

## ZUR LAUTHEIT UND LÄSTIGKEIT VON FLUGLÄRM

H. Fastl, D. Markus und V. Nitsche\*

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

## 1. Einführung

In der Praxis der Lärmbekämpfung werden als "Lärm" Schalle bezeichnet, die Personen stören oder belästigen. Vor allem im Hinblick auf die Rechtsprechung kommt dem Begriff "Lästigkeit" eine besondere Bedeutung zu. Obwohl auch leise Schalle - beispielsweise wegen ihres "unerfreulichen" Informationsgehalts (Stechmücke) - sehr lästig sein können, nimmt in der Regel mit der wahrgenommenen Lautstärke (Lautheit) von Schallen deren Lästigkeit zu. So konnten für Verkehrslärm (Weber und Mellert 1978) sowie Industrielärm (Straßen 1980, Brannecke und Remmers 1983) bereits hohe Korrelationen zwischen Lautheit und Lästigkeit aufgezeigt werden. Während in diesen Arbeiten die Schalle hinsichtlich der Reihenfolge der Größe ihrer Lautheit bzw. Lästigkeit verglichen wurden (Rangkorrelation), soll im folgenden die relative Beurteilung von Fluglärm anhand der Größenschätzung mit Ankerschall dargestellt werden. Dabei dienen - im Gegensatz zu Messungen von Berglund et al. (1975) - nicht synthetische Schalle (Weißes Rauschen), sondern Fluggeräusche als Ankerschalle. Darüberhinaus wird der Einfluß des Ankerschalls auf die Ergebnisse untersucht. Die in den Hörversuchen gemessenen Daten werden Werten gegenübergestellt, die mit Meßgeräten gewonnen wurden.

## 2. Schalle und Meßmethoden

Die Untersuchungen wurden mit Fluggeräuschen durchgeführt, die von recht unterschiedlichen Flugzeugtypen beim Start vom Flughafen Düsseldorf in Richtung Westen erzeugt werden. Die Fluggeräusche wurden in 3,8 km Entfernung vom Beginn des Startrollens in ca 2m Höhe mit einem in der Fluglärmüberwachung üblichen Kondensatormikrofon gemessen und auf Magnetband aufgezeichnet. Es wurden Flugzeuge mit niedrigem (A,E,G,H) bzw. höherem (B,C,D,F) Bypass-Verhältnis der Triebwerke sowie Flugzeuge mit rauhem (C,D) oder tonalem (E) Klangcharakter ausgewählt. Die Fluggeräusche wurden zu Paaren gruppiert, wobei der erste Schall eines Paares (Ankerschall) in einer Versuchsreihe jeweils konstant gehalten wurde. Der Lautheit des Ankerschalls wurde der Zahlenwert 100 zugeordnet und relativ zu diesem Wert mußten die Versuchspersonen die Lautheit der übrigen Fluggeräusche skalieren. War beispielsweise das Flugzeug B nur 3/4 so laut wie das Flugzeug A (Ankerschall), mußte die Versuchsperson den Zahlenwert 75 angeben. Die Skalierung der Lästigkeit erfolgte auf die gleiche Art und Weise. Jede der acht normalhörenden Versuchspersonen skalierte jedes Flugzeugpaar viermal, wobei die von ein und derselben Versuchsperson angegebenen Zahlenwerte im Mittel um weniger als 10 differierten. Aus den jeweils 32 Meßdaten wurden Zentralwerte und wahrscheinliche Schwankungen abgeleitet und in den Figuren angegeben. Um eventuelle Einflüsse der Wahl des Ankerschalles abschätzen zu können, wurden zwei recht unterschiedliche Fluggeräusche (A bzw. C) als Anker verwendet. In getrennten Sitzungen wurde mit *beiden* Ankerschallen sowohl die Lautheit als auch die Lästigkeit der Fluggeräusche skaliert. Alle Schalle wurden zweiöhrig (diotisch) über einen elektrodynamischen Kopfhörer (Beyer DT48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Zollner (1984, S. 223) dargeboten. Da die Schallpegel der Fluggeräusche zum Teil 100 dB überschritten, wurde der Abhörpegel um 10 dB abgesenkt. Dies gilt auch für die Analyse der Fluggeräusche mit Meßgeräten. Es wurde einerseits der Maximalwert des mit der Zeitkonstante "slow" gemessenen A-bewerteten Schallpegels (DIN 45634), und andererseits der Maximalwert der mit einem Lautheitsmeßgerät nach Zwicker und Fastl (1983) gemessenen Lautheit bestimmt.

