

Gehörgerechte Geräuschbeurteilung

H. Fastl

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

Die grundlegenden Beiträge von Barkhausen zur gehörbezogenen Geräuschbeurteilung und von Zwicker zur gehörgerechten Geräuschbeurteilung werden aufgezeigt. Gehörgerechte Beurteilungen von Geräuschmissionen werden am Beispiel von Zuggeräuschen, Geräuschen von Rasenmähern sowie Geräuschen von Wasserfällen diskutiert. Die gehörgerechte Beurteilung von Geräuschmissionen wird für Straßenverkehrsgläusche, Flugverkehrsgläusche sowie Schienenverkehrsgläusche erläutert. Im Ausblick werden Möglichkeiten zur Prognose von Geräuschmissionen anhand von Daten für Geräuschmissionen aufgezeigt.

Einführung

Der berühmte Dresdner Akustikforscher Barkhausen hat bereits in den 20er Jahren die Grundlagen für eine gehörbezogene Geräuschbeurteilung gelegt (Barkhausen 1927). Mit großem Weitblick hat er postuliert, daß sich die Geräuschmeßtechnik an den Eigenschaften des menschlichen Gehörs orientieren muß. Aufbauend auf den grundlegenden Untersuchungen von Barkhausen wurden Meßgeräte entwickelt, welche die unterschiedliche Empfindlichkeit des Gehörs für verschiedene Frequenzbereiche berücksichtigen. Weltweit durchgesetzt hat sich die A-Bewertungskurve, die einer Kurve gleicher Lautstärke nachempfunden ist.

Die Zusammenhänge zwischen den Kurven gleicher Lautstärke und der A-Bewertung werden anhand von Fig. 1 erläutert. Die durchgezogenen Kurven repräsentieren Kurven gleicher Lautstärke (Isophonon), die verdeutlichen, daß das Gehör für Frequenzen um 4 kHz wesentlich empfindlicher ist, als für tiefere oder höhere Frequenzen. Die gestrichelten Kurven in Fig. 1 deuten die A-Bewertung an, die berücksichtigt, daß bei gleichem Schallpegel tiefe Frequenzen leiser wahrgenommen werden als mittlere Frequenzen.

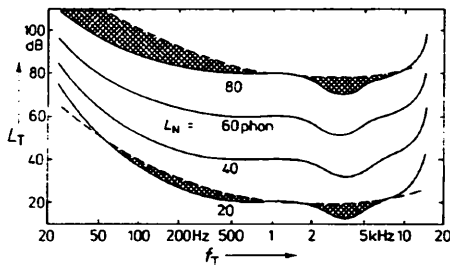


Fig. 1: Kurven gleicher Lautstärke (durchgezogen) im Vergleich zur A-Bewertung (gestrichelt).

Bei geringen Lautstärkepegeln ($L_N = 20$ phon) ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen der Kurve gleicher Lautstärke und der A-Bewertung. Bei größeren Lautstärken ($L_N = 80$ phon) zeigen sich jedoch deutliche Diskrepanzen zwischen der subjektiven Lautstärkebeurteilung und der A-Bewertung (getönte Fläche in Fig. 1). Bei größeren Lautstärken wird die wahrgenommene Lautstärke (Lautheit) tieffrequenter Spektralanteile durch die A-Bewertung systematisch unterschätzt. Dies führt zwangsläufig zu Problemen bei der Geräuschbeurteilung von Quellen mit tieffrequenten Anteilen, wie beispielsweise Kfz-Geräuschen. Dennoch soll ausdrücklich noch einmal darauf hingewiesen werden, daß das Konzept von Barkhausen, die Geräuschmeßtechnik an der Lautstärkewahrnehmung des Menschen zu orientieren, bis heute nichts von seiner Faszination eingebüßt hat.

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Gehörs, die von Schallpegelmessern nicht nachgebildet wird, ist die Abhängigkeit der Lautstärkewahrnehmung von der Bandbreite von Geräuschen.

In Fig. 2 sind exemplarisch einige Ergebnisse illustriert. Geräusche mit unterschiedlicher Bandbreite Δf , die alle den gleichen Schall-

pegel $L_A = 60$ dB(A) aufweisen, werden hinsichtlich der wahrgenommenen Lautstärke (Lautheit N in sone) beurteilt. Trotz konstantem Schallpegel ist die wahrgenommene Lautstärke (ausgefüllte Dreiecke) bei größeren Bandbreiten erheblich höher als bei geringen Bandbreiten.

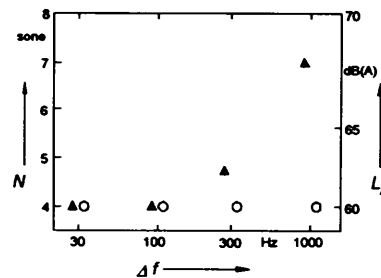


Fig. 2: A-bewerteter Schallpegel L_A (Kreise) und Lautheit N (Dreiecke) von Schmalbandgeräuschen unterschiedlicher Bandbreite Δf der Mittenfrequenz 1 kHz.

Diese bandbreitenabhängigen Effekte der Lautstärkewahrnehmung können von einem einkanaligen Meßverfahren (DIN EN 60 651), das üblicherweise in Schallpegelmessern implementiert ist, nicht erfaßt werden. Hierzu sind mehrkanalige Meßverfahren erforderlich, wie die Verfahren von Stevens 1956, Kryter 1959 oder Zwicker 1960.

In Fig. 3 sind exemplarisch die einzelnen Schritte des Verfahrens nach Zwicker illustriert. Zunächst wird die physikalische Frequenzskala in die gehörgerechte Frequenzgruppenskala transformiert, die zu Ehren des großen Lärmforschers Barkhausen als Bark-Skala bezeichnet wird. Ein Schmalbandgeräuschen von 160 Hz Bandbreite mit 60 dB Schallpegel bei 1 kHz erscheint nach der Transformation als Säule bei $z = 8,5$ Bark. In einem nächsten Schritt werden die Verdeckungseigenschaften des Gehörs berücksichtigt. Dadurch ergibt sich eine spektrale Verbreiterung des Erregungspegelmusters L_E mit steiler unterer und flacher oberer Flanke. Durch eine Transformation, die im Prinzip auf der vierten Wurzel der Schallintensität beruht, wird das Erregungspegelmuster in das selektivere Lautheits-Tonheitsmuster transformiert. Dieses Muster wird im Laborjargon als „Zwicker-Diagramm“ bezeichnet. Für die Praxis ist häufig von besonderer Bedeutung, daß die Fläche im Zwicker-Diagramm ein direktes Maß für die wahrgenommene Lautstärke repräsentiert.

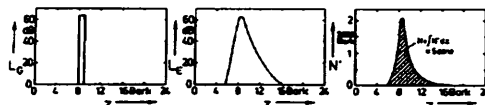


Fig. 3: Schematische Darstellung der Verarbeitungsschritte im Lautheitsverfahren nach Zwicker.

Das Verfahren nach Zwicker hat Eingang in nationale (DIN 45 631) und internationale (ISO 532 B) Normen gefunden. DIN 45 631 enthält ein Rechenprogramm zur Bestimmung der Lautheit und des Lautstärkepegels aus Terzpegeln stationärer Geräusche, das auf IBM-kompatiblen PCs lauffähig ist.

Inzwischen wurden die von Zwicker vorgeschlagenen Konzepte verfeinert und so erweitert, daß auch für stark zeitvarianter Schalle deren wahrgenommene Lautstärke (Lautheit) mit großer Genauigkeit bestimmt werden kann (Zwicker und Fastl 1983). Das Geräuschbeurteilungsverfahren nach Zwicker hat sich in der Praxis sehr gut bewährt, so daß heutzutage von vielen namhaften Herstellern akustischer Meßsysteme Lautheitsanalysen nach DIN 45 631 durchgeführt werden können (vgl. Fastl 1997).

Geräuschemissionen

Gehörerechte Geräuschmeßverfahren werden bei der Beurteilung von Geräuschemissionen erfolgreich eingesetzt. In der Literatur wurden zahlreiche Fälle dargestellt, in denen eine gehörerechte Geräuschbeurteilung anhand von DIN 45 631 erzielt werden konnte. Literaturhinweise auf die Grundlagen der gehörerechten Geräuschbeurteilung sowie erfolgreiche praktische Anwendungen finden sich im *www*. Da bereits umfangreiches Wissen über die Anwendung gehörerechter Geräuschbeurteilungsverfahren bei Geräuschemissionen vorliegt, sollen in dieser Arbeit nur drei Anwendungsgebiete beispielhaft aufgezeigt werden.

In psychoakustischen Untersuchungen wurden anhand der Methode der Größenschätzung die Geräuschemissionen unterschiedlicher Schienenfahrzeuge ermittelt. Tabelle I gibt einen Überblick über die beurteilten Zugtypen mit unterschiedlichen Längen und Geschwindigkeiten.

	Zugtyp	Länge [m]	Geschwindigkeit [km/h]
A	Güterzug	520	86
B	Personenzug	95	102
C	Eilzug	228	122
D	ICE	331	250
E	ICE	331	250
F	Güterzug	403	100
G	Güterzug	175	90

Tab. I: Beurteilte Züge.

Fig. 4 zeigt die Beurteilung der wahrgenommenen Lautstärke der Züge A bis G. Sämtliche Urteile wurden auf die Bewertung für Zug C normiert. Die Kreise illustrieren subjektive Beurteilungen (Zentralwerte mit Wahrscheinlichen Schwankungen), die Sterne repräsentieren meßtechnische Beurteilungen nach DIN 45 631.

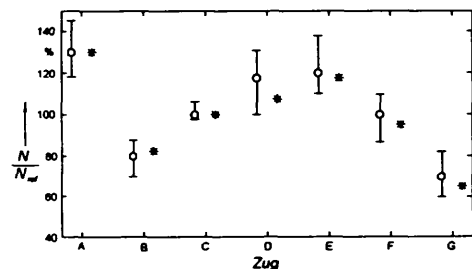


Fig. 4: Geräuschemissionen unterschiedlicher Züge gemäß Tabelle I; Psychoakustische (Kreise) und meßtechnische (Sterne) Lautheitsbeurteilung.

Die in Fig. 4 dargestellten Daten zeigen für die Geräuschemission von Zügen eine gute Übereinstimmung von subjektiver und meßtechnischer Beurteilung. Ähnlich wie bei Geräuschen von Pkws, Lkws, Flugzeugen (vgl. Literatur im *www*), lassen sich auch die Geräusche von Zügen anhand physikalischer Messungen mit Lautheits-Analysesystemen nach DIN 45 631 gehörerecht erfassen.

Ein weiteres Beispiel für die Beurteilung von Geräuschemissionen ist in Fig. 5 dargestellt. Dabei handelt es sich um die Geräusche von Rasentrümmern verschiedener Hersteller bei unterschiedlichen Drehzahlen. In psychoakustischen Experimenten wurden die Geräusche anhand der Methode der Größenschätzung hinsichtlich ihrer Lautheit skaliert (Kreise). In getrennten Sitzungen hatten die Versuchspersonen auch die Lästigkeit der Geräusche anzugeben (Dreiecke). Dabei sollten sich die Versuchspersonen in folgende Situation versetzen: Nach einem langem Arbeitstag wollen Sie in Ruhe die Zeitung lesen. In dieser Situation dringen die Geräusche (der Rasentrümmer) auf Sie ein. Wie lästig erscheinen Ihnen unter diesen Bedingungen die Geräusche?

Die Sterne in Fig. 5 repräsentieren Daten aus meßtechnischen Beurteilungen nach DIN 45 631. Sämtliche Bewertungen wurden auf die Urteile für Geräusch 9 normiert.

Im Mittel zeigen sich nur relativ geringe Unterschiede zwischen den drei Bewertungen für jedes Geräusch. Dies bedeutet, daß das

Lautheitsurteil und das Lästigkeitsurteil für Geräuschemissionen von Rasentrümmern nahe beieinander liegen und meßtechnisch durch Messungen mit einem Lautheits-Analysesystem nach DIN 45 631 in guter Näherung vorhergesagt werden können. Obwohl diese Aussage für viele der untersuchten Geräusche zutrifft, gibt es jedoch auch Ausnahmen: Beispielsweise wird beim Geräusch 5 das psychoakustische Lautheitsurteil meßtechnisch gut nachgebildet, jedoch liegt die Lästigkeitsbeurteilung (Dreieck) deutlich höher.

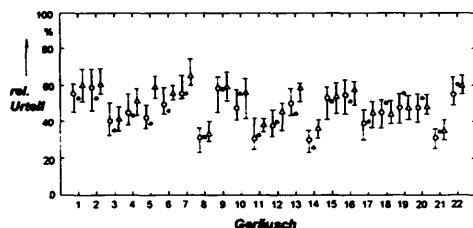


Fig. 5: Geräuschemissionen von Rasentrümmern. Subjektive Beurteilung der Lautheit (Kreise) bzw. der Lästigkeit (Dreiecke) im Vergleich zur meßtechnischen Beurteilung nach DIN 45 631 (Sterne).

Diese Unterschiede in der Lautheits- bzw. Lästigkeitsbeurteilung können ihre Ursachen darin haben, daß die Lautheit zwar den dominanten Faktor der Lästigkeitsbeurteilung repräsentiert (vgl. z.B. Mellert und Weber 1981, Brennecke und Renmers 1983, Fastl 1993a), jedoch auch andere Geräuschqualitäten wie Klangfarbe oder Zeitstruktur hinsichtlich der Lästigkeit eine wesentliche Rolle spielen können (vgl. Terhardt 1984).

Im Bereich der Psychoakustik wurden dabei Verfahren entwickelt (Widmann 1992a), die den Einfluß von Hörempfindungen wie Schärfe, Schwankungsstärke und Rauigkeit zusätzlich zur Lautheit im Hinblick auf die Psychoakustische Lästigkeit berücksichtigen (vgl. auch Ellermeier et al. 1997). Darüber hinaus können ästhetische und kognitive Effekte das Lästigkeitsurteil bestimmen (Blauert 1986).

Solche Einflüsse spielen bei der Geräuschgestaltung von Produkten („Sound Engineering“, „Sound Quality Design“) eine zentrale Rolle. Der derzeitige Stand der Forschung auf diesem wichtigen Anwendungsgebiet der Psychoakustik sowie bereits erfolgte Umsetzungen in die Praxis wurden kürzlich auf einem EAA-Tutorium präsentiert (siehe Blauert 1996).

Als letztes Beispiel bezüglich der Beurteilung von Geräuschemissionen soll eine nicht alltägliche Fragestellung behandelt werden, die kürzlich an uns herangetragen wurde und die ausgezeichnet mit dem Motto der DAGA 97 „Kiel - Traditionstadt des Wasserschalls“ paßt.

Während normalerweise das Rauschen von Wasserfällen als angenehm empfunden wird, mußte vor kurzem im Rahmen eines Rechtsstreits die Lautstärke von Wasserfällen beurteilt werden. In Kooperation mit Kollegen vom Lehrstuhl für Wasserbau wurde die Geräuschentwicklung systematisch untersucht und erstmalig gehörerecht erfaßt. In Modellversuchen der Versuchsanstalt Oberrhein wurde die Geräuschentwicklung eines Wasserfalls von 1,70 m Höhe bei unterschiedlicher Ausgestaltung der Höhendifferenz studiert. Die Ergebnisse sind in Fig. 6 für verschiedene Wassermengen skizziert.

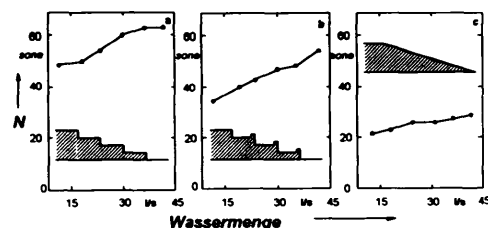


Fig. 6: Geräuschentwicklung eines 1,70 m hohen „Wasserfalls“ bei verschiedenen Wassermengen.

- (a) vierstufige Kaskade
- (b) vierstufige Kaskade mit abgesenkten Böden
- (c) Schußrinne.

Fig. 6a zeigt die Geräuschentwicklung einer vierstufigen Kaskade, die sich etwa zwischen 50 sone und 60 sone bewegt. Durch geringfügige bauliche Änderungen, nämlich durch Absenken der Kaskadenböden, ergibt sich eine deutliche Abnahme der Lautheit. Noch wesentlich niedrigere Lautheiten (20 bis 30 sone) lassen sich durch eine Schußrinne erreichen (Fig. 6c), bei der das Wasser gewissermaßen in die Tiefe gleitet. Nicht nur die Lautstärken, sondern auch die Klangbilder der einzelnen „Wasserfälle“ sind sehr unterschiedlich.

Durch Absenken der Böden der vierstufigen Kaskade kann das Klangbild von Wasserfällen wesentlich beeinflusst werden. Diese Klangbildunterschiede werden anhand von Fig. 7 illustriert. Die durchgezogene Kurve zeigt das „Zwicker-Diagramm“ für die vierstufige Kaskade, die gestrichelte Kurve für die Kaskade mit abgesenkten Böden.

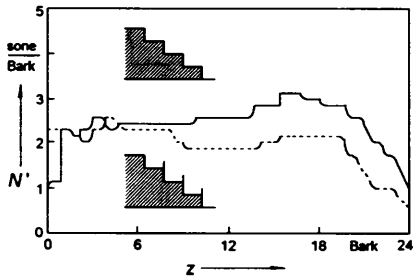


Fig. 7: Lautheits-Tonheitsmuster für die vierstufige Kaskade (durchgezogen) bzw. die vierstufige Kaskade mit abgesenkten Böden (gestrichelt); Zwickermenge: 31 Vs.

Die in Fig. 7 dargestellten Lautheitsmuster verdeutlichen, daß bei Absenken der Böden der vierstufigen Kaskade Spektralanteile bei hohen Frequenzen erheblich reduziert, bei tiefen Frequenzen jedoch etwas angehoben werden. Während bei der vierstufigen Kaskade das Wasser über die Stufen „schießt“, wird es in den Becken der Kaskade mit abgesenkten Böden etwas „abgebremst“.

Die subjektive Beurteilung der Lautstärke der Wassergeräusche bei unterschiedlicher Ausgestaltung des „Wasserfalls“ wird durch die meßtechnische Beurteilung nach DIN 45 631 in guter Näherung nachgebildet.

Bezüglich der Akzeptanz der Wasserfallgeräusche ergeben sich jedoch deutliche interindividuelle Unterschiede. Einige Versuchspersonen bevorzugen - trotz großer Lautstärke - das Geräusch der vierstufigen Kaskade, da damit typische Wasserfallgeräusche assoziiert werden. Eine andere Gruppe von Versuchspersonen bevorzugt jedoch die erheblich leiseren Geräusche der Schußrinne, deren „murmeln“ eher an einen Bach erinnert. Die Mehrzahl der befragten Versuchspersonen bevorzugte das Klangbild der Kaskade mit abgesenkten Böden, da hierbei einerseits Charakteristika von Wasserfällen hörbar werden, andererseits aber das Klangbild angenehmer erscheint als bei der sehr höhenbetonten vierstufigen Kaskade.

Die etwas ungewöhnliche Fragestellung hinsichtlich der Akzeptanz der Geräusche von Wasserfällen zeigt jedoch typische Probleme bei der Emissionsbeurteilung von Geräuschen auf, bei denen ästhetische und kognitive Aspekte eine zentrale Rolle spielen (Blauen 1986). Darüber hinaus dürfen psychologische und soziologische Aspekte nicht außer Acht gelassen werden (vgl. z.B. Schick 1979, Schick et al. 1985, Schick 1990, Schulte-Fortkamp et al. 1997, Weber et al. 1997). Es kann einen großen Unterschied machen, ob ich mich als Spaziergänger an den Geräuschen eines Wasserfalls erfreue, oder als Anwohner diesen Geräuschen Tag und Nacht „ausgesetzt“ bin.

Geräuschimmissionen

Die meßtechnische Beurteilung von Geräuschimmissionen erfolgt derzeit weltweit meistens anhand des A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels (vgl. Gottlob 1994). Dieses Mittelungsverfahren hat den Vorteil, daß es physikalisch denkbar einfach ist, jedoch den gravierenden Nachteil, daß eine Gehörbezogenheit nicht einmal im Ansatz angestrebt wird. Aus der Sicht der gehörgerechten Geräuschbeurteilung besteht demnach bei Geräuschimmissionen ein erheblich größerer Nachholbedarf als bei Geräuschemissionen. Im folgenden sollen daher

für häufig auftretende Geräuschsituationen Beispiele für die gehörgerechte Beurteilung von Geräuschimmissionen aufgezeigt werden.

Gemeinsam mit Kollegen von der Universität Osaka, Japan wurden psychoakustische Meßverfahren entwickelt, welche die subjektive Beurteilung von Geräuschimmissionen ermöglichen. Diese Verfahren sind bereits ausführlich in der Literatur beschrieben worden (z.B. Namba et al. 1988, Fastl et al. 1989, Kuwano und Fastl 1989), so daß hier nur wesentliche Gesichtspunkte angeführt werden sollen. Darüber hinaus haben Varianten der vorgeschlagenen Meßverfahren bereits Eingang in die Arbeiten weiterer Forschergruppen gefunden (Weber 1992, Bisping 1994, Hellbrück 1996, Hellbrück et al. 1997). Vor- und Nachteile verschiedener Varianten der psychoakustischen Meßmethoden zur Beurteilung von Geräuschimmissionen wurden studiert (Fastl 1991a) und für die Optimierung der eingesetzten Verfahren berücksichtigt.

Im wesentlichen besteht die Aufgabe der Versuchsperson darin, die momentan wahrgenommene Lautstärke auf die Länge eines Balkens abzubilden, der auf dem Bildschirm eines PCs dargestellt wird. Am Ende des Versuchs erhält die Versuchsperson einen Fragebogen, in dem sie die gehörten Geräusche auflistet, das dominante Geräusch benennt, sowie die über den Darbietungszeitraum gemittelte wahrgenommene Lautstärke (Globale Lautheit) auf drei Arten skaliert: Kategorienskala, Größenschätzung, Angabe einer Linienlänge.

