

# **Humanspezifische Wirkungen von Nachtfluglärm – neue Ergebnisse umfangreicher Labor- und Feldstudien im Rahmen des Projektes "Leiser Flugverkehr"**

*Mathias Basner und Alexander Samel*

*DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, 51170 Köln, [mathias.basner@dlr.de](mailto:mathias.basner@dlr.de)*

## Studienziele

Die weltweit größte Studie zur elektrophysiologischen Untersuchung der Wirkung von Nachtfluglärm auf den menschlichen Schlaf wurde nach fünf Jahren intensiver Forschung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) abgeschlossen.

Das DLR will mit der Studie zur Versachlichung der teilweise hoch emotional geführten Diskussionen beitragen.

Das Hauptarbeitspaket „Fluglärmwirkungen“ steht am Ende der Kette „Lärmentstehung an der Quelle (Flugzeug): Schallemission“ – „Schallausbreitung“ – „Schallimmission“ – „Schallwirkung auf den Menschen“.

In diesem Arbeitspaket wurden die Wirkungen von Nachtfluglärm auf den Schlaf des Menschen an einem großen Versuchspersonenkollektiv untersucht und Kriterien für eine Bewertung dieser Wirkungen entwickelt.

Ausführliche Informationen zu Design und Ergebnissen der Studie sind in verschiedenen Forschungsberichten zu finden, die im Internet als PDF-Dokumente unter folgender Adresse veröffentlicht werden: [www.dlr.de/flugphysiologie](http://www.dlr.de/flugphysiologie)

Die Zielsetzung des Arbeitspakets innerhalb des DLR-Projekts war die wissenschaftlich fundierte Definition von Nachtfluglärmkriterien.

Die Motivation für die Durchführung ergibt sich aus mehreren Aspekten:

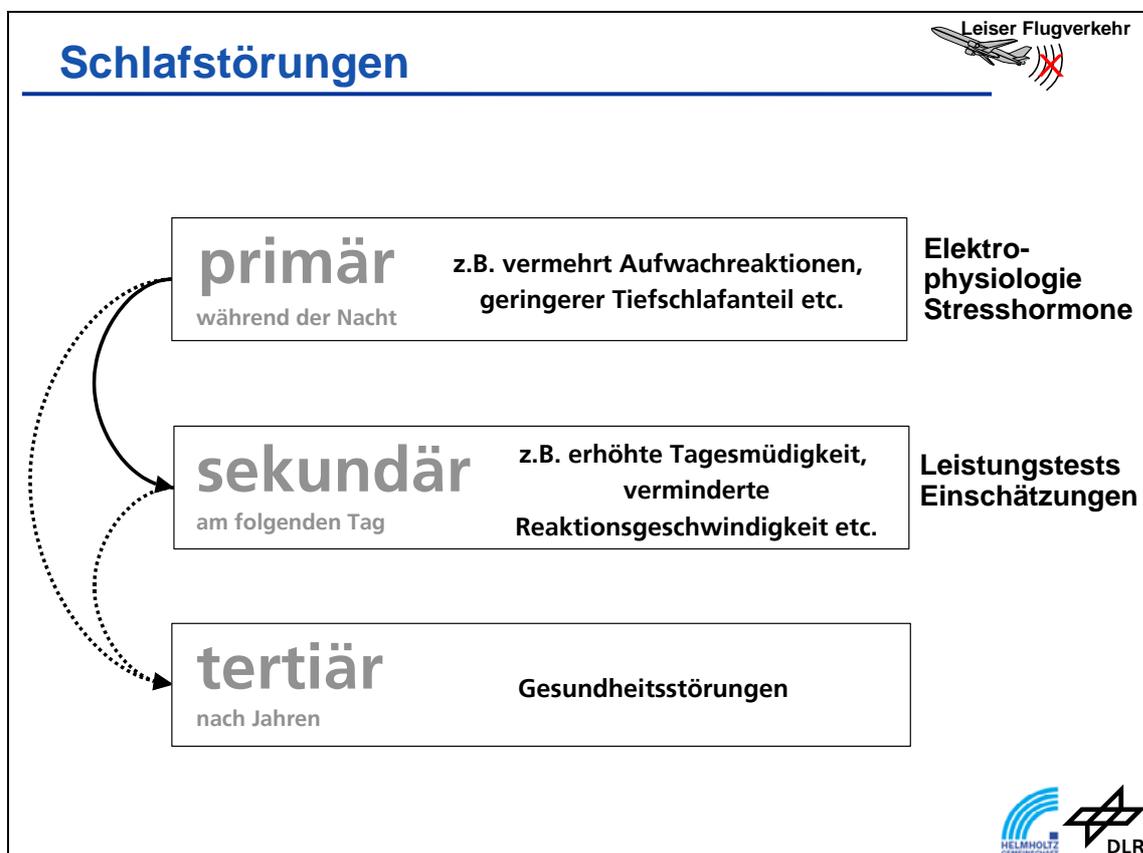
- die wachsende Mobilität von Menschen und Waren. Sie wird zu einem weiteren Anstieg von Flugbewegungen in den nächsten Jahren führen; insbesondere Tagesrand- und Nachtzeiten könnten auf Grund der Auslastung am Tage davon betroffen werden,
- die Betroffenheit der Flughafen-Anwohner, die sich durch den wachsenden Flugverkehr belastet und belästigt fühlen,
- die geplante Novellierung des Fluglärmschutzgesetzes, welche schon seit Jahren diskutiert wird,
- sowie insbesondere fehlende Primärstudien. Die Basis für wissenschaftliche Kriterien und Bewertungen ist in Bezug auf akute physiologische Reaktion sehr schmal und hat

das DLR veranlasst, im Rahmen dieses Projekts für eine erhebliche Verbreiterung der Datenbasis zu sorgen.