\* Flughafen Düsseldorf GmbH

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Lautheit und Lästigkeit

Die Ergebnisse der Beurteilung der Lautheit bzw. der Lästigkeit der Fluggeräusche sind in Fig. 1 für die Flugzeuge A bis H dargestellt. Dreiecke repräsentieren Lautheitsbeurteilungen mit Flugzeug A als Ankerschall, Kreise Lautheitsbeurteilungen mit Flugzeug C als Anker. Die Ergebnisse der Lästigkeitsbeurteilungen sind durch Rhomben (Anker Flugzeug A) bzw. Quadrate (Anker Flugzeug C) dargestellt. Für jede Meßreihe wurden alle Zentralwerte auf den maximalen Zentralwert normiert. Dies bedeutet beispielsweise, daß die durch Kreise repräsentierten Werte aus Lautheits-schätzungen stammen, bei denen das Flugzeug C als Ankerschall diente. Der Lautheit dieses Flugzeugs wurde der Zahlenwert 100 zugeordnet. Relativ zu diesem Wert ordneten die Versuchspersonen der Lautheit des Flugzeugs A im Mittel (Zentralwert) den Zahlenwert 172 zu. Auf diesen Maximalwert wird normiert, so daß in Fig. 1 für das Flugzeug C eine relative Lautheit von  $100/172 = 58\%$  als ausgefüllter Kreis eingetragen ist. Der Kreis ist ausgefüllt, weil in dieser Meßreihe das Flugzeug C als Ankerschall verwendet wurde. Für Fig. 1 gilt allgemein, daß die jeweiligen Ankerschalle durch ausgefüllte Symbole repräsentiert werden. Die durch Linien verbundenen Punkte stellen gemessene Werte der Lautheit nach ISO 532 B dar, die mit einem Lautheitsmeßgerät nach Zwicker und Fastl (1983) gewonnen und ebenfalls auf den Maximalwert normiert wurden.

Die in Fig. 1 dargestellten Ergebnisse machen deutlich, daß (a) sowohl die Lautheitsbeurteilung als auch die Lästigkeitsbeurteilung nur wenig vom jeweils verwendeten Ankerschall abhängen (vgl. Dreiecke mit Kreisen bzw. Rhomben mit Quadraten), und daß (b) für die Lautheit bzw. die Lästigkeit der Fluggeräusche praktisch dieselben Ergebnisse gefunden werden. Wird Flugzeug A als Ankerschall verwendet, so unterscheidet sich die Lautheits- von der Lästigkeitsbeurteilung (Zentralwerte) im Mittel um nur 3,3%, für Flugzeug C als Anker sogar nur um 2,1%. Die Rauhigkeit der Geräusche der Flugzeuge C und D sowie die Tonhaltigkeit des Geräusches des Flugzeugs E vergrößern die Lästigkeit dieser Fluggeräusche im Vergleich zur Lautheit nicht. Entgegen der Erwartung liegen die Lästigkeitsurteile (Rhomben und Quadrate) teilweise sogar *unterhalb* der Lautheitsurteile (Dreiecke und Kreise); allerdings überlappen die wahrscheinlichen Schwankungen recht deutlich, so daß auch in diesen Fällen kein signifikanter Unterschied zwischen der Lautheit und der Lästigkeit der Fluggeräusche besteht. Die mit dem Lautheitsmeßgerät nach Zwicker und Fastl (1983) elektronisch gemessene Lautheit beschreibt sowohl die Lautheit als auch die Lästigkeit des Fluglärms ausgezeichnet.

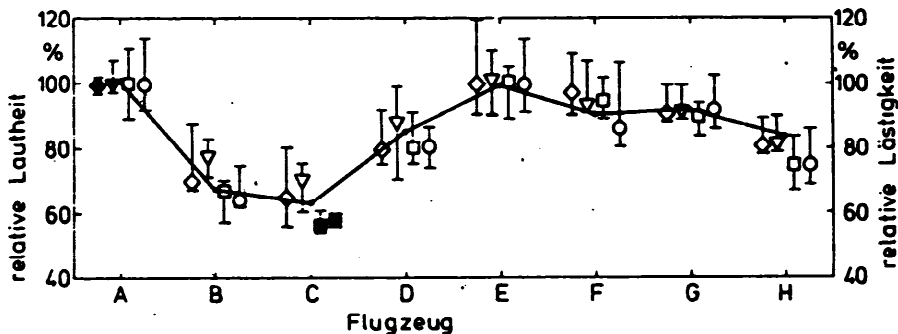


Fig. 1: Relative Lautheit bzw. Lästigkeit der Flugzeuge A bis H. Lautheitsbeurteilung: Dreiecke (Anker A) und Kreise (Anker C); Lästigkeitsbeurteilung: Rhomben (Anker A) und Quadrate (Anker C). Kurvenzug: Nach ISO 532 B elektronisch gemessene Lautheit.

### 3.2 Beurteilung durch Personen und Meßgeräte

Da sich zwischen der Lautheit und der Lästigkeit der Fluggeräusche praktisch keine Unterschiede ergeben haben, erscheint es gerechtfertigt, sämtliche subjektiven Beurteilungen zu globalen Zentralwerten zusammenzufassen. Diese subjektiven Bewertungen werden im folgenden den Bewertungen des Fluglärms durch Meßgeräte gegenübergestellt. Dabei wird einerseits der Maximalwert des mit der Zeitkonstante "slow" gemessenen A-bewerteten Schallpegels und andererseits der Maximalwert der Lautheit nach ISO 532 B betrachtet. In Fig.2 ist durch ausgefüllte Kreise die Bewertung der Geräusche der Flugzeuge A bis H durch Personen dargestellt. Die Kurvenzüge repräsentieren verschiedene physikalisch gemessene Bewertungen des Fluglärms. Die gestrichelte Kurve zeigt die Ergebnisse für eine Leistungsgröße, nämlich die aus dem Schallpegel berechnete Schallintensität. Die strichpunktierte Kurve repräsentiert eine lineare Größe, den zugehörigen Schalldruck, während die durchgezogene Kurve für die gemessene Lautheit gilt.

Die in Fig.2 dargestellten Ergebnisse zeigen eindeutig, daß die Bewertung von Fluglärm durch Personen ausschließlich mit einem Lautheitsmeßgerät zutreffend nachvollzogen werden kann. Im Mittel betragen die Abweichungen lediglich 3 %, so daß die Bewertung von Fluglärm anhand der Lautheit ausgezeichnet möglich ist. Dies gilt übrigens auch für andere Lärmarten (Fastl 1981, Zwicker und Fastl 1982, 1983). Obwohl die Schall-Leistung in den Normen beispielsweise für Maschinenlärm (DIN 45635) eine wesentliche Rolle spielt, zeigt Fig.2 für eine Leistungsgröße, die Schallintensität (gestrichelt), extrem große Abweichungen zur Bewertung durch Personen; im Mittel betragen die Unterschiede immerhin 41 %. Auch der Schalldruck kann die Bewertung von Fluglärm durch Personen nicht nachvollziehen.

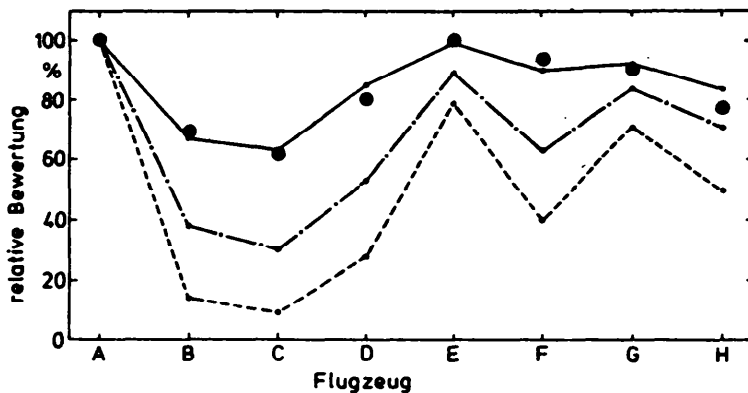


Fig.2: Relative Bewertung von Fluglärm durch Personen und Meßgeräte. Ausgefüllte Kreise: Beurteilung durch Versuchspersonen; Kurvenzüge: Beurteilung durch Meßgeräte; Lautheit durchgezogen, Schalldruck strichpunktiert, Schallintensität gestrichelt.

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Bei Geräuschen von startenden Flugzeugen recht unterschiedlichen Typs besteht praktisch kein Unterschied zwischen der Lautheit und der Lästigkeit des Fluglärms. Rauigkeit oder Tonhaltigkeit dieser Fluggeräusche vergrößert deren Lästigkeit im Vergleich zur Lautheit nicht. Die Bewertung der Lautheit oder Lästigkeit von Fluglärm durch Personen kann durch Messung der Lautheit zutreffend nachvollzogen werden.

In zahlreichen Lärmstudien ist zu lesen, daß die Lautheitsskala die Lärmbeurteilung durch Personen auch nicht besser nachbilde als beispielsweise der A-bewertete Schallpegel oder äquivalente Dauerschallpegel. Solange man sich nur für die Reihenfolge der Geräusche interessiert (das lauteste den größten Zahlenwert) ist dies häufig richtig, obwohl es fatale Ausnahmen geben kann, wie Zwicker (1980) für den Lärm von Kleinkrafträdern zeigen konnte. Für die hier untersuchten Fluggeräusche ergibt sich beim Vergleich der Beurteilung durch Personen bzw. Meßgeräte ein Rangkorrelationskoeffizient von einerseits  $r_s = 0,869$  für den A-bewerteten Schallpegel, den Schalldruck und die Schallintensität und andererseits von  $r_s = 0,964$  für die gemessene Lautheit. Dies bedeutet, daß *alle* objektiven Meßverfahren die Einordnung der Flugzeuggeräusche in eine Reihenfolge von laut/lästig nach weniger laut/lästig im wesentlichen so durchführen, wie dies auch von Personen vorgenommen wird. Die zutreffende relative Bewertung (*wieviel* lauter/lästiger ist Flugzeug A als Flugzeug C) leistet allerdings einzig und allein die Lautheitsskala. Darüber hinaus ist ein Vergleich von Meßwerten, die mit einem Schallpegelmessers bzw. einem Lautheitsmesser ermittelt wurden aufschlußreich (Nitsche und Fastl 1985). Derzeit können zur Lautheitsberechnung Programme in FORTRAN (Paulus und Zwicker 1972) und in BASIC (Zwicker, Fastl und Dallmayr 1984) eingesetzt werden. Auf längere Sicht wäre auch beim Fluglärm der Einsatz von Lautheits-Meßgeräten nach Zwicker anzustreben.

### Literatur

- Berglund, B., Berglund, U. and Lindvall, Th.(1975). Scaling loudness, noisiness, and annoyance of aircraft noise. *J.Acoust.Soc.Am.* 57, 930-934.
- Brennecke, W. und Remmers, H.(1983). Physikalische Parameter bei der Bewertung der Lästigkeit von Industriegeräuschen. *Acustica* 52, 279-289.
- DIN 45634. Schallpegelmessers und Impulsschallpegelmessers.
- DIN 45635. Geräuschmessung an Maschinen.
- Fastl, H.(1981). Methodenvergleich zur Lautheitsbeurteilung: In: Akustik zwischen Physik und Psychologie. (A.Schick, Ed.), Klett-Cotta, Stuttgart, 103-109.
- ISO 532 B. Acoustics-Method for calculating the loudness of a complex sound that has been analyzed in terms of one-third octave bands.
- Nitsche, V. and Fastl, H.(1985). Objective measurements of aircraft noise by sound level meter versus loudness meter. *Internoise'85*, München.
- Paulus, E. und Zwicker, E.(1972). Programme zur automatischen Bestimmung der Lautheit aus Terzpegeln oder Frequenzgruppenpegeln. *Acustica* 27, 253-266.
- Straßen, Th.(1980). Untersuchungen zur subjektiven Lästigkeit von Lärm und ihre Erfassung durch physikalische Geräuschkennwerte. *DAGA'80*, 611-614.
- Weber, R. und Mallert, V.(1978). Vergleichende Beurteilung von Verkehrsrgeräuschen - Korrelation mit Lautstärkeparametern. *DAGA'78*, 271-274.
- Zwicker, E.(1980). Weniger  $L_A$  = Größere Lautstärke? In: Fortschritte der Akustik, *DAGA'80*, VDE-Verlag, Berlin, 159-162.
- Zwicker, E. und Fastl, H.(1982). Kontrolle von Lärminderungsmaßnahmen mit dem Lautheitsmesser. In: Fortschritte der Akustik, *FASE/DAGA'82*, Verl. Hubert&Co., Göttingen, 1219-1222.
- Zwicker, E. und Fastl, H.(1983). A portable loudness-meter based on ISO 532 B. Proc. 11. ICA Paris, Vol. 8, 135-137.
- Zwicker, E. und Zollner, M.(1984). *Elektroakustik*, Hochschultext, Springer, Berlin.
- Zwicker, E., Fastl, H. and Dallmayr, Ch.(1984). Basic-Program for calculating the loudness of sounds from their 1/3-oct band spectra according to ISO 532 B. *Acustica* 55, 63-67.