

## Optimierung von akustisch wirksamen Fahrbahnrandmarkierungen anhand psychoakustischer Kriterien

U. Widmann<sup>1</sup>

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München

### Einführung

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit werden in jüngster Zeit in Fachkreisen Vorschläge diskutiert, dem Fahrer durch periodische Anregungen des Fahrzeugs akustische Signale zu geben, um ihn vor dem Verlassen der Fahrbahn zu warnen (vgl. Steinauer 1991). Die Fahrzeuganregung soll dabei durch geeignete Profilierung der 30 cm breiten Fahrbahnrandmarkierung erfolgen. Für eine wirksame Gestaltung solcher Warnlinien sollten die Eigenschaften des menschlichen Gehörs zweckmäßig berücksichtigt werden (Zwicker & Fastl 1990).

Diese Arbeit zeigt, welche Hörempfindungen beim Fahrer eines Fahrzeugs beim Überfahren profilierter Fahrbahnrandmarkierungen auftreten und wie diese bei der Gestaltung von akustischen Warnlinien ausgenützt werden können.

### Messungen

Zur Untersuchung des Einflusses profilierter Markierungen auf das Fahrzeuginnengeräusch wurden Testfahrten mit einem PKW und einem LKW im Geschwindigkeitsbereich zwischen 70 km/h und 100 km/h durchgeführt. Die untersuchten Fahrbahnrandstreifen tragen Profile mit Abständen ( $d$ ) von  $d=6$  cm,  $d=9$  cm,  $d=12$  cm und  $d=15$  cm, die um den Winterdienst nicht zu behindern, eine maximale Höhe von 6 mm haben. Entlang von jeweils 60 m langen Abschnitten eines Profilierungstyps wechseln sich alle 3 m profilierte und nicht profilierte Segmente ab (vgl. Fig. 1). Während der Versuche fuhren die KFZ mit den Reifen der rechten Fahrzeugseite auf dem unterschiedlich profilierten Fahrbahnrandstreifen. Während der Fahrt wurden die im Fahrzeuginnenraum auftretenden Schallsignale einkanalig, unbewertet auf ein tragbares Tonbandgerät (NAGRA IV-SJ) aufgezeichnet. Das Mikrophon war etwa in Kopfhöhe zwischen Fahrer- und Beifahrer elastisch aufgehängt.

Die aufgenommenen Schallsignale wurden anschließend im Labor analysiert. Dazu wurden 1 s dauernde Ausschnitte der Schallsignale einer Terzanalyse unterzogen und dann mittels des in DIN 45631 enthaltenen Rechenprogrammes in eine gehörbezogene Spektraldarstellung, der Spezifischen Lautheit über der Tonheit, transformiert. Zusätzlich wurden die Lautheitszeitfunktionen der Schallbeispiele mit einem Echtzeit-Lautheitsmeßsystem nach Zwicker et al. (1985) ermittelt.

### Ergebnisse

Figur 1 zeigt eine schematische Aufsicht der untersuchten Profilformen sowie die zugehörigen berechneten Lautheits-Tonheitsmuster im Inneren eines PKW beim Überfahren der verschiedenen Fahrbahnrandprofile mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. In Fig. 1e ist zum Vergleich das Innengeräusch bei Fahrt auf dem nicht profilierten Randstreifen dargestellt.

<sup>1</sup> jetzt: Müller-BBM GmbH, Schalltechnische Beratungen, Planegg

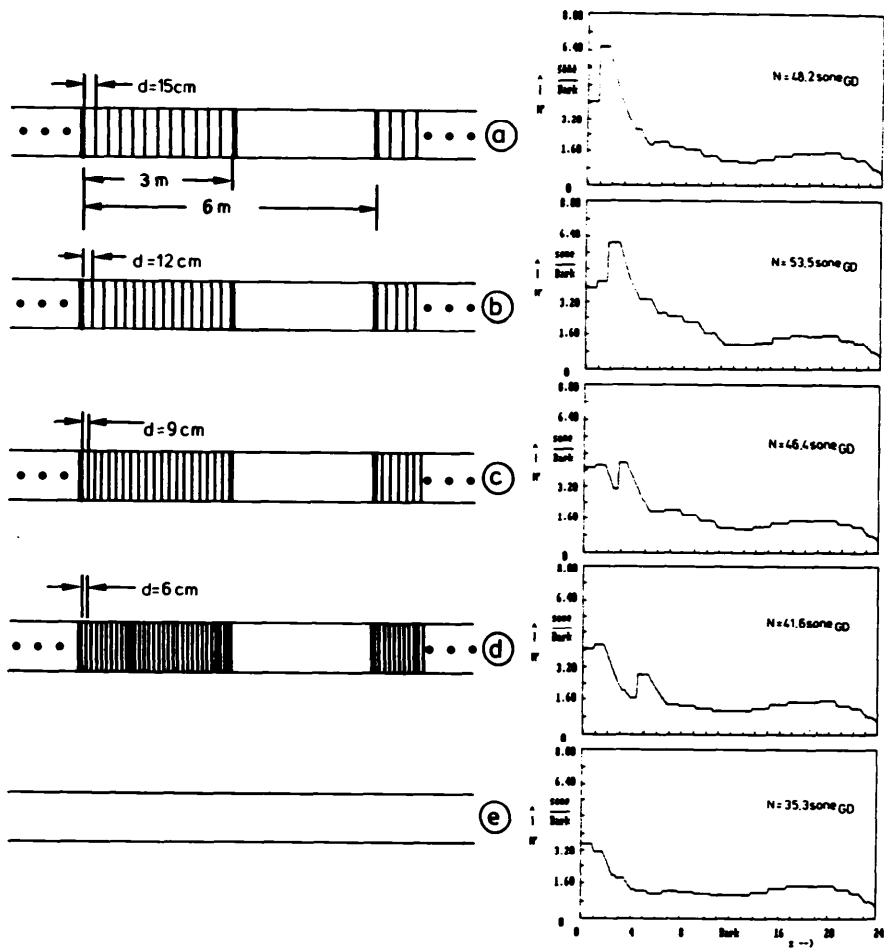


Fig. 1: Aufsicht auf verschiedene mit Rillenabständen von  $d = 15 \text{ cm}$ ,  $d = 12 \text{ cm}$ ,  $d = 9 \text{ cm}$  und  $d = 6 \text{ cm}$  profilierte akustische Warnlinien bzw. eine nicht profilierte Randstreifenmarkierung (links). Zugehörige nach DIN 45631 berechnete Spezifische Lautheits-Tonheitsmuster im Fahrzeuginnere eines PKW bei Fahrt entlang der Warnlinien mit einer Geschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$  (rechts). Zusätzlich ist die Lautheit  $N$  angegeben.

Die Muster zeigen, daß im Fahrzeug beim Überfahren einer Warnlinie eine tonale Komponente zum "normalen" Fahrzeuginnengeräusch hinzutritt, deren Frequenzlage vom Rillenabstand und der gefahrenen Geschwindigkeit beeinflußt wird. Bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$  ( $27.8 \text{ m/s}$ ) berechnen sich Anregungsfrequenzen von  $463 \text{ Hz}$ ,  $309 \text{ Hz}$ ,  $231 \text{ Hz}$  und

185 Hz für Profilabstände von 6 cm, 9 cm, 12 cm und 15 cm. In der gegebenen Darstellung der Spezifischen Lautheit führt die periodische Anregung des Fahrzeugs zu ausgeprägten Maxima bei den zugehörigen Tonheitsstellen.

Vergleicht man die Absolutwerte der Lautheit beim Überfahren verschieden profilierter Markierungen aus Fig. 1a-d mit dem Lautheitswert aus Fig. 1e, so fällt auf, daß durch die tonale Komponente die wahrgenommene Lautstärke im Fahrzeug unterschiedlich erhöht wird. Bei einem Rillenabstand von  $d=12$  cm ergibt sich gegenüber dem "normalen" mittleren Fahrgeräusch eine Lautheitserhöhung um etwa 51%. Bei der Auswahl einer für die Praxis geeigneten Profilierung muß zwischen einer größtmöglichen Lautheitserhöhung und einer geringstmöglichen Verdeckung der tonalen Komponente durch tieffrequente Anteile des Fahrzeuginnengeräusches abgewogen werden.

Durch das wiederholte Abwechseln von profilierten und nicht profilierten Abschnitten entlang der Warnlinien mit einer Periodenlänge von 6 m ergibt sich eine deutlich wahrnehmbare zeitliche Strukturierung der Schallsignale, die bei der Darstellung der Lautheitszeitverläufe mit einem Lautheitsmeßsystem nach Zwicker et al. (1985) meßtechnisch erfaßt werden kann. Beim Überfahren solcher Warnlinien wird neben einer mittleren Erhöhung der Lautheit ebenfalls die Hörempfindung Schwankungsstärke (Fastl 1982) hervorgerufen. Dabei fungiert der in Fig. 1 in den Spezifischen Lautheits-Tonheitsmustern sichtbare Warnton als Trägersignal, der im Takt der Markierungsunterbrechung amplitudenmoduliert wird. Für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von beispielsweise 80 km/h (22.2 m/s) ergibt sich für eine Periodenlänge von 6 m eine Modulationsfrequenz von 3.6 Hz. Diese periodische Lautheitsschwankung ist für eine Testfahrt eines PKW und eines LKW in Fig. 2 exemplarisch dargestellt. Die Lautheitsschwankung bildet sich in ausgeprägten Maxima und Minima der Lautheitszeitfunktion ab.