192 Probanden wurden in insgesamt 2240 Probandennächten untersucht, davon 128 Personen in vier Laborstudien im Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin und 64 Versuchspersonen in fluglärmbelasteten Gebieten im Bereich des Köln-Bonner Flughafens.

### Fluglärmbedingte Schlafstörungen

Fluglärm kann zu Störungen unmittelbar in der Nacht (primäre Schlafstörungen, z.B. Aufwachreaktionen) und am folgenden Tag (sekundäre Schlafstörungen, z.B. erhöhte Tagesmüdigkeit) führen. Gesundheitsstörungen aufgrund langfristiger Verkehrslärmexposition (tertiäre Schlafstörungen, z.B. erhöhtes Herzinfarkttrisiko) werden kontrovers diskutiert (s. Abbildung 1).



**Abbildung 1: Einteilung lärmbedingter Schlafstörungen.**

In der vorliegenden Studie wurden nur akute, d.h. primäre und sekundäre Schlafstörungen, untersucht. Aus diesem Grund können nur indirekte Aussagen über langfristige Gesundheitsstörungen in dem Sinne gemacht werden, dass mit fluglärmbedingten langfristigen Gesundheitsstörungen dann mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu rechnen ist, wenn fluglärminduzierte primäre und sekundäre Schlafstörungen verhindert bzw. stark eingeschränkt werden.

Folgende Ursachen erschweren den Nachweis eines kausalen Zusammenhangs zwischen Verkehrslärm und langfristigen Gesundheitsstörungen, der in erster Linie in epidemiologischen Studien untersucht werden kann:

- Sehr lange Induktionszeiten bis zum Auftreten der untersuchten Erkrankung (z.B. Herzinfarkt).
- Wechselnde Expositionen (Lärmdosis) über lange Zeiträume können nur ungenau erfasst werden, was zu möglichen Fehlklassifizierungen führt.
- Viele weitere Risikofaktoren führen zu den untersuchten Krankheitsbildern. Sind diese mit der Exposition assoziiert, handelt es sich um sogenannte Confounder, die sorgfältig kontrolliert werden müssen, um Verzerrungen (Bias) zu vermeiden.
- Die erwarteten Effekte sind relativ gering und können deshalb nur mit sehr großen Stichproben ermittelt werden.

Epidemiologische Studien und Untersuchungen zu akuten Wirkungen des nächtlichen Fluglärms sind keine konkurrierenden Studienformen. Sie ergänzen sich sogar in dem Sinne, dass die Stärken der einen Studienform die Schwächen der anderen sind und umgekehrt.

#### Studiendesign und -ablauf

Die fünfjährige DLR-Untersuchung bestand aus vier Studien im DLR-eigenen Schlaflabor in Köln und aus zwei Feldstudien, bei denen die Probanden in ihren eigenen vier Wänden in den fluglärmbelasteten Gebieten des Kölner Flughafens untersucht wurden.

Die Laboruntersuchungen bei 128 Personen wurden im DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln in jeweils 13 aufeinander folgenden Nächten durchgeführt. Die Laborstudien fanden im Doppelblindversuch statt, da weder Probanden noch die anwesenden DLR-Wissenschaftler in den jeweils 13 Untersuchungs Nächten wussten, welche Fluggeräusche für welche Probanden eingespielt wurden.

Die Feldstudien wurden über jeweils neun Nächte bei 64 Personen zu Hause durchgeführt, die in den deutschlandweit mit am höchsten durch Nachtfluglärm belasteten Gebieten rund um den Köln-Bonner Flughafen wohnen.

In den Labor- und Feldstudien wurden identische akustische, physiologische und psychologische Methoden angewendet. Dadurch wurde ein direkter Vergleich der Ergebnisse ermöglicht.

Für die Studie wurden als Versuchspersonen insgesamt 192 Freiwillige ausgesucht, die zwischen 18 und 65 Jahre alt waren, ihrem Alter entsprechend schlafgesund waren und sich eher durch Lärm und/oder Fluglärm belästigt fühlten.

In den insgesamt 2.240 vom DLR untersuchten Nächten wurden im Labor über 30.000 Lärmereignisse eingespielt, im Feld mehr als 15.000 Fluggeräusche gemessen. Diese konnten zu den aufgezeichneten elektrophysiologischen Körperreaktionen der schlafenden Probanden in direkte Beziehung gesetzt werden.

### Untersuchungsmethoden

Der Schlaf der Versuchspersonen wurde durch klassische, in der Schlafforschung und Schlafmedizin etablierte Methoden gemessen. Dazu gehört die Erfassung der Gehirnströme (Elektroenzephalogramm EEG), der Augenbewegungen (Elektrookulogramm EOG) und der Muskelanspannung (Elektromyogramm EMG). Diese Signale erlauben es, Aussagen über Schlafdauer, Schlafqualität (wie Tiefschlaf, Leichtschlaf und Traumschlaf) und Schlafstörungen (wie Aufwachreaktionen, Wechsel der Schlafstadien und Wachzeiten im Schlaf) zu machen.

Die Aktometrie (d.h. die Erfassung von Bewegungen z.B. am Unterarm) wurde und wird in vielen Untersuchungen benutzt, um über Bewegungen im Schlaf auf Schlafdauer und Schlafqualität Schlüsse ziehen zu können. Sie kann allerdings die klassische Polysomnografie (EEG, EOG, EMG) nicht ersetzen, mit der detaillierte Reaktionen diagnostiziert und bewertet werden können.

Die Fingerpulsamplitude und das Elektrokardiogramm (EKG) wurden zur Erfassung von vegetativen Veränderungen (Reaktionen) genutzt, die möglicherweise schon vor einer im Hirnstrombild sichtbaren Veränderung eintreten könnten.

Atembewegung und Luftstrom an Mund und Nase wurden gemessen, um beim Probanden eventuell nicht bekannte schlafbezogenen Atmungsstörungen zu detektieren.

Die Stresshormone Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol wurden aus dem nächtlichen Sammelurin bestimmt, um mögliche Veränderungen der Ausscheidungsraten infolge der nächtlichen Fluglärmbelastung diagnostizieren zu können.

Befragungen zur Ermüdung, Befindlichkeit und zur Lärmbelastung und Lärmbelästigung wurden regelmäßig abends und morgens erhoben, um eventuell durch verkürzten oder schlechteren Schlaf verursachte Beeinträchtigungen belegen zu können.

Computergestützte Leistungstests am Abend und Morgen wurden von den Probanden durchgeführt, um auch hier Beeinträchtigungen durch Schlafstörungen ermitteln zu können. Diese Tests beruhen auf einer Standardisierung, die durch die AGARD vorgenommen wurde und sich auf die Hand-Auge-Koordination („unstable tracking task“), die Merkfähigkeit und die Reaktionsgeschwindigkeit beziehen. Diese Tests wurden durch die Probanden vor der eigentlichen Versuchsreihe in 40 Trainingssitzungen intensiv geübt, damit Lerneffekte die Versuchsergebnisse nicht beeinflussten.

## Akustik

Die im Schlaflabor applizierten Geräusche wurden mit Klasse-1-Schallpegelmessern bei Flughafenwohnern des Flughafens Düsseldorf aufgezeichnet. Die Aufnahme verschiedener startender und landender Flugzeuge wurde in den Schlafzimmern vorgenommen. Dabei wurde das Mikrophon in der Nähe des Kopfkissens (sozusagen am Ohr des Schläfers) aufgestellt. Bei den Aufzeichnungen wurden zwei Fensterstellungen (geschlossen und gekippt) ausgewählt. Diese Randbedingungen wurden gewählt, um realistische Geräuschemuster, so wie sie im Bett vom Schlafenden erlebt werden, zu erzielen, da sich Außengeräusche durchaus erheblich von den im Inneren eines Hauses ankommenden Geräuschen unterscheiden. Insbesondere das Dämpfungsverhalten (stärkere Dämpfung von hohen Frequenzen, geringere Dämpfung von niedrigen Frequenzen) wurde dadurch berücksichtigt.

Jeder Schlafrum im Schlaflabor wurde vor Studienbeginn einzeln mit geeichten Schallpegelmessern akustisch vermessen. Auf diese Weise wurde garantiert, dass das aufgezeichnete und das wieder eingespielte Geräusch sich nicht unterschieden.

Zur Kontrolle der korrekten Wiedergabe wurde das Geräusch im Schlafrum während des Versuchs gleichzeitig mit den elektrophysiologischen Signalen aufgezeichnet. Die Ausgabe eines Triggersignals ermöglichte die ereigniskorrelierte Auswertung von akustischen und elektrophysiologischen Signalen mit einer Auflösung von 125 Millisekunden, d.h. jeder elektrophysiologisch detektierten Reaktion im Schlaf (Aufwachreaktion, Schlafstadienwechsel, vegetatives Arousal, Drehen im Bett) konnte zugeordnet werden, ob sie durch ein Lärmereignis hervorgerufen wurde oder spontan (d.h. ohne erkennbare äußere Einwirkung) entstand.

## Ablauf Laborstudie

Die Laboruntersuchungen bei 128 Personen fanden im DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln in jeweils 13 aufeinander folgenden Nächten statt. In der ersten Nacht wurden die Probanden mit den Messmethoden vertraut gemacht, d.h. sie schliefen ohne Lärmeinwirkung, aber mit den angelegten Elektroden. Die zweite Labornacht war ebenfalls lärmfrei; sie diente als Basisnacht zum Vergleich mit den folgenden neun Nächten, in denen Fluggeräusche in unterschiedlicher Häufigkeit (4 bis 128 mal pro Nacht) und Lautstärke (Maximalpegel zwischen 45 dB(A) und 80 dB(A) am Ohr des Schläfers) eingespielt wurden. Dieses entsprach bei einem Hintergrundpegel von 30 dB(A) einem energieäquivalenten Dauerschallpegel (Mittelungspegel) zwischen 30 dB(A) und 54,5 dB(A) während einer acht Stunden dauernden Nacht. Die zwei abschließenden Nächte waren erneut lärmfrei und dienten zur Beobachtung eventuell auftretender Erholungseffekte auf

Grund der Fluglärmbelastung in den vorangegangenen neun Lärmnächten. Die Bettruhezeit in allen Nächten wurde auf acht Stunden (23:00 Uhr bis 7:00 Uhr) festgelegt.

16 Probanden dienten als Kontrollgruppe, d.h. sie schliefen in 13 aufeinander folgenden Nächten im Labor, ohne mit Lärm beschallt zu werden.

#### Ablauf Feldstudie

Die Feldstudien wurden zwischen September 2001 und November 2002 über jeweils neun Nächte bei 64 Personen zu Hause durchgeführt, die in den deutschlandweit mit am höchsten durch Nachtfluglärm belasteten Gebieten rund um den Köln-Bonner Flughafen wohnten. Die Zahl der untersuchten Nächte wurde auf neun festgelegt, weil durch äußere Bedingungen die An- und Abflüge über Tages- und Nachtzeiten variieren, und durch eine Untersuchung mehrerer Nächte diese Variationen und ihre Wirkung mit erfasst werden konnten.

Während der Untersuchungen bei den Versuchspersonen zu Hause wurden alle Geräusche sowohl in zwei Meter Abstand vor dem Fenster als auch im Schlafzimmer am Ohr des Schläfers parallel und gleichzeitig mit den elektrophysiologischen Daten aufgezeichnet, um auch hier eine ereigniskorrelierte Auswertung vornehmen zu können. Die Schlafzeiten waren im Feld weniger strikt vorgegeben als im Labor; die Probanden sollten allerdings mindestens zwischen Mitternacht und morgens um 6 Uhr Bettruhe halten.

In den Feldstudien wurde der Schalldruckpegel außen und im Schlafrum kontinuierlich aufgezeichnet. Das Außenmikrophon befand sich üblicherweise in 2 m Abstand vor dem Schlafzimmerfenster, zwei Innenmikrophone waren am Kopfende des Bettes der zu untersuchenden Person aufgebaut. Sobald ein voreingestellter Hintergrundpegel außen überschritten wurde, zeichnete der äußere Schallpegelmesser das gesamte Geräusch auf, d.h. nicht nur den Pegelwert. Gleichzeitig wurde ein zweiter Schallpegelmesser aktiviert, der simultan dasselbe Geräusch innen aufzeichnete. Hierdurch wurde ein Geräuschvergleich zwischen außen und innen ermöglicht. Ein dritter Schallpegelmesser zeichnete Geräusche innen dann auf, sobald ein voreingestellter Pegel im Schlafrum überschritten wurde. Damit wurden zusätzlich auch Geräusche identifiziert, die im Schlafrum erzeugt wurden.

#### Ergebnisse der akustischen Messungen in der Feldstudie

In den Feldstudien wurden im Durchschnitt pro untersuchter Nacht 41 Überflüge registriert. Sowohl außen als auch innen wurde eine recht breite Verteilung an Fluggeräuschen festgestellt. Das lag sowohl daran, dass der Abstand der Flugpfade und die Flughöhe von der Messstelle variierten, als auch daran, dass die Dämpfung der Atmosphäre durch unterschiedliche Wetterbedingungen (z.B. Regen, Nebel, Sommer- /Winternächte) veränderlich war.

## Pegeldifferenzen (außen – innen)



Mittlere Anzahl von Fluggeräuschen pro Nacht: 40,9 Ereignisse

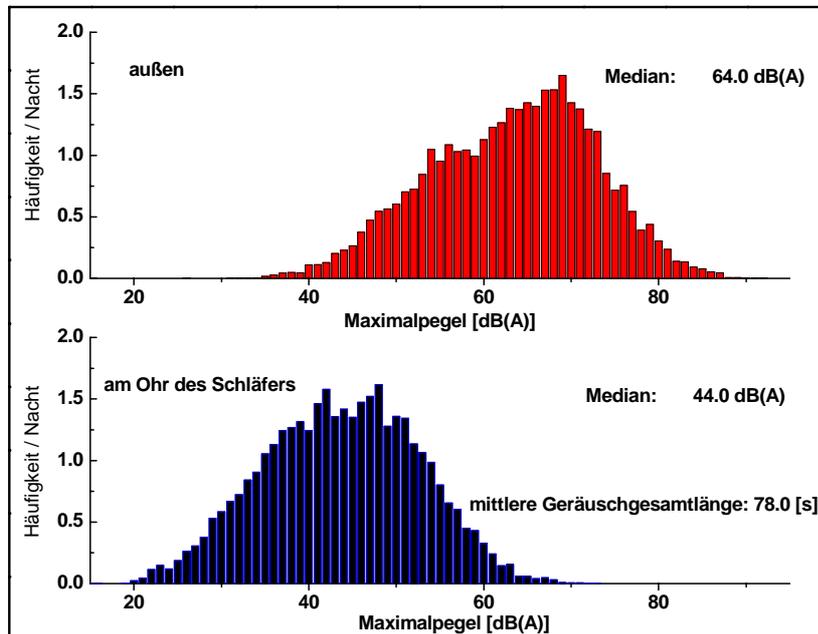


Abbildung 2: Differenzen zwischen außen und am Ohr des Schläfers gemessenen Schallpegeln.

Die durch Fluggeräusche erzeugten außen gemessenen Maximalpegel lagen zwischen 35 dB(A) und 87 dB(A), was einem mittleren Maximalpegel von 64 dB(A) entsprach. Am Ohr des Schläfers (innen) lagen die Werte zwischen 20 dB(A) und 73 dB(A), im Mittel bei 44 dB(A) (Abbildung 2). Der auf Fluggeräusche bezogene mittlere energieäquivalente Dauerschallpegel zwischen 0 Uhr und 6 Uhr betrug außen 53,9 dB(A) und am Ohr des Schläfers 36,2 dB(A). Abhängig von der Fensterstellung wurden mittlere Differenzen zwischen dem Außen- und Innenpegel von 28 dB(A) (geschlossene), 18 dB(A) (gekippte) und 13,5 dB(A) (vollständig geöffnete Fenster) gemessen.

### Ergebnisse Schlaf

Durch die Aufzeichnung der Hirnströme (EEG), der Augenbewegungen (EOG) und des Anspannungszustandes der Kinnmuskulatur (EMG) kann der Schlaf in sechs verschiedene Stadien unterteilt werden. Neben dem Wachzustand unterscheidet man den leichten Schlaf (Schlafstadium S1 und S2), den Tiefschlaf (Schlafstadium S3 und S4, englisch *slow wave sleep* SWS) und den Traumschlaf (REM-Schlaf).

Nächtlicher Fluglärm kann zu einer Veränderung der Schlafstruktur führen. Der Tiefschlaf scheint neben dem REM-Schlaf besonders wichtig für die regenerative Funktion des Schlafs und für die Gedächtnis-Konsolidierung zu sein, wohingegen das Schlafstadium S1 und

insbesondere der Wachzustand kaum bzw. nicht zu dieser Erholungsfunktion des Schlafes beitragen.

In der Laborstudie wurden die Schlafstadienanteile aller Lärmnächte, unabhängig von Anzahl und Maximalpegel der Fluggeräusche, intraindividuell mit denen der Basisnächte verglichen. Bei einer Gesamtschlafzeit von 7 Stunden und 24,5 Minuten war der Schlaf um 1,8 Minuten nicht signifikant reduziert. Es konnten jedoch Veränderungen in der Schlafstruktur beobachtet werden: Der Tiefschlaf war im Mittel um 4,1 Minuten insbesondere zugunsten der Schlafstadienanteile von Wach und S1 (+2,3 Minuten) reduziert. Die Veränderungen der einzelnen Schlafstadienanteile waren jedoch jeweils nicht statistisch signifikant.

Bei der Betrachtung von Veränderungen des Tiefschlafanteils in Abhängigkeit von Anzahl und Maximalpegel der Fluggeräusche konnte in 21 von 30 Fällen eine Reduktion beobachtet werden (erwartet bei keinem Einfluss von Nachtfluglärm: 15 Fälle). Die Veränderungen reichten von -18,0 Minuten bei 32 x 60 dB(A) bis zu +7,7 Minuten bei 4 x 55 dB(A) jeweils im Vergleich zur Basisnacht, wobei selbst diese hohen Veränderungen Bonferroni-korrigiert nicht signifikant waren.

Erhöhte Tiefschlafanteile in Nächten mit wenigen Geräuschen und/oder niedrigen Maximalpegeln deuteten darauf hin, dass die Kompensation eines eventuellen Tiefschlafdefizits aus vorausgehenden Nächten in diesen weniger belasteten Nächten möglich war.

#### Ereigniskorrelierte Analyse lärminduzierter Aufwachreaktionen

Mit ereigniskorrelierter Auswertung ist eine Analyse gemeint, die zeitlich einen direkten Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Fluggeräusches und der Wirkung des beobachteten Menschen auf das Fluggeräusch herstellt. Durch die simultane Aufzeichnung der elektrophysiologischen und der akustischen Signale wird eine ereigniskorrelierte Auswertung überhaupt erst ermöglicht. Mit Hilfe eines Triggersignals wurde in den Labor- und Feldstudien eine ereigniskorrelierte Analyse mit einer Auflösung von 125 Millisekunden erzielt.

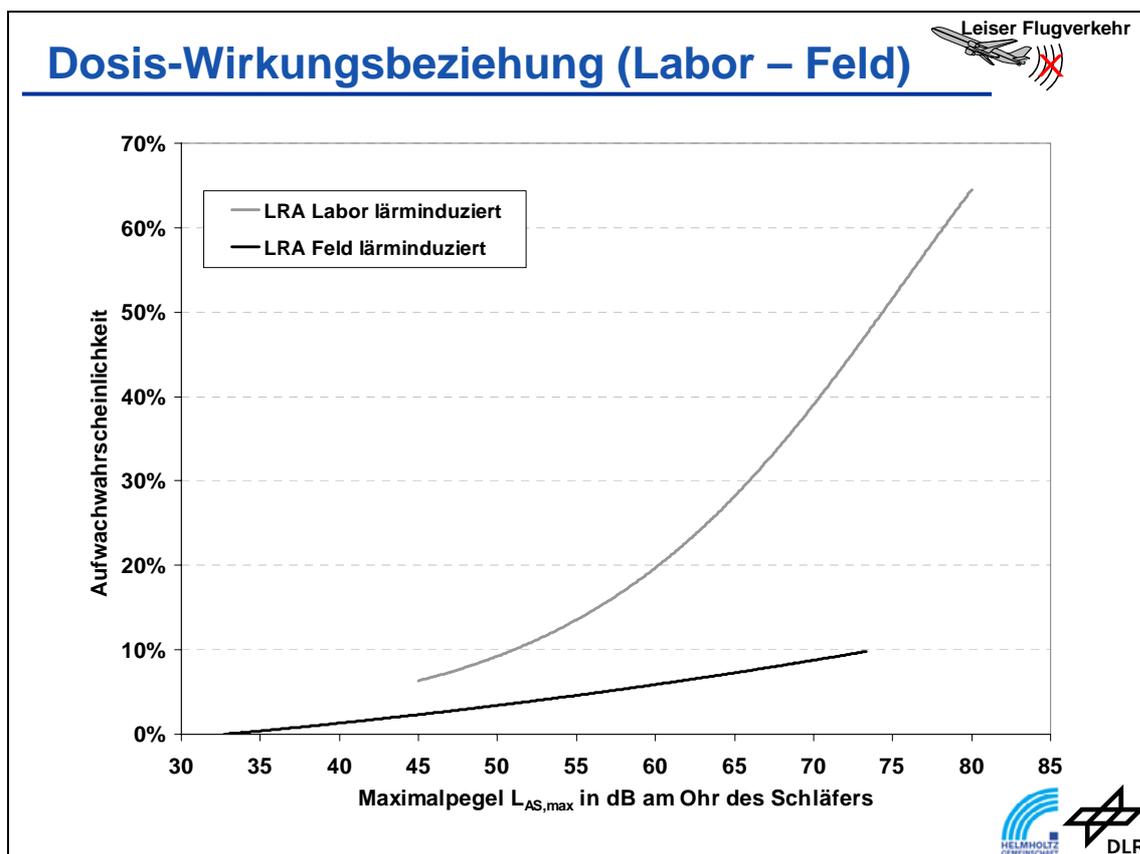
Als abhängige Variable wurde das Auftreten eines Wechsels in den Wachzustand oder das Schlafstadium S1 (hier und in allen folgenden Abbildungen abkürzend „Aufwachreaktionen“ genannt) gewählt, da das Schlafstadium S1 nicht zur regenerativen Funktion des Schlafes beizutragen scheint. Die unten dargestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen beruhen auf den Ergebnissen einer logistischen Regression mit Zufallseffekten (*random effects logistic regression*).

