Frequenzvariation einer einzelnen tonalen Komponente;
- Kombination von zwei tonalen Komponenten;
- Kombination von drei tonalen Komponenten;
- eine synthetische ideal sinusförmige Komponente;
- eine reale breite tonale Komponente (Bandbreite 80 Hz bei einer Mittenfrequenz von 800 Hz).

Eine Versuchspersonengruppe wurden von Experten sowie eine zweite von Laien gebildet, die Aufgabe bestand in der Bestimmung der Detektions- und Akzeptanzschwellen sowie der Beurteilung der Stärke des tonalen Eindrucks. Die Ergebnisse können hier nur knapp zusammengefaßt werden:

- die aus der Literatur bekannte Frequenzabhängigkeit wurde ebenfalls hier gefunden: tonale Komponenten bei höheren Frequenzen sind störender als bei tiefen Frequenzen (siehe z.B. Zwicker und Fastl 1990);
- der Unterschied zwischen Detektions- und Akzeptanzschwelle hängt ebenfalls von der Frequenz ab und beträgt bei einer tonalen Komponente etwa 6 dB bei tiefen und 3 dB bei hohen Frequenzen;
- Experten liefern reproduzierbare und stabile Ergebnisse;
- Laien haben Probleme, die Wahrnehmung tonaler Komponenten reproduzierbar wiederzugeben. In einem Versuch, bei dem gleiche Stimuli in zwei unterschiedlichen Versuchsreihen bewertet wurden, zeigten sich z.B. auch Kontexteffekte.
- breite tonale Komponenten führen ebenfalls zu einer tonalen Wahrnehmung vergleichbar zu einer Sinuskomponente. Zur signalanalytischen Beschreibung eignet sich demnach der spektrale Spitzenwert nicht;
- das Vorhandensein mehrerer tonaler Komponenten beeinflusst die Wahrnehmung in einer jedoch nicht eindeutigen Art und Weise.

Eine wichtige und kritische Erkenntnis ergab sich aus einem Experiment, in dem tonale Geräusche vom Getriebe (Gearwhine) untersucht wurde. Die Geräusche unterschiedlicher Fahrzeuge wurden einmal beurteilt, wenn nur die Geräusche mit dem Gearwhine dargeboten wurden, und einmal, wenn das Gearwhine (durch Treten der Kupplung) ein- und ausgeschaltet wurde. Die Ergebnisse wiesen signifikante Unterschiede auf: im

ersten Fall wurde eine Art Gesamteindruck der tonalen Geräusche bewertet, im zweiten Fall wurde jedoch die Aufmerksamkeit der Hörer automatisch auf das Gearwhine gelenkt, so daß im wesentlichen diese tonale Komponente bewertet wurde.

Es zeigte sich weiterhin, daß die Bewertung des Gesamteindrucks nicht einheitlich bei allen Versuchspersonen erfolgte. In einer anschließenden Diskussion stellte sich heraus, daß zwar ein tonaler Gesamteindruck entsteht, jedoch meist eine tonale Komponente perzeptiv dominant im Vordergrund erschien. Unterschiedliche Versuchspersonen berichteten bei identischen Stimuli jedoch unterschiedliche perzeptiv dominante Komponenten. Es konnte außerdem der Effekt beobachtet werden, daß bei Eliminierung der perzeptiv dominanten Komponente im ersten Moment der tonale Eindruck deutlich reduziert wurde, nach einiger Zeit jedoch eine andere Komponente in den Vordergrund trat und die Rolle der dominanten Komponente übernahm.

Die Wahrnehmung tonaler Komponenten bei diesen komplexen Geräuschen wird somit nicht nur durch die rein physikalischen Parameter, sondern auch durch kognitive Einflüsse und die Aufmerksamkeit bestimmt. Diese Einflüsse bestimmen, welche der Komponenten perzeptiv dominant erscheint.

Diese Ergebnisse zeigen, daß die Erkenntnisse der Grundlagenforschung zur Wahrnehmung tonaler Komponenten nicht direkt auf komplexe Geräusche wie Fahrzeuginnengeräusche übertragen werden können. In den meisten Experimenten wurde zudem der Pegel der zu untersuchenden tonalen Komponente systematisch variiert, so daß die Aufmerksamkeit der Versuchspersonen automatisch auf diese Komponente gelenkt wurde. Es wurde somit nicht ein Gesamteindruck, sondern diese spezielle Komponente bewertet und die Beiträge möglicher anderer Komponenten blieben unberücksichtigt. Es zeigte sich ebenso, daß sich der Gesamteindruck nicht durch eine Superposition der Effekte der einzelnen Komponenten ergibt - die Zusammenhänge sind weitaus komplexer, es treten gegenseitige Beeinflussungen auf.

Zusammenfassung

Der Ansatz, die Wahrnehmung mehrerer tonaler Komponenten durch die Superposition der Wahrnehmungen einzelner Komponenten zu erklären, spiegelt nicht die sich abspielenden komplexen perzeptiven Prozesse wieder. Der grundlegende, rein psychoakustisch motivierte Ansatz führt hier nicht zum Ziel, da die Effekte zum einen nicht voneinander unabhängig sind, und zum anderen nichtsensorische Moderatoren die Wahrnehmung bestimmen. Dies hat eindeutige Auswirkungen auf instrumentelle Verfahren zur Bewertung der perzeptiven Wirkung tonaler Komponenten - sie können nur unter exakt definierten Bedingungen und unter erheblichen Einschränkungen plausible Ergebnisse liefern.

Literatur

- Bodden, M., "Perceptual Sound Quality Evaluation", in *Proc. Internoise 2000*, Nice, France, 2000.
- Zwicker, E., und Fastl, H., *Psychoacoustics -Facts and Models*, Springer Verlag, 1990.
- Bodden, M., und Heinrichs, R., "Evaluation of interior vehicle noise using an efficient psychoacoustic method", in *Proc. of the Euro-noise 98*, 1998.