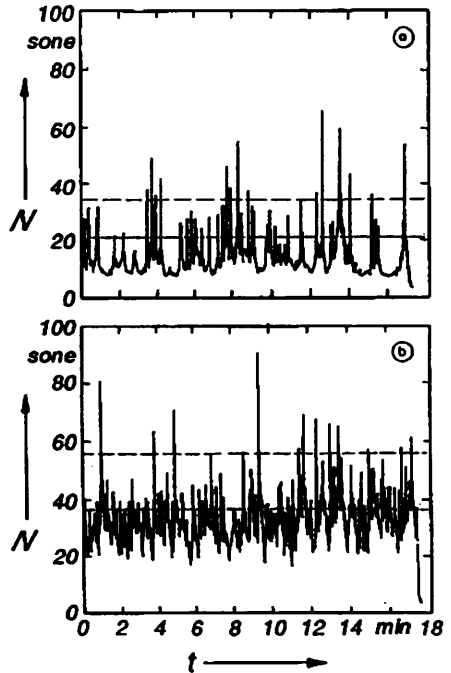


Fig. 8: Lautheits-Zeitmuster von Straßenverkehrsgerauschen

(a) in einer ruhigen Wohngegend

(b) auf einer dicht befahrenen Ringstraße.

Gestrichelte Linien: Perzentillautheit N_p im Einklang mit der subjektiven Beurteilung.

Gepunktete Linien: Beurteilung anhand des energieäquivalenten Dauerschallpegels.

In Fig. 8 sind typische Ergebnisse der Beurteilung von Geräuschimmissionen bei Straßenverkehrslärm dargestellt. Die mit einem Lautheits-Analysesystem gemessene Lautheit N ist als Funktion der Zeit t angegeben. Fig. 8a zeigt die Ergebnisse für eine ruhige Wohngegend, Fig. 8b für eine dicht befahrene Ringstraße. Die gepunkteten Linien in Fig. 8 entsprechen der meßtechnischen Beurteilung anhand des energieäquivalenten Dauerschallpegels, die gestrichelten Linien sind im Einklang mit der subjektiven Beurteilung.

Die in Fig. 8 dargestellten Ergebnisse bestätigen die in zahlreichen Studien nachgewiesene Erfahrung (vgl. z.B. Kuwano und Namba 1978.

Fastl 1991a), daß die globale Lauthheitsbeurteilung wesentlich von lauten Einzelereignissen beeinflusst wird. Bezüglich der gehörgerechten Beurteilung von Geräuschmissionen bedeutet dies, daß nicht etwa ein Mittelwert, sondern eher Maximalwerte für die subjektive Beurteilung von Geräuschmissionen maßgeblich sind.

Eine genaue Analyse zahlreicher im In- und Ausland gewonnener Versuchsergebnisse ergibt, daß ein Perzentilwert der meßtechnisch erfaßten Lauthheit nach DIN 45 631 die subjektive Beurteilung in guter Näherung nachbilden kann. Für Straßenverkehrslärm liegt dieser Perzentilwert bei N_4 . Dies bedeutet, daß diejenige Lauthheit, die in 4% der Meßzeit erreicht oder überschritten wurde, ein Maß für die Globale Lauthheit darstellt. Dieses Maß ist in Fig. 8 durch gestrichelte Geraden dargestellt. Ein Vergleich mit den gepunkteten Geraden zeigt, daß bei Anwendung des derzeit weltweit eingesetzten energieäquivalenten Dauerschallpegels die tatsächliche Geräuschbelastung durch Straßenverkehr deutlich unterschätzt wird.

Auch die Geräuschminderung durch „Flüsterasphalt“ (Fastl 1991b) oder Geschwindigkeitsbeschränkungen (Fastl et al. 1991) konnte anhand der Perzentillauthheit gehörgerecht beschrieben werden.

Die Stabilität und Aussagekraft von Perzentilwerten wurden in umfangreichen statistischen Untersuchungen geprüft (vgl. Heiß 1997, Stemplinger 1997a). Die recht komplexen Zusammenhänge lassen sich extrem vereinfacht etwa so zusammenfassen: Bereits bei etwa einem Dutzend Überschreitungen ergibt sich ein statistisch hinreichend sicherer Perzentilwert.

Da Geräuschmissionsbeurteilungen im Labor mit psychoakustischen Meßmethoden üblicherweise nur über einen Zeitraum von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden erhoben werden können, stellt sich die Frage nach deren Relevanz im Hinblick auf die Praxis mit Einwirkzeiten von Stunden, Tagen, Monaten oder Jahren. Daher wurden in Kooperation mit dem Institut für Sozialmedizin der Universität Innsbruck umfangreiche Vergleiche der Ergebnisse aus Labor- und Feldstudien durchgeführt (Widmann 1992b, Lercher 1992). Für Straßenverkehrsgeräusche konnte eine sehr gute Übereinstimmung von Daten aus Laborstudien und Feldstudien aufgezeigt werden (vgl. z.B. Fastl 1993a). Dies bedeutet, daß von psychoakustischen Laborstudien durchaus brauchbare Hinweise auf die Beurteilung von Geräuschmissionen in der Praxis erwartet werden können.

Für die Beurteilung von Geräuschmissionen durch Flugverkehr spielen in jüngerer Zeit sog. „Trading“-Effekte eine wichtige Rolle. Dabei sollen zwei gegenläufige Effekte miteinander verknüpft werden: Einerseits erzeugen moderne Flugzeuge wegen ihrer leiseren Triebwerke eine geringere Geräuschmission, andererseits ist eine Zunahme der Flugbewegungen zu verzeichnen. Es stellt sich nun die Frage, welche Erhöhung der Zahl der Flugbewegungen mit modernen, leiseren Flugzeugen „geräuschneutral“ möglich ist.

Bei Anwendung des derzeit in vielen Ländern vorgeschriebenen energieäquivalenten Dauerschallpegels ergeben sich völlig realitätsferne Prognosen (Fastl 1990): Ein einziges, altes, lautes Flugzeug könnte durch 100 (einhundert!) neue leisere Flugzeuge ersetzt werden. Im Gegensatz zu dieser völlig irreführenden Prognose anhand des energieäquivalenten Dauerschallpegels, läßt sich aus Ergebnissen umfangreicher psychoakustischer Experimente eine vernünftig erscheinende Faustformel ableiten: Sofern ein neues Flugzeug im Vergleich zu einem alten Flugzeug die halbe Lauthheit erzeugt, dürfen doppelt so viele neue Flugzeuge fliegen, damit hinsichtlich der Geräuschmission der *status quo* beibehalten werden kann.

Im Zusammenhang mit der Ausmusterung alter, lauter Flugzeuge wurden zahlreiche Szenarien durchgespielt (Fastl 1993b). Anhand von Fig. 9 sollen einige Annahmen illustriert werden:

1. Alle lauten Flugzeuge werden durch leisere ersetzt: vgl. (a) versus (b).
2. Es werden doppelt so viele leisere Flugzeuge als laute Flugzeuge eingesetzt: vgl. (b) versus (c).
3. In einer Übergangszeit wird nur ein Teil der lauten Flugzeuge durch leisere Flugzeuge ersetzt: vgl. (a) versus (e).

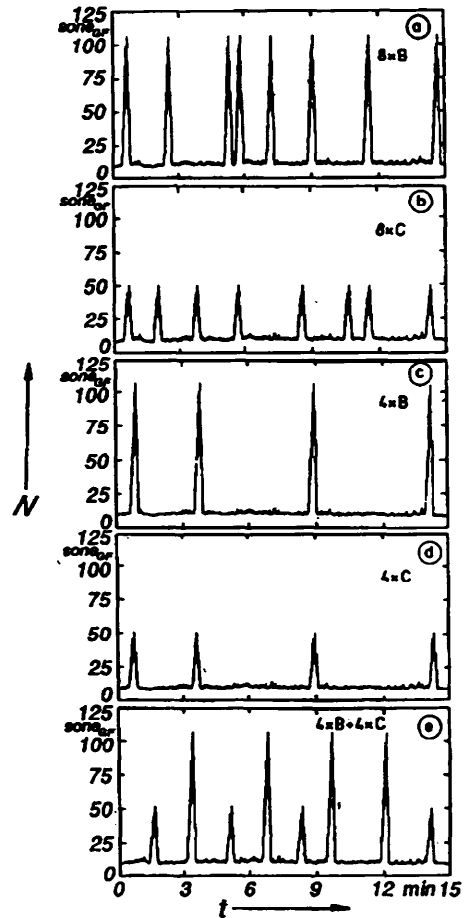


Fig. 9: Lauthheits-Zeitfunktionen von Geräuschmissionen durch laute (B) bzw. leisere (C) Flugzeuge.

Die in Fig. 10 dargestellten Ergebnisse ermöglichen einen Vergleich der subjektiven bzw. meßtechnischen Beurteilung der in Fig. 9 illustrierten Szenarien. Kreise repräsentieren subjektive Bewertungen, Sterne meßtechnische Bewertungen.

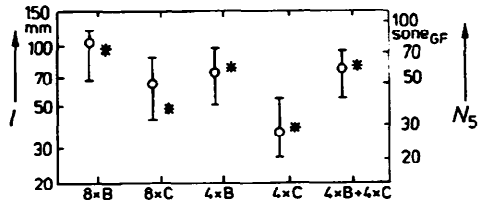


Fig. 10: Subjektive (Kreise) bzw. meßtechnische (Sterne) Beurteilung der in Fig. 9 illustrierten Szenarien von Geräuschmissionen durch Flugverkehr.

In Fig. 10 zeigt sich eine gute Übereinstimmung von subjektiven und meßtechnischen Urteilen. Dies bedeutet, daß auch bei Flugverkehr die subjektive Beurteilung von Geräuschmissionen anhand eines

Perzentilwerts der meßtechnisch erfaßten Lautheit gehörgerecht nachvollzogen werden kann.

Auch für Schienenverkehrsgeräusche wurde die Immissionsbeurteilung mit psychoakustischen Meßmethoden erfaßt und Daten aus physikalischen Geräuschmessungen gegenübergestellt. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Fig. 11 beispielhaft illustriert. Die untersuchten Immissionsgeräusche dauerten jeweils 15 Minuten, innerhalb derer jeweils acht Vorbeifahrten unterschiedlicher Zugtypen dargeboten wurden, denen leiser Straßenverkehrslärm (40 dB(A)) unterlagert war. Tabelle II gibt einen Überblick über die untersuchten Immissionsgeräusche.

Geräusch	1	2	3	4	5	6	7	8
Zugtyp	GZ	GZ	GZ	GZ	GZ	ICE	GZ	GZ
Zuglänge [m]	629	311	175	175	175	331	403	211
Geschwindigkeit [km/h]	115	113	118	90	58	250	115	113

Tab. II: Untersuchte Immissionsgeräusche von Schienenverkehr.

Die subjektiven und meßtechnischen Urteile wurden auf den Wert für das Immissionsgeräusch 6 normiert. Die subjektive Beurteilung der Geräusche erfolgte wieder anhand der Methode der Linienlänge, für die meßtechnische Beurteilung wurde der Lautheitsperzentilwert N_4 verwendet.

Die in Fig. 11 dargestellten Daten zeigen auch für Geräuschimmissionen durch Schienenverkehr eine gute Übereinstimmung von subjektiver und meßtechnischer Beurteilung.

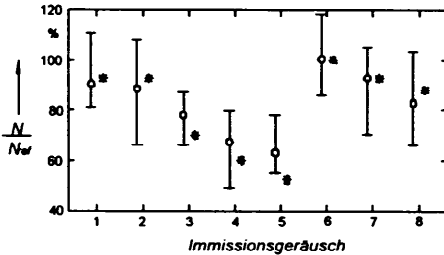


Fig. 11: Beurteilung von Immissionsgeräuschen bei Schienenverkehr. Subjektive Beurteilung anhand der Linienlänge (Kreise), meßtechnische Beurteilung anhand der Perzentillautheit N_4 (Sterne). Immissionsgeräusche gemäß Tabelle II.

Des Weiteren wurden in psychoakustischen Experimenten Geräuschimmissionen der Magnetschwebbahn Transrapid mit Geräuschimmissionen der konventionellen Bahn verglichen. Da auf einer Versuchsstrecke im Emsland bisher nur 2-Sektionen-Fahrzeuge des Transrapid existieren, wurden die für den praktischen Einsatz geplanten 6-Sektionen-Fahrzeuge akustisch simuliert (Gottschling und Fastl 1997). In Fig. 12 sind Lautheits-Zeitfunktionen von drei Fahrzeugen der Deutschen Bahn sowie drei Vorbeifahrten des Transrapid dargestellt.

In 100 m Entfernung ergibt sich für beide Verkehrsmittel der gleiche Geräuschimmissionspegel von 62,3 dB(A). Dabei beträgt die Geschwindigkeit des Transrapid 405 km/h, die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge der Deutschen Bahn liegen zwischen 93 und 248 km/h. Weitere Einzelheiten dieses Experimentes sind der Literatur zu entnehmen (Gottschling und Fastl 1997).

	Kategorie	normierte Größen-schätzung	Linienlänge [m]
DB	4	1	76
TR	4	1,11	77

Tabelle III: Beurteilung der Geräuschimmissionen für die in Fig. 12 dargestellten Geräusche.

Hinsichtlich der Immissionsbewertung anhand der Globalen Lautheit zeigen sich für die konventionelle Bahn und den Transrapid recht ähnliche Ergebnisse, die in Tab. III zusammengefaßt sind. Beim Vergleich von Geräuschimmissionen unterschiedlicher Verkehrsträger ist dies nicht immer der Fall.

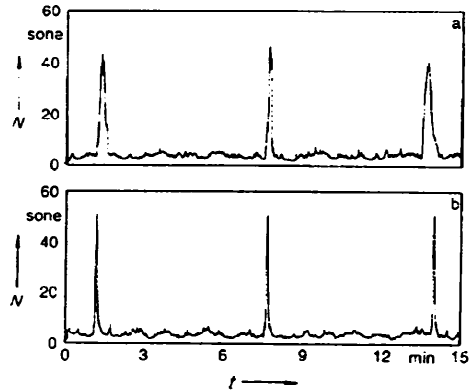


Fig. 12: Lautheits-Zeitfunktionen von Fahrzeugen der Deutschen Bahn bzw. des Transrapid bei gleichem energiekquivalenten Dauerschallpegel.

Beispielsweise können Straßenverkehrgeräusche und Schienenverkehrgeräusche trotz gleichem energiekquivalenten Dauerschallpegel hinsichtlich der Geräuschimmissionen unterschiedlich beurteilt werden. Dies wurde in umfangreichen Feldstudien nachgewiesen (vgl. z.B. Möhler und Knall 1984, Möhler 1988, Hauck 1991, Schuemer und Schuemer-Kohrs 1991). Der unterschiedlichen Bewertung von Geräuschimmissionen durch Straße bzw. Schiene wird in mehreren Ländern durch einen sog. „Schienenbonus“ Rechnung getragen (Gottlob 1994). In psychoakustischen Experimenten wurde untersucht, ob auch im Labor ein „Schienenbonus“ auftreten kann.

In Fig. 13 sind Lautheits-Zeitfunktionen entsprechender Immissionsgeräusche illustriert. Dabei werden vier Vorbeifahrten von ICE-Zügen dreifüß Vorbeifahrten von Kraftfahrzeugen gegenübergestellt. Beide Immissionsgeräusche erzeugen denselben energiekquivalenten A-bewerteten Schallpegel von 69 dB(A).

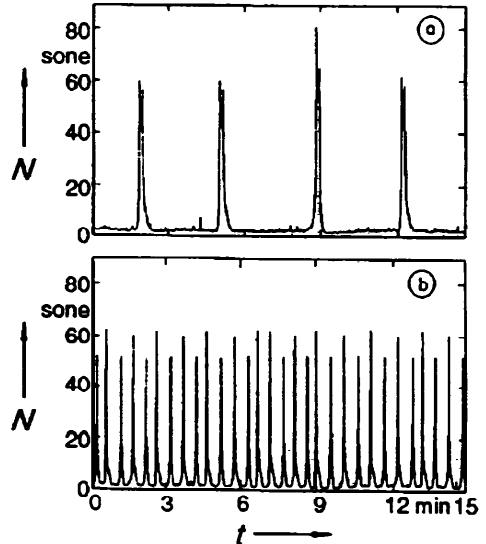


Fig. 13: Lautheits-Zeitfunktionen von Geräuschimmissionen durch Schienenverkehr bzw. Straßenverkehr.

Die in psychoakustischen Experimenten ermittelten Beurteilungen der Geräuschimmissionen sind in Tabelle IV aufgelistet. Weitere Details finden sich in der Literatur (Fastl et al. 1996). Trotz gleichem

energieäquivalenten Dauerschallpegel ergibt sich für die Zugeräusche eine niedrigere Bewertung der Globalen Lautheit als für die Kfz-Geräusche. Ein „Schienenbonus“ kann demnach nicht nur bei Feldstudien auftreten, sondern auch in Laborstudien kann sich - trotz gleichem energieäquivalenten Dauerschallpegel - für Schienenverkehrsgeräusche eine günstigere Bewertung ergeben als für Straßenverkehrsgeräusche.

	Kategorie	normierte Größenschätzung	Linienlänge [mm]
4 ICE	5	1	77
30 Kfz	6	1,28	105

Tab. IV: Beurteilung der Geräuschimmissionen für die in Fig. 13 dargestellten Geräusche.

Gewissermaßen als Gegenstück zum „Schienenbonus“ ist in Feldstudien ein „Fluglärmalus“ festgestellt worden. Für gleiche Lästigkeit der Geräuschimmissionen von Flugverkehr und Straßenverkehr wurde ein „Fluglärmalus“ von 5 dB(A) bei mittleren Pegeln (Green 1993) und bis zu 15 dB(A) bei höheren Pegeln (Taylor 1993) vorgeschlagen.

In einer Pilotstudie wurde mit psychoakustischen Meßmethoden untersucht, ob ein „Fluglärmalus“ auch im Labor aufgezeigt werden kann. Innerhalb eines Zeitraums von 15 Minuten wurden 16 Überflüge von Düsen- bzw. Propellermaschinen oder 22 Vorbeifahrten von Pkw, Lkw, Moped usw. dargeboten (Fastl und Hunecke 1995). Einige Ergebnisse sind in Fig. 14 dargestellt. Die wahrgenommene Globale Lautheit wird anhand der Linienlänge ausgedrückt.

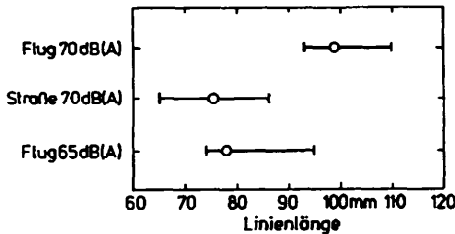


Fig. 14: Wahrgenommene Globale Lautheit für Geräuschimmissionen von Flugverkehr bzw. Straßenverkehr mit energieäquivalenten Dauerschallpegeln wie angegeben.

Die in Fig. 14 dargestellten Daten sind im Einklang mit einem „Fluglärmalus“: Bei gleichem energieäquivalenten Dauerschallpegel von 70 dB(A) für Fluggeräusche bzw. Straßengeräusche ergibt sich für die Fluggeräuschimmissionen eine größere Globale Lautheit als für die Straßengeräuschimmissionen. Werden die Fluggeräusche mit 65 dB(A) mit Straßengeräuschimmissionen mit 70 dB(A) hinsichtlich der Globalen Lautheit verglichen, so ergibt sich für die Fluggeräusche immer noch eine geringfügig höhere Beurteilung. Dies bedeutet, daß auch bei Laborexperimenten ein „Fluglärmalus“ von mehr als 5 dB(A) auftreten kann.

Die Tatsache, daß der energieäquivalente Dauerschallpegel durch Zuschläge oder Abzüge wie „Fluglärmalus“ oder „Schienenbonus“ korrigiert werden muß, weist aus der Sicht der Psychoakustik auf deutliche Schwächen der derzeitigen Geräuschmeßtechnik hin. Andererseits wurde aufgezeigt, daß die subjektive Beurteilung von Verkehrsgeräuschen meßtechnisch anhand von Perzentilwerten der Lautheit in guter Näherung nachvollzogen werden kann. Dies gilt auch für Industriegeräusche (Stempler 1996) oder Geräusche am Arbeitsplatz (Stempler und Seiter 1995). Auch Kombinationen einzelner Geräuschquellen, wie beispielsweise Verkehrslärm plus Industrielärm (Stempler 1997b) oder Schienenverkehr plus Straßenverkehr (Stempler und Gottschling 1997) lassen sich anhand von Perzentilwerten der Lautheit gehörgerecht erfassen. Deshalb erscheint die Umsetzung der gehörgerechten Beurteilung von Geräuschimmissionen in die Praxis eine lohnende Zukunftsaufgabe.

Ausblick

Während in den vorangegangenen Kapiteln die subjektive Beurteilung von Geräuschimmissionen bzw. Geräuschimmissionen getrennt betrachtet wurde, wäre es für die Praxis äußerst wünschenswert, Geräuschimmissionen anhand von Daten für Geräuschimmissionen prognos-

tizieren zu können. Daher sollen hier aus laufenden Forschungsarbeiten erste Ansätze dargelegt werden.

Bei der psychoakustischen Geräuschbeurteilung werden, wie erwähnt, die momentan wahrgenommenen Lautstärken auf die Länge eines Balkens am Bildschirm eines PCs abgebildet. Die Balkenlängen können somit als Repräsentanten für die psychoakustische Beurteilung von Geräuschemissionen aufgefaßt werden. Die Beurteilung der Geräuschimmissionen wird durch die Angabe einer Linienlänge dargestellt. Für die Prognose von Geräuschimmissionen aus Geräuschemissionen ist daher ein Algorithmus zu suchen, der die Balkenlängen (Emission) mit den Linienlängen (Immission) entsprechend verknüpft.

In Fig. 15a sind erste Ansätze dieses Vorgehens illustriert. Die momentanen Lautheitsurteile entsprechen der durchgezogenen Kurve, das Immissionsurteil dem Pfeil an der rechten Ordinate. Gestrichelt eingetragen ist der Perzentilwert BL_p der Balkenlänge, der in 5% der Meßzeit erreicht oder überschritten wird. Die experimentell ermittelte psychoakustische Immissionsbeurteilung (Pfeil) und die aus Momentanurteilen abgeleitete Immissionsbeurteilung (gestrichelte Gerade) liegen dicht beieinander. Eine Prognose subjektiver Immissionsbeurteilungen anhand von subjektiven Emissionsbeurteilungen scheint also möglich. Die Anwendung eines Perzentilwerts bei den subjektiven Urteilen erinnert an eine Vorgehensweise, die sich bei den meßtechnischen Bewertungen bewährt hat.

Alternativ wurde ein weiterer Ansatz überprüft, bei dem davon ausgegangen wird, daß Geräuschspitzen in der Beurteilung eine Nachwirkung erzeugen. Ein vergleichbares Konzept wird derzeit beispielsweise beim Takt-Maximalpegel verfolgt, der in Deutschland für die Beurteilung von Industriegeräuschen vorgesehen ist. Für die Beschreibung psychoakustischer Ergebnisse wurde folgendes Konzept realisiert: Jede Geräuschspitze wird mit einer Abklingfunktion versehen, um Wirkungen hinsichtlich der Beurteilung von Geräuschimmissionen zu berücksichtigen. In Fig. 15b ist ein exponentielles Abklingen mit einer Zeitkonstante von 5 Minuten dargestellt. Wird nun über die durch die Abklingfunktion wesentlich modifizierte Balkenlänge arithmetisch gemittelt, ergibt sich die in Fig. 15b gestrichelt eingetragene Gerade. Sie repräsentiert eine Prognose der Geräuschimmission aus subjektiven Emissionsdaten. An der rechten Ordinate von Fig. 15b ist als Pfeil wieder die in psychoakustischen Experimenten ermittelte Immissionsbeurteilung dargestellt. Auch für dieses Verfahren zeigt sich eine brauchbare Prognose subjektiver Immissionsbeurteilungen anhand von subjektiven Emissionsurteilen.

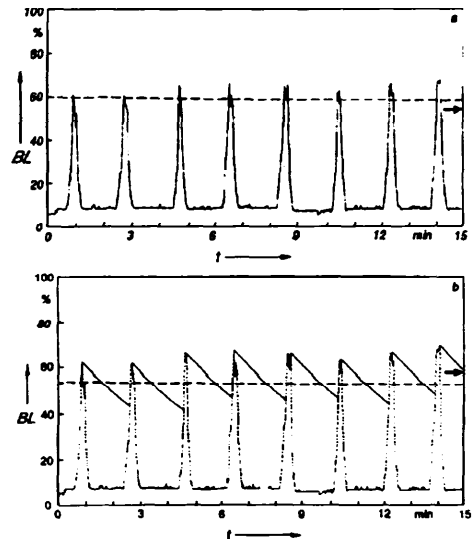


Fig. 15: Vergleich von psychoakustisch gemessenen Immissionsurteilen (Pfeile) mit Prognosen (gestrichelte Geraden) aus Emissionsurteilen (durchgezogene Kurven).

(a) Perzentilwert der Balkenlänge BL_p

(b) Balkenlänge mit exponentieller Abklingfunktion mit 5 Minuten Zeitkonstante BL_e

Die Tragfähigkeit der vorgestellten Konzepte zur Prognose subjektiver Immissionsbeurteilungen aus Emissionsbeurteilungen, d.h. der Prognose von Linienlängen aus (modifizierten) Balkenlängen wurde anhand zahlreicher Szenarien überprüft. Dabei wurden Geräusche von Kraftfahrzeugen, S-Bahnen, KCEs, Götterzügen, Eilzügen, usw. verwendet. In einem Zeitraum von 15 Minuten wurden zwischen vier und fünfzig Schienenfahrzeuge bzw. zwischen 15 und 150 Kraftfahrzeuge dargeboten. Die Ergebnisse sind in Fig. 16 zusammengefasst. Subjektive Beurteilungen von Geräuschimmissionen anhand der Linienlänge sind durch ausgefüllte Kreise dargestellt. Prognosen der Geräuschimmission anhand eines Perzentilwertes der Balkenlänge BL_5 repräsentieren Quadrate. Prognosen des arithmetischen Mittelwertes BL_e der Balkenlänge, die vorher durch Exponentialfunktionen mit 5 Minuten Zeitkonstante modifiziert wurde, zeigen Dreiecke.

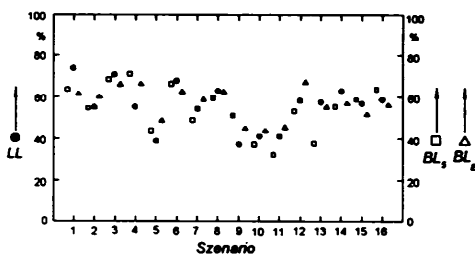


Fig. 16: Prognose von Geräuschimmissionen anhand von Geräuschimmissionen.

Ausgefüllte Kreise: Subjektive Beurteilung.

Unausgefüllte Symbole: Prognose anhand der Balkenlänge BL_5 (Quadrate), bzw. BL_e (Dreiecke).

Ein Vergleich der ausgefüllten und unausgefüllten Symbole in Fig. 16 verdeutlicht, daß bei den verschiedenen Szenarien unausgefüllte Symbole und ausgefüllte Symbole häufig relativ dicht beieinander liegen. Obwohl für den Perzentilwert der Balkenlänge (Quadrate) beispielsweise bei Szenario 4 oder 13 größere Abweichungen auftreten, erscheint es dennoch gerechtfertigt, beide Ansätze weiter zu verfolgen.

Der Autor dankt Studentinnen und Studenten, sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern seiner Arbeitsgruppe für wesentliche Beiträge zur Erforschung der gehörgerechten Geräuschbeurteilung. Herrn Dr. Csallner vom Lehrstuhl für Wasserbau der TU München gilt mein Dank für die Möglichkeit, die Lautstärke von „Wasserfällen“ systematisch zu studieren. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 Gehör, München gefördert.

Literatur:

Barkhausen, H., (1927), Ein neuer Schallpegelmessgerät für die Praxis. VDI - Z. 71, 1471-1474.
 Bisping, R., (1994), Digital generation of acoustical targets for car sound engineering based on psychometrical data. In: Proc. inter-noise '94, Vol. II, 869-874.
 Blauert, J., (1986), Cognitive and aesthetic aspects of noise engineering. Proc. inter-noise '86, Vol. I, 5-14.
 Blauert, J., (Ed.) (1996), Sound Quality. Proc.: EAA-Tutorium, Antworten.
 Brennecke, W., Renners, H., (1983), Physikalische Parameter bei der Bewertung der Lästigkeit von Industriegeräuschen. Acustica 52, 279-289.
 DIN 45 631 Berechnung der Lautheit und des Lautstärkepegels aus dem Geräuschspektrum, Verfahren nach E. Zwicker.
 DIN EN 60 651 Schallpegelmessgerät.
 Ellermeier, W., Mader, M., Daniel, P., (1997), BTL-Skalierung der Unangenehmheit von natürlichen Geräuschen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
 Fastl, H., (1990), Trading number of operations versus loudness of aircraft. In: Proc. inter-noise'90, Vol. II, 1133-1136.
 Fastl, H., (1991a), Beurteilung und Messung der wahrgenommenen äquivalenten Dauerlautheit. Z. für Lärmbekämpfung 38, 98-103.

Fastl, H., (1991b), On the reduction of road traffic noise by "whispering asphalt". In: Proc. Congress Acoust. Soc. of Japan, Nagano, 681-682.
 Fastl, H., (1993a), Psychoacoustics and noise evaluation. In: Contr. to Psychological Acoustics, (A. Schick ed.) Oldenburg: Bibliotheks- und Informationssystem der Carl von Ossietzky Univ., 505-520.
 Fastl, H., (1993b), Loudness evaluation by subjects and by a loudness meter. In: Sensory Research, Multimodal Perspectives, (R.T. Verrillo Ed.) Lawrence Erlbaum Ass., Hillsdale, New Jersey, 199-210.
 Fastl, H., (1997), On the accuracy of loudness analysis systems. In: Proc. inter-noise '97.
 Fastl, H., Humecke, J., (1995), Psychoakustische Experimente zum Fluglärmaltes. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 95, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V., Oldenburg, 407-410.
 Fastl, H., Schmid, W., Kuwano, S., Namba, S., (1996), Untersuchungen zum Schienenbonus in Gebäuden. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 96, Verl.: Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg, 208-209.
 Fastl, H., Widmann, U., Kuwano, S., Namba, S., (1991), Zur Lärminderung durch Geschwindigkeitbeschränkungen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'91, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 449-452.
 Fastl, H., Zwicker, E., Kuwano, S., Namba, S., (1989), Beschreibung von Lärmimmissionen anhand der Lautheit. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'89, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 751-754.
 Gottlob, D., (1994), Regulations for community noise. In: Proc. inter-noise '94, Vol. I, 43-56.
 Gottschling, G., Fastl, H., (1997), Akustische Simulation von 6-Sektionen-Fahrzeugen des Transrapid. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
 Green, D.M. (1993), A theory of community annoyance created by noise exposure. In: Contributions to Psychological Acoustics, (A. Schick ed.), BIS Oldenburg, 459-471.
 Hauck, G., (1991), Lästigkeitsunterschied zwischen den Geräuschen des Straßenverkehrs und des Schienenverkehrs. Z. f. Lärmbekämpfung 38, 162-166.
 Heiß, A., (1997), Online-Bestimmung der Perzentilstreuung von Geräuschimmissionen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
 Hellbrück, J., (1996), Category-subdivision scaling - a powerful tool in audiometry and noise assessment. In: Recent Trends in Hearing Research. (H. Fastl et al. Eds.), BIS Oldenburg, 317-336.
 Hellbrück, J., Zeitler, A., Gold, M., (1997), Subjektive Skalierung der Lautstärke von Verkehrslärm: Vergleich zwischen Messungen unter natürlichen und unter Laborbedingungen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
 ISO 532 B Acoustics - Method for calculating loudness level.
 Kryter, K. (1959), Scaling human reactions to the sound from aircraft. J. Acoust. Soc. Am. 31, 1415-1429.
 Kuwano, S., Fastl, H., (1989), Loudness evaluation of various kinds of non-steady state sound using the method of continuous judgment by category. In: Proc. 13. ICA Belgrade, Vol. 1, 365-368.
 Kuwano, S., Namba, S., (1978), On the loudness of road traffic noise of longer duration (20 min) in relation to instantaneous judgement. J. Acoust. Soc. Am. 64, 127-128.
 Lercher, P., (1992), Transitverkehrs-Studie Universität Innsbruck.
 Mellert, V., Weber, R., (1981), Physikalische Faktoren der Lästigkeit. In: Akustik zwischen Physik und Psychologie (A. Schick Ed.), Klett-Cotta, Stuttgart, 48-62.
 Möhler, U., (1988), Community response to railway noise: a review of social surveys. J. Sound Vib. 120, 321-332.
 Möhler, U., Knall, V., (1984), Lautstärkeunterschied zwischen Schienen- und Straßenverkehrslärm. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '84, DPG-Verlag Bad Honnef, 587-590.
 Namba, S., Kuwano, S., Fastl, H., (1988), Loudness of road traffic noise using the method of continuous judgment by category. In: Noise as a Public Health Problem, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden 1988, 241-246.
 Schick, A., (1979), Schallwirkung aus psychologischer Sicht. Klett-Cotta, Stuttgart.
 Schick, A., (1990), Schallbewertung. Springer.
 Schick, A., Namba, S., Kuwano, S., (1985), Lärm in der Wohnnachbarschaft. Z. f. Lärmbekämpfung 32, 44-50.

- Schuemer, R., Schuemer-Köhls, A., (1991), Lästigkeit von Schienenverkehrs-lärm im Vergleich zu anderen Lärmarten - Überblick über Forschungsergebnisse. *Z. f. Lärmbekämpfung* 38, 1-9.
- Schulte-Fortkamp, B., Weber, R., Ensel, L., Quehl, J., (1997), Evaluation von Belästigung und Störung durch synergetische Geräuscheinwirkungen in Stadtvierteln. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 97*, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
- Stempler, I., (1996), Globale Lautheit von gleichförmigen Industrie-geräuschen. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 96*, Verl.: Dt. Gesellschaft für Akustik e. V., Oldenburg, 240-241.
- Stempler, I., (1997a), Accuracy of loudness percentiles versus measurement time. In: *Proc. inter-noise'97*.
- Stempler, I., (1997b), Beurteilung der Globalen Lautheit bei Kombination von Verkehrsgeräuschen mit simulierten Industrie-geräuschen. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 97*, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
- Stempler, I., Gottschling, G., (1997), Auswirkungen der Bündelung von Verkehrswegen auf die Beurteilung der Globalen Lautheit. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 97*, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
- Stempler, I., Seiter, A., (1995), Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 95*, Verl.: Dt. Gesellschaft für Akustik e. V., Oldenburg, 867-870.
- Stevens, S.S., (1956), Calculation of the loudness of complex noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 807-832.
- Taylor, S.M., (1993), Transportation noise annoyance: studies of the McMaster Research Group. In: *Contributions to Psychological Acoustics*, (A. Schick ed.), BIS Oldenburg, 473-485.
- Terhardt, E., (1984), Wohlklang und Lärm aus psychophysikalischer Sicht. In: *Beiträge zur Bedeutungslehre des Schalls*, (A. Schick und K. Walcher Eds.), P. Lang, Bern, 403-409.
- Weber, R., (1992), The continuous loudness judgement of temporally variable sounds with an „analog“ category procedure. In: *Contributions to Psychological Acoustics V*, (A. Schick et al. Eds.), BIS Oldenburg, 267-294.
- Weber, R., Schulte-Fortkamp, B., Vormann, M., (1997), Laborähnliche Geräuschbeurteilungen in einer interdisziplinären Felduntersuchung über synergetische Geräuscheinwirkungen. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA 97*, Verl.: Deutsche Gesellschaft für Akustik, Oldenburg.
- Widmann, U., (1992a), Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung. Dissertation, TU München.
- Widmann, U., (1992b), Meßtechnische Beurteilung und Umfrageergebnisse bei Straßenverkehrslärm. In: *Fortschritte der Akustik, DAGA92*, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 369-372.
- Zwicker, E., (1960), Ein Verfahren zur Berechnung der Lautstärke. *Acustica* 10, 304-308.
- Zwicker, E., Fastl, H., (1983), A portable loudness-meter based on ISO 532 B. In: *Proc. 11. ICA Paris*, Vol. 8, 135-137.

Weitere Literaturhinweise im Internet: <http://www.mnk.e-technik.tu-muenchen.de/admin/noise.html>