Aufwachreaktionen werden unter Fluglärm vermehrt beobachtet, sie sind jedoch insofern unspezifisch, als dass sie auch während des durch Geräusche ungestörten Schlafes spontan

auftreten. So wurden in der Laborstudie in den lärmfreien Basisnächten im Mittel 24 Aufwachreaktionen elektrophysiologisch beobachtet. Diese waren jedoch meist so kurz, dass sie vom Schläfer nicht wahrgenommen wurden. Wenn man im Zusammenhang mit einem Fluggeräusch eine Reaktion beobachtet, muss man sich also immer fragen, wie häufig diese auch ohne das Fluggeräusch, also spontan, aufgetreten wäre. In der Epidemiologie spricht man in diesem Zusammenhang von attributablen Risiken. Die Wahrscheinlichkeit einer durch das Geräusch induzierten Reaktion  $P_{\text{induziert}}$  errechnet sich als:

$$P_{\text{induziert}} = P_{\text{Fluggeräusch}} - P_{\text{spontan}}$$

In Abbildung 3 werden die Ergebnisse einer logistischen Regression mit Zufallseffekten für die Labor- und Feldstudie hinsichtlich der beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Maximalpegel miteinander verglichen. Dargestellt sind fluglärminduzierte Wahrscheinlichkeiten, d.h. die Wahrscheinlichkeit spontan aufzuwachen wurde bereits von der unter Fluglärm beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeit subtrahiert.



**Abbildung 3: Vergleich der Dosis-Wirkungsbeziehungen (Labor – Feld). Beschreibung der Modelle (random effects logistic regression) im Text.**

Beide Modelle enthalten den Maximalpegel des Fluggeräuschs, die verstrichene Schlafzeit (SchlZeit) und das Schlafstadium, in dem sich der Schläfer vor Auftreten des Fluggeräuschs befand (StadVor), als erklärende Variablen.

Der Hintergrundpegel  $L_{AS,eq(3)}$  in der Minute vor Auftreten eines Fluggeräuschs hatte in der Feldstudie einen signifikanten Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit. Dieser Einfluss war bei geringen Maximalpegeln des Fluggeräuschs größer als bei hohen Pegeln, d.h. es wurde eine Interaktion zwischen beiden Einflussgrößen festgestellt. Im Modell der Feldstudie ist deshalb zusätzlich zum Hintergrundpegel auch der Interaktionsterm zwischen Hintergrundpegel und Maximalpegel des Fluggeräuschs enthalten. Der Hintergrundpegel wurde mit konstant 27,1 dB(A) angenommen, was dem in der Feldstudie gefundenen Median entspricht. Im auf den Daten der Laborstudien beruhenden Modell ist zusätzlich die Variable  $\text{Maximalpegel}^2$  enthalten. Aus präventivmedizinischen Gründen wurde angenommen, dass sich die Versuchsperson immer im empfindlichsten Schlafstadium S2 und in der Mitte der empfindlicheren zweiten Nachthälfte befand.

Man erkennt, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit im Labor deutlich nicht-linear anstieg (Abbildung 3). Bei einem Maximalpegel von 45 dB(A) wird eine Aufwachwahrscheinlichkeit von 6,3%, bei 80 dB(A) von 64,5% vorausgesagt. Eine Schwelle wurde bis zu Werten von 45 dB(A) nicht beobachtet.

Die Aufwachwahrscheinlichkeit im Feld nahm mit zunehmendem Maximalpegel deutlich weniger stark zu als im Labor. Maximalpegel von 73,2 dB(A) (Maximum) gingen mit einer Aufwachwahrscheinlichkeit von 9,8% einher (Labor: 47,2%). In der Feldstudie wurde mit 32,7 dB(A) ein Schwellenwert gefunden, unterhalb dessen nicht mehr mit fluglärminduzierten Aufwachreaktionen zu rechnen ist. Dieser Wert lag nur ca. 6 dB(A) über dem mit 27,1 dB(A) angenommenen Hintergrundpegel, was dafür spricht, dass die Sensitivität des Indikators "Aufwachreaktionen" ausreichend hoch war. Die Unterschiede zwischen Labor- und Feldstudie wurden zudem mit zunehmendem Maximalpegel ebenfalls größer.

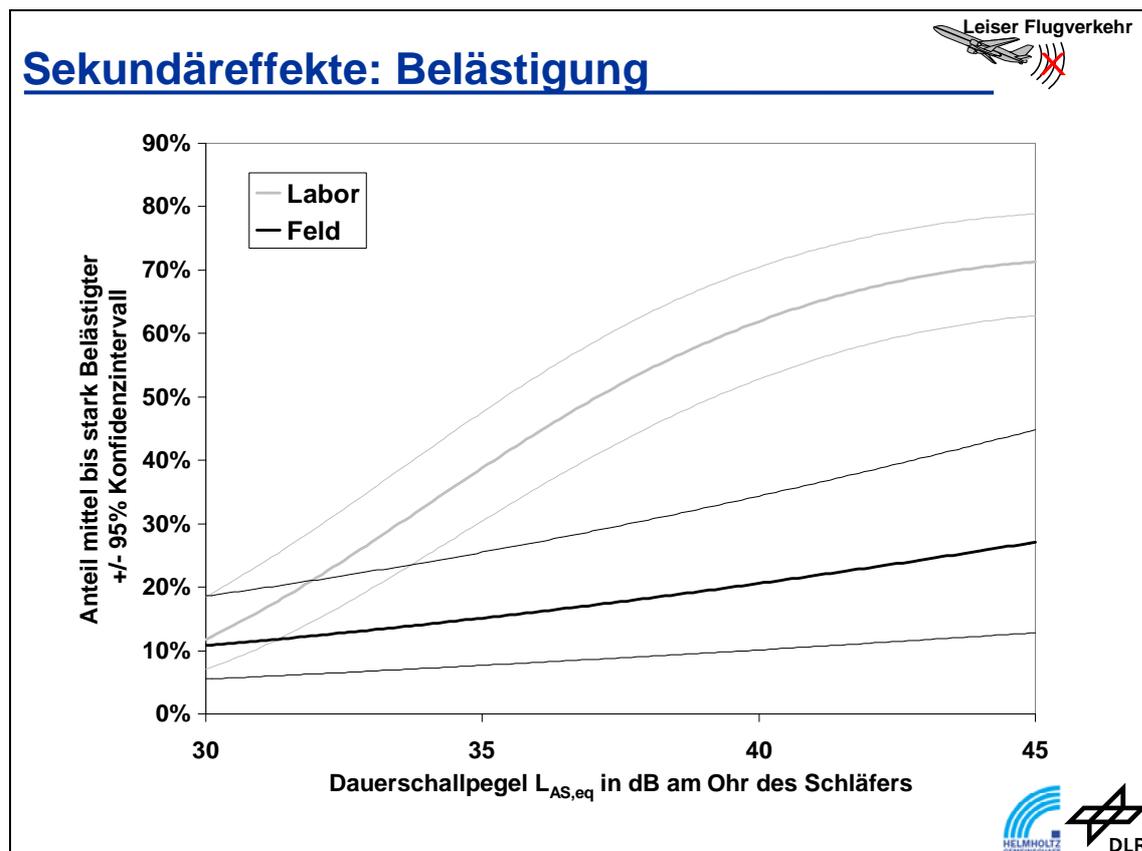
Die geringere Reaktionswahrscheinlichkeit im Feld im Vergleich zum Labor wurde 1995 in einer nennenswerten Arbeit von Pearsons <sup>1</sup> als Ergebnis einer Meta-Analyse von Studien über die Wirkung von Verkehrsgeräuschen beschrieben. Die in der Arbeit beobachteten Reaktionswahrscheinlichkeiten lagen sogar noch unterhalb denen in der vorliegenden Feldstudie gemessenen.

Eine mögliche Ursache für die im Feld beobachteten geringeren Reaktionswahrscheinlichkeiten ist die Tatsache, dass die Feldstudienteilnehmer in ihrer **vertrauten Umgebung**, zu der das eigene Bett gehört, untersucht wurden. So zeigten Hume und Whitehead <sup>2</sup> in einer Studie, in der Versuchspersonen sowohl im Labor als auch zu Hause über Lautsprecher mit Verkehrsgeräuschen beschallt wurden, dass die Reaktionswahrscheinlichkeiten in der gewohnten Umgebung tatsächlich geringer ausfielen als im Labor. Da es sich jeweils um dieselben Geräusche handelte, konnte der beobachtete Unterschied nur durch die verschiedenartige Umgebung hervorgerufen worden sein. Die

Aufwachwahrscheinlichkeiten zu Hause waren jedoch immer noch höher als die von Pearsons <sup>1</sup> berichteten, die sich auf Untersuchungen mit realen Verkehrsgeräuschen im Feld bezogen. Es scheint also nicht nur die vertraute Umgebung per se, sondern auch die Gewöhnung an das **spezifische Geräuscheszenario** eine Rolle zu spielen.

### Ergebnisse Belästigung

In der Abbildung ist der Zusammenhang zwischen energieäquivalentem Dauerschallpegel und dem Anteil mittel- bis stark Belästigter getrennt für die Laborstudie (graue Kurve) und die Feldstudie (schwarze Kurve) dargestellt, jeweils mit 95%-Konfidenzintervallen.



**Abbildung 4: Belästigungsvergleich Labor – Feld (Stufen 3 bis 5 auf 5-stufiger Skala).**

Die Belästigung wurde mit einer fünfstufigen Skala jeweils am Morgen erfragt. Die Frage lautete: „Wie stark wurden Sie durch den Fluglärm der vergangenen Nacht belästigt?“ Als Antworten waren „nicht“, „wenig“, „mittelmäßig“, „ziemlich“ und „sehr“ möglich. Um eine statistisch signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung entwickeln zu können, wurden die oberen drei Stufen dieser fünfstufigen Skala verwendet. Da sich lediglich 20% aller Belästigungseinstufungen in den Laborstudien und nur 4% aller Einstufungen in den Felduntersuchungen auf die Stufen 4 „ziemlich“ und 5 „sehr“ verteilten, erfolgte keine Betrachtung der Bewertungen auf den oberen 25-30% der Skala, die die Gruppe der „ziemlich belästigten“ („highly annoyed“) Personen bilden. Eine Beschränkung auf diesen Anteil der Personen hat zudem den Nachteil, dass der (qualitativ ebenfalls bedeutende) Teil

der Personen, deren Lärmbelästigung im mittleren Bereich der verwendeten Antwortskala liegt, ignoriert würde.

Der Belästigungsgrad im Feld war erheblich geringer als im Labor, auch bei Zugrundelegung vergleichbarer äquivalenter Dauerschallpegel. Signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen nächtlichem Fluglärm und der subjektiven Einschätzung der Ermüdung, der Befindlichkeit sowie der Erholung und der Beanspruchung nach Fluglärmnächten wurden nicht gefunden.

### Stresshormonausscheidung

Die Exkretionsrate von Cortisol im nächtlichen Sammelurin war unter Laborbedingungen von Lärm beeinflusst. Mit signifikantem Trend (nach Jonckheere) war sie vom Maximalpegel und der Anzahl der Fluggeräusche abhängig. Auch mit zunehmendem Dauerschallpegel  $L_{eq}$  ergab sich ein entsprechender Trend. Zugleich ergab sich jedoch auch ein Trend zunehmender Cortisolausscheidung mit der Anzahl der im Labor gemessenen Tage bei Versuchspersonen ohne jeglichen Fluglärm. Solche Trends waren im Feld nicht zu beobachten.

Die Noradrenalinausscheidung im nächtlichen Sammelurin war statistisch betrachtet konstant und von Lärm nicht beeinflusst. Es gab keine Veränderungen in Abhängigkeit von äquivalentem Dauerschallpegel, Maximalpegel oder Anzahl der Ereignisse. Es gab auch keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen unter Laborbedingungen und im Feldversuch. Ebenso war die Fortdauer der Untersuchungen (Anzahl der untersuchten Nächte) ohne Bedeutung hinsichtlich eines möglichen Lärmeinflusses auf die Exkretion von Noradrenalin.

Die Adrenalinsekretion im nächtlichen Sammelurin zeigte unter Fluglärm keine Änderung. Sie blieb auf äußerst niedrigem Niveau. Unter Laborbedingungen lag die AdrenalinKonzentration in mehr als 2/3 aller Urinproben unterhalb der Nachweisbarkeitsgrenze von 1 ng/ml, im Feld in rund der Hälfte der Urinproben. Es ergaben sich keine statistisch fassbaren Sekretionsraten, die sich von denen ohne Fluglärm unterschieden.

### Leistung

Bezüglich der am Morgen gemessenen Leistungsvariablen konnten in den bisherigen statistischen Analysen keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen ermittelt werden.

### Bewertung und Potential

Die Kombination von akustischen Prognosen mit den in der vorliegenden Studie gefundenen Dosis-Wirkungs-Beziehungen für elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen erlaubt es, für jeden Ort in der Umgebung eines Flughafens mit recht hoher Genauigkeit

vorherzusagen, wie viel Prozent der Bevölkerung keinmal, genau einmal, genau zweimal usw. zusätzlich durch nächtlichen Fluglärm aufwachen.

Bisher werden ausschließlich akustische Kriterien (z.B. äquivalenter Dauerschallpegel, Anzahl von Lärmpegeln oberhalb einer Schwelle) zur Bewertung der nächtlichen Fluglärmbelastung herangezogen. Durch die Ergebnisse der DLR-Untersuchungen können zusätzlich Wirkungskriterien (z.B. die Wahrscheinlichkeit für eine, zwei usw. Aufwachreaktionen) in Abhängigkeit vom tatsächlichen Flugverkehrsaufkommen angegeben werden.

### Einschränkungen und Vorteile der Studie

Alle Ergebnisse beziehen sich auf die durch die Studie vorgegebenen Randbedingungen (z.B. Alter und Gesundheitszustand der Versuchspersonen). Auch wenn die Repräsentativität durch diese Randbedingungen eingeschränkt ist, so ist sie trotzdem deutlich höher als die Repräsentativität der Studien, die bisher auf diesem Gebiet mit vergleichbarem Ansatz durchgeführt wurden.

In der vorliegenden Studie wurden nur akute, d.h. primäre und sekundäre Schlafstörungen, untersucht. Diese Studie ist keine epidemiologische Studie, die notwendig wäre, um langfristige Auswirkungen von (Flug-) Lärm auf die Gesundheit zu untersuchen. Aus diesem Grund können nur indirekte Aussagen über langfristige Gesundheitsstörungen in dem Sinne gemacht werden, dass mit langfristigen Gesundheitsstörungen dann mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu rechnen ist, wenn fluglärminduzierte primäre und sekundäre Schlafstörungen verhindert bzw. stark eingeschränkt werden.

Im Vergleich zu anderen, bisher veröffentlichten Studien zu dem Thema hat das DLR eine sehr große Stichprobe in Bezug auf die Zahl der Probanden und Probandennächte verwendet; zudem wurden Personen zwischen 18 und 65 Jahren untersucht, während die meisten bisherigen Studien an jungen Probanden (im Alter zwischen 18 und 35 Jahren) durchgeführt wurden.

Durch die Auswahl der Versuchspersonen in der vorliegenden Studie (z.B. eher lärmbelästigte als in der allgemeinen Bevölkerung) und die konservativ angelegte Analysetechnik (z.B. Annahme des Schlafstadiums, aus dem man am leichtesten aufwacht) wurde ein präventivmedizinischer Ansatz gewählt, der fluglärmbedingte Aufwachwahrscheinlichkeiten im Sinne der betroffenen Bevölkerung eher etwas überschätzt als unterschätzt.

Durch interindividuellen Vergleich (zwischen Probanden, die nicht beschallt wurden und denen, bei denen Fluglärm appliziert wurde) und durch intraindividuellen Vergleich (Nächte

ohne und mit Lärm bei denselben Versuchspersonen) unterscheidet sich die vorliegende Untersuchung von den meisten bisherigen Laborstudien.

In den Labor- und Feldstudien wurden dieselben hohen methodischen, apparativen und analytischen Verfahren angewendet.

Die gleichzeitige Aufzeichnung von akustischen und elektrophysiologischen Parametern ermöglichte eine ereigniskorrelierte Auswertung der Daten. So konnte Ursache (Fluglärmereignis) und Wirkung (physiologische Reaktion) in direkten Zusammenhang gestellt werden.

Diese Methodik erlaubte die Erstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen für fluglärmbedingte physiologische und psychologische Reaktionen unter Labor- und Feldbedingungen.

Aus den Dosis-Wirkungs-Beziehungen wurde ein Vorhersagemodell für fluglärmbedingte Aufwachreaktionen entwickelt. Ähnliches lässt sich für andere physiologische Funktionen entwickeln.

Aus dem Vorhersagemodell und akustischen Prognosen lassen sich Kriterien für fluglärmbedingte physiologische Reaktionen entwickeln.

#### Literatur

1. Pearsons K, Barber D, Tabachnick BG, Fidell S. Predicting noise-induced sleep disturbance. *J.Acoust.Soc.Am.* 1995;**97**:331-8.
2. Hume, K. and Whitehead, C. Sleep disturbance due to introduced aircraft noise. in: *Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem 2003*: 199-200.