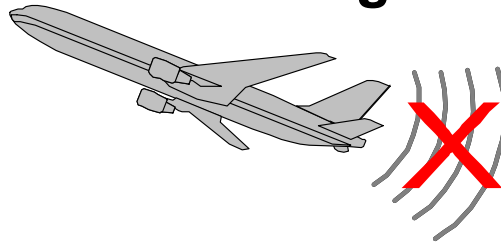


## Leiser Flugverkehr



**Zusammenfassender Projekt-Abschlussbericht**

5. Juli 2004

## Inhaltverzeichnis

Inhaltverzeichnis	1-1
Einleitung	1-2
1. Hintergrund des Projektes	1-3
2. Ziele des Projektes	2-1
3. Humanspezifische Wirkung des Nachtfluglärms	3-1
4. Minderung des Triebwerkslärms	4-1
5. Minderung des Umströmungslärms	5-1
6. Lärmarme Flugverfahren	6-1
7. Verkehrspolitische Lärminderungskonzepte	7-1
8. Fluglärmrechnungsverfahren	8-1
9. Schallausbreitungsmodelle	9-1
10. Zusammenfassung der Projektergebnisse	10-1

## Einleitung

Der vorliegende Bericht stellt eine zusammenfassende Darstellung des DLR-Projekts „Leiser Flugverkehr“ dar. Er gliedert sich wie folgt:

- Im **Kapitel 1** wird auf die Hintergründe eingegangen, die letztendlich zur Initialisierung des Projekts führten. Die generelle Zielsetzung des Projektes, die Projektstruktur sowie die speziellen
- Ziele der einzelnen Arbeitspakete werden im **Kapitel 2** behandelt. Die folgenden Kapitel beschreiben die Arbeitspakete in detaillierterer Form (Ziele, Forschungsansätze und durchgeführte Arbeiten):
- Im **Kapitel 3** werden die Aktivitäten zur Definition eines Kriteriums zur Beschreibung der humanspezifischen Wirkungen von Nachtfluglärm dargestellt. Anlass für diese Arbeiten war die Tatsache, dass nächtlicher Fluglärm derzeit eine der maßgeblichsten negativen Folgewirkungen des Luftverkehrs darstellt. Vor dem Hintergrund, dass bezüglich der Bewertung von Nachtfluglärm weitestgehend noch keine Einigkeit besteht, muss diesen Arbeiten eine besonders umweltrelevante Bedeutung zugeschrieben werden.
- Der nahe liegende Ansatz, die Fluglärmbelastung am Boden zu mindern, ist natürlich die Lärminderung an der Quelle selbst. Dabei muss – insbesondere bei modernen Verkehrsflugzeugen – unterschieden werden zwischen dem Lärm, der durch das Triebwerk hervorgerufen wird und dem durch die Umströmung von Rumpf, Tragflächen und Fahrwerk erzeugten Lärm. Konzepte zur Minderung des Triebwerkslärms werden im **Kapitel 4** beschrieben, **Kapitel 5** setzt sich mit der Untersuchung des Umströmungslärms auseinander. Zielsetzung war jeweils die Bereitstellung von technischen Konzepten, die die Triebwerks- und Flugzeugindustrie in die Lage versetzen, künftig schon beim Flugzeugdesign den Aspekt der Lärminderung in adäquater Weise zu berücksichtigen.
- Während technologische Maßnahmen an Triebwerk und Zelle in der Regel erst mittel- bis langfristig umsetzbar sind, bestehen auch kurz- und mittelfristige Möglichkeiten zur Minderung des Lärms in der Flughafenumgebung. Eine ist die Anwendung von lärmmindernden Flugverfahren, die im **Kapitel 6** erläutert wird. Neben diesen operationellen Maßnahmen besteht auch die Möglichkeit, durch gezielte Steuerungsmaßnahmen des Luftverkehrs lärmmindernde Effekte zu erzielen. Mit diesem Themenkomplex wird sich im **Kapitel 7** auseinandergesetzt.
- Ein wesentliches Hilfswerkzeug bei der Validierung von Lärminderungskonzepten ebenso wie bei der Umsetzung und Kontrolle von planerischen Maßnahmen zur Lärminderung sind Fluglärmprognoseverfahren. Im **Kapitel 8** wird die Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Berechnung von Fluglärm beschrieben, sowie dessen Einsatzmöglichkeiten bei der Optimierung von Lärminderungsmaßnahmen und von konventionellen Verfahren zur Berechnung von Fluglärm. Besondere Bedeutung kommt dabei einer soliden Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge in der Atmosphäre zu. Im **Kapitel 9** wird ein neuartiges Schallausbreitungsmodell vorgestellt, das auf dem Ansatz einer ganzheitlichen und konsistenten Beschreibung des Komplexes Topographie – Meteorologie beruht.
- Eine zusammenfassende Darstellung der Resultate findet sich im **Kapitel 10**.

Dieser Bericht kann aufgrund des Umfangs des Projektes nur eine Zusammenfassung der abgewickelten Forschungsarbeiten darstellen. Detailliertere Informationen können den in den einzelnen Abschnitten zitierten weitergehenden Veröffentlichungen entnommen oder direkt über die Arbeitspaketkoordinatoren per E-Mail erfragt werden.

## 1. Hintergrund des Projektes

### 1.1. Problemstellung

Der Fluglärm ist in Deutschland ein drängendes Umweltproblem, das vor allem die Akzeptanz und die weitere Entwicklung des Luftverkehrs in Zukunft behindern kann. In den letzten Jahren konnte der Fluglärm im Umfeld deutscher Verkehrsflughäfen durch Ausmusterung alter und lauter Flugzeuge vermindert werden: Fortschritte vor allen Dingen auf dem Gebiet der Triebwerkstechnik haben in den letzten 30 Jahren zu einer Absenkung der spezifischen Lärmemission von Flugzeugen um etwa 25 dB geführt. Der Prozess der Ausmusterung ist heute aber nahezu abgeschlossen, so dass in den kommenden Jahren bei steigendem Flugverkehr der Fluglärm wieder zunehmen wird, sofern keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Vor allem der nächtliche Fluglärm stellt ein maßgebliches Problem dar, das große Anstrengungen verlangt, damit die Fluglärmbelastung sowohl kurz- als auch langfristig sinkt. Dabei ist jedoch auch der strategischen und ökonomischen Bedeutung des Luftverkehrs Rechnung zu tragen.

Die weitere technische Reduktionsmöglichkeit des Triebwerks- und Zellenlärms wird von den Fachleuten auf etwa 10 dB eingeschätzt. Dieses Potential wird allerdings nur mittel- bis langfristig vollständig ausschöpfbar sein, so dass andere, kurzfristig wirksame Lärminderungsmöglichkeiten ebenfalls in Betracht gezogen werden müssen. Dazu gehören u.a. verbesserte An- und Abflugverfahren und verkehrspolitische Maßnahmen.

Zur Beurteilung der Effizienz konzeptionell unterschiedlicher Maßnahmen ist eine sehr genaue Kenntnis der auf Lärm bezogenen Kausalkette „Emission-Ausbreitung-Immission-Wirkung“ notwendig, was zu der hier vorgestellten integrierten Vorgehensweise veranlasst hat, um die noch bestehenden Wissensdefizite zu beseitigen.

Als die für Luftfahrtforschung zuständige Einrichtung in Deutschland war das DLR aufgefordert, den wichtigen Problembereich „Fluglärm“ in seinen wesentlichen Aspekten zu bearbeiten. Es hat sich dieses aktuellen gesellschaftsrelevanten Themas – aufgrund der Notwendigkeit einer umgehenden Behandlung – zu Beginn des Jahres 1999 angenommen. Nach erfolgreicher Beantragung einer Förderung durch den Strategiefonds der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren wurde das Projekt seit Juli des Jahres 2000 für drei Jahre in integrierter und erweiterter Form im HGF-Verbund durchgeführt. Damit wurde dieses Thema der Vorsorgeforschung als strategisch wichtiges Anliegen der HGF erkennbar.

### 1.2. Projektansatz

In der Praxis wurden bisher meist die Wirkungen einzelner lärmmindernder Maßnahmen untersucht. Ein ganzheitliches Bild über Lärmszenarien, Wirkungsmuster und gezielt strukturierte Gegenmaßnahmen besteht nicht. Im Projekt sollten daher Methoden, Maßnahmