

Analyse von Flugzeuggeräuschen

Rudolf Bisping

SASS acoustic research & design GmbH; Email: rudolf.bisping@sass-acoustics.com

Einleitung

Aufgabenstellung des Teilprojekts *Target Sound Design* im Rahmen des EU-Projekts SEFA (Sound Engineering for Aircraft; Koordinator: Dornier GmbH, Friedrichshafen) ist die akustische Optimierung von Flugzeuggeräuschen, um daraus Zielorientierungen für künftige technische Maßnahmen ableiten zu können. Die vorliegende Untersuchung soll den methodischen Weg demonstrieren, der zur Gewinnung von Zielgeräuschen eingeschlagen wird. Als Ausgangsmaterial dienen die akustischen Messungen einer repräsentativen Stichprobe von Start- und Landevorgängen. Um eine Basis für die Klassifikation der gemessenen Geräusche zu finden, werden sie von einer Probandenstichprobe nach unterschiedlichen psychometrischen Kriterien beurteilt und mit ausgewählten akustischen Meßgrößen analysiert. Ausgehend von diesen Klassifikationen sollen in nachfolgenden Arbeitsschritten Zielgeräusche erstellt werden, bei denen bestimmte Phänomene, z.B. Turbinenpfeifen oder Geräuschanteile, die von den Rotoren abgestrahlt werden, optimiert werden.

Methode

Messungen

Die akustische Messung einer repräsentativen Stichprobe von Starts und Landungen wurde über drei Tage am Flughafen München an zwei Meßpunkten durchgeführt. Meßpunkt 1 befand sich 2,7 km östlich der nördlichen und Meßpunkt 2 befand sich 4,6 km östlich der südlichen Bahn. Verwendet wurde das binaurale Meßsystem SASS-KBM2. Zusätzlich wurde für akustische Distanzmessungen ein Array von Bodenmikrofonen eingesetzt. Jedes Flugzeug wurde mit einem bewegungsstabilisierten 200 mm Teleobjektiv fotografiert, um fotogrammetrische Bestimmungen der Flughöhe beim Überflug vornehmen zu können.

Tonmaterial

Für die experimentelle Darbietung wurden 33 Start- bzw. Landegeräusche, die von 18 verschiedenen Flugzeugen stammten, ausgewählt. Jedes Einzelgeräusch wurde 2 x nacheinander präsentiert. Die Dauer eines Einzelgeräuschs betrug 40 Sekunden, jede Sequenz von 2 Einzelgeräuschen dauerte entsprechend $2 \times 40 = 80$ Sekunden. Nach jeder Sequenz folgte eine Pause von 20 Sekunden, um den Probanden Zeit zu geben, die Beurteilung des momentanen Geräuschs, die während der Darbietung stattfand, abzuschließen. Für das Vortraining der Probanden wurden zehn synthetische Geräusche verwendet, die unterschiedliche Polaritäten repräsentierten (z.B. laut – leise, dynamisch – undynamisch, hoch – tief, etc.).

Skalierung

Die Beurteilung erfolgte mit Hilfe eines Polaritätsprofils mit 31 Polaritäten.

Versuchsdurchführung

Am Versuch nahmen 18 Probanden in Gruppen von 3-4 Personen / Sitzung teil (10 männlich, 8 weiblich; Alter: 18 – 54 Jahre). Die Geräusche wurden mit ihrem Originalpegel stereophon per Lautsprecher dargeboten (Genelec 1030A; Genelec Subwoofer 7070A). Die Geräuschabfolge war randomisiert. Jedes Geräusch wurde angesagt („Es folgt Geräusch Nr...“). Die raumakustischen Bedingungen entsprachen ITU-R BS1116-1 [1].

Auswertung

Zur Datenreduktion und Bestimmung der Beurteilungsdimensionen der Probanden wurden die Daten faktorenanalysiert (PCA, Varimax-Rotation). Jede Korrelation der Korrelationsmatrix beruhte auf 33 (Geräuschen) \times 18 (Probanden) = 594 Datenpaaren. Zur Gewinnung der Daten für die nachfolgende Varianzanalyse wurde folgendermaßen vorgegangen: von der ursprünglichen Liste der 18 Flugzeuge wurden diejenigen 13 Flugzeuge ausgewählt, für die sowohl ein Start- als auch ein Landegeräusch vorlag. Von der Liste der Polaritäten wurden ausgehend von der Faktorenanalyse nur diejenigen verwendet, die auf einem der extrahierten Faktoren mindestens eine Ladung > 0.6 aufwiesen. Diejenigen Polaritäten, die auf Grund ihrer Ladung zu einem der Faktoren gehörten, wurden zusammengefaßt. Für sie wurde dann ein gemeinsamer Mittelwert berechnet. Dadurch wurde ein reduzierter Satz neuer Skalen berechnet, die jeweils einen der extrahierten Faktoren repräsentierten. Die Auswertung erfolgte mit SPSS V.11.

Ergebnisse

Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse ergab vier Faktoren, die insgesamt 52,5 % der Varianz aufklärten. Faktor 1 (Akzeptanz; Varianzanteil: 27 %) ist korreliert mit Attributen wie unangenehm – angenehm (0,86), aggressiv – friedlich (0,64), unharmonisch – harmonisch (0,68), laut – leise (0,6), lästig – nicht lästig (0,81), akzeptabel – nicht akzeptabel (0,81). Faktor 2 (Dynamik; Varianzanteil: 10,5 %) ist korreliert mit lahm – lebhaft (0,83), langsam – schnell (0,71), passiv – aktiv (0,73), schwach – stark (0,71), langweilig – aufregend (0,74), undynamisch – dynamisch (0,68). Faktor 3 (Tonhöhe; Varianzanteil: 8,4 %) hängt zusammen mit dunkel – hell (0,85), tiefrequent – hochfrequent (0,9), dumpf – scharf (0,79). Faktor 4 (Impulshaltigkeit, Varianzanteil:

6,6 %) steht im Zusammenhang mit monoton – nicht monoton (0,79), gleichförmig – impulsartig (0,83), regelmäßig – unregelmäßig (0,86). Durch Mittelung wurden aus den faktoriell einander zugehörigen Attributen für die Varianzanalyse vier neue Skalen gebildet: Akzeptanz, Dynamik, Tonhöhe und Impulshaltigkeit (s.o. **Auswertung**).

Varianzanalyse

Die vier Skalen wurden mittels ANOVA mit Meßwiederholung auf dem Flugzeug- und dem Flugbedingungsfaktor (Start, Landungen) ausgewertet. Tabelle 1 zeigt die Haupteffekte für die Flugzeuge, die Flugbedingungen und die Wechselwirkung Flugzeug x Flugbedingung. Abbildung 1 – 2 zeigt die Mittelwerte und Standardfehler für Akzeptanz, Dynamik und Tonhöhe.

Variable	Exp. Bedingung	F	p
Akzeptanz	Flugzeug	27,4	< 0.001
	Flugbedingung	0,1	n.s.
	Flugz. x Flugbed.	16,4	< 0.001
Dynamik	Flugzeug	22,2	< 0.001
	Flugbedingung	0,04	n.s.
	Flugz. x Flugbed.	9,4	< 0.001
Tonhöhe	Flugzeug	5,4	< 0.001
	Flugbedingung	53,3	< 0.001
	Flugz. x Flugbed.	10,7	< 0.001
Impuls- haftigkeit	Flugzeug	2,5	= 0.004
	Flugbedingung	2,5	n.s.
	Flugz. x Flugbed.	2,8	= 0.001

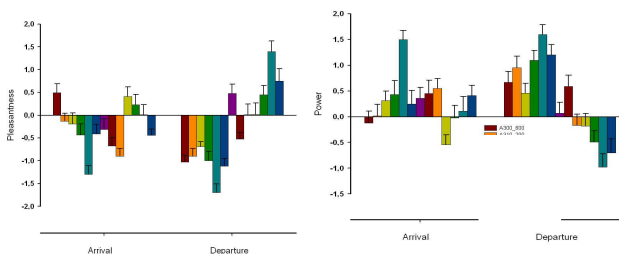


Abbildung 1: Mittelwerte und Std.-Fehler der Skala *Akzeptanz* (links) und *Dynamik* (rechts) für Landung und Start