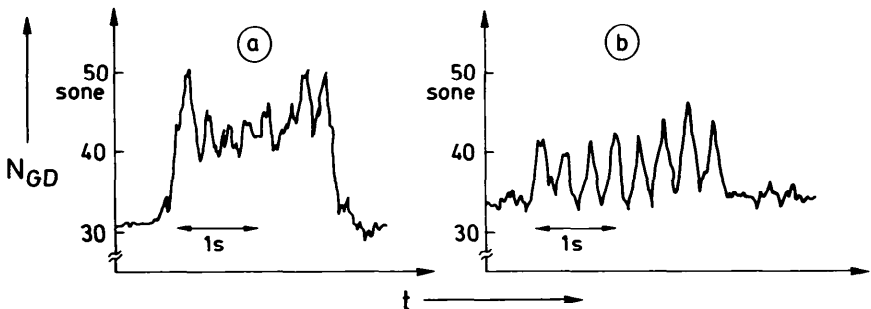


Fig. 2: Periodische Schwankung der mit einem Lautheitsmesser ermittelten Lautheit im Fahrzeuginnenen eines PKW (Teilbild a,  $v=80$  km/h) und eines LKW (Teilbild b,  $v=70$  km/h) beim Überfahren einer mit einem 12 cm-Rillenabstand markierten und im Abstand von 6 m periodisch wiederholten Profilierung.

Aus psychoakustischen Untersuchungen ist bekannt, daß die Wahrnehmung von Schallschwankungen durch den Menschen eine deutliche Abhängigkeit von der Schwankungsfrequenz zeigt und

ein Maximum im Bereich von Schwankungsfrequenzen zwischen 2 Hz und 8 Hz erreicht (Zwicker & Fastl 1990). Dies bedeutet, daß beim Fahrzeuglenker beim Überfahren eines im Abstand von 6 m periodisch wiederholten Markierungsprofils die Hörempfindung Schwankungsstärke im Geschwindigkeitsbereich zwischen 43 km/h und 172 km/h maximal hervorgerufen wird. Um sicherzustellen, daß die Hörempfindung Schwankungsstärke hervorgerufen wird, muß allerdings mindestens eine zeitliche Periode der Schwankung, dies entspricht 6 m Weglänge auf dem Randstreifen, zurückgelegt werden. Das bedeutet, daß nur ein Abweichen vom Fahrkurs mit einem maximalen Ausfahrwinkel von etwa  $3^\circ$  zu dieser Hörwahrnehmung führt. Um bei größerem Ausfahrwinkel ebenfalls eine Schwankung zu erreichen müßte der Unterbrechungsabstand verkleinert werden. Dadurch wird allerdings der Geschwindigkeitsbereich, für den eine Schwankung auftritt, reduziert.

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß sich das Fahrzeuginnengeräusch beim Überfahren akustischer Warnlinien deutlich ändert. Durch periodische Anregung des Fahrzeugs entsteht für den Fahrzeuglenker ein Warnton, der sich umso deutlicher von der spektralen Kontur des normalen Innengeräusches abhebt, je kürzer die Profilperiode gewählt wird. Neben einer deutlichen Klangfarbenänderung beim Überfahren der Profile erhöht sich im Inneren der Fahrzeuge auch die wahrgenommene Lautstärke. Durch periodische Unterbrechung der Profilierung im Abstand von wenigen Metern wird beim Fahrer zusätzlich die Hörempfindung Schwankungsstärke hervorgerufen, die bei der Erzeugung akustischer Warnsignale eine wichtige Rolle spielt.

Der Autor dankt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für wertvolle Anregungen. Herrn Dr.-Ing. B. Steinauer von der Autobahndirektion Südbayern sei für die Unterstützung bei der Durchführung der Testfahrten gedankt. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 204 "Gehör" gefördert.

### Literatur

- Steinauer, B. (1991): Stochastische und periodische Unebenheiten auf Fahrbahnen. In: Schmuck, A. (Hrsg.), Informationen- Verkehrsplanung und Straßenwesen, 32.
- DIN 45631 (1991): Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. Verfahren nach E. Zwicker. Beuth Verlag, Berlin.
- Fastl, H. (1982): Beschreibung dynamischer Hörempfindungen anhand von Mithörschwellen-Mustern. Hochschul-Verlag, Freiburg.
- Zwicker, E., Deuter, K., Peisl, W. (1985): Loudness meters based on ISO 532 B with large dynamic range. In: Proc. inter-noise '85, Vol. II, 1119-1122.
- Zwicker, E., Fastl, H. (1990): Psychoacoustics - Facts and Models. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.