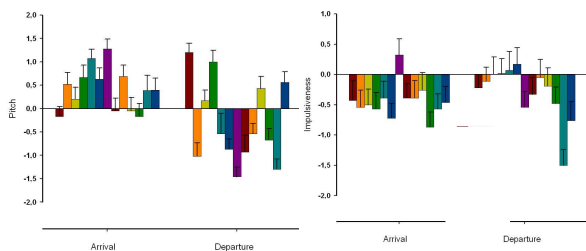


Abbildung 2: Mittelwerte und Std.-Fehler der Skala *Tonhöhe* (links) und *Impulshaltigkeit* (rechts) für Landung und Start

Akustische Analysen

Folgende akustische Maße wurden mittels SASSWin V.1.96 berechnet: Pegel (L_{Aeq} , L_{eq}), Lautheit (ISO532B), Rauigkeit, Modulationsindex. Für jedes Maß wurden drei unterschiedliche Statistiken berechnet: Mittelwert, maximaler Wert, linearer Anstieg (Anstieg der linearen Regression des zeitlichen Verlaufs vom Punkt der eben merklichen Hörbarkeit des Flugzeugs bis zu Maximum). Mittels schrittweiser Regression wurden diejenigen Kombinationen akustischer Maße bestimmt, die die psychometrischen Skalenwerte am besten vorhersagen. Abbildung 3 zeigt die Regressionsgeraden und zugehörige Korrelationskoeffizienten für die Akzeptanz und die Dynamik. Bei der Akzeptanz ergab die Regressionsanalyse eine Korrelation von $r = -0,87$ ($r^2 = 0,76$) mit einer Kombination des L_{Aeq} und dem mittleren Modulationsindex. Bei der Dynamik ergab sich nur der L_{Aeq} als Prädiktor ($r = 0,88$, $r^2 = 0,78$). Bei der Schärfe erwies sich mit einer Korrelation von $r = 0,71$ ($r^2 = 0,51$) die Kombination der mittleren Schärfe, der mittleren Lautheit und des L_{max} als bester Prädiktor. Bei der Impulshaltigkeit ergab sich eine Korrelation von $r = 0,72$ ($r^2 = 0,52$) mit der Kombination der mittleren Rauigkeit, der mittleren Lautheit und der maximalen Lautheit).

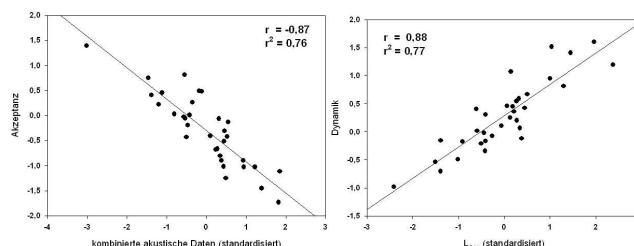


Abbildung 3: Korrelation der Skala *Akzeptanz* (links) und *Dynamik* (rechts) mit akustischen Maßen

Schlußfolgerung

Die Varianzanalyse ergab bei allen psychometrischen Skalen signifikante Unterschiede zwischen den Flugzeugen. Bei den Flugbedingungen zeigten sich nur bei der Tonhöhe signifikante Unterschiede. Die schrittweise Regressionsanalyse ergab, daß die drei Skalen, die für die Zielgeräuschdefinition bedeutsam sind (Akzeptanz, Dynamik, Tonhöhe), mit bestimmten akustischen Maßen bzw. deren Kombinationen eng korreliert sind. Sie zeigt insbesondere, daß es bei der Optimierung der Geräuschakzeptanz offenbar nicht nur auf eine Pegelreduktion ankommt (was naheliegt), sondern auch auf eine Verbesserung des Modulationsgrads bzw. der Rauigkeit. Bei der Optimierung der Tonhöhe kommt es offenbar neben einer Pegelreduktion auch auf eine Verminderung spektraler Merkmale an, die die Schärfe bestimmen.

Literatur

[1] ITU-R BS 1116. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems (1997). Genf: International Telecommunication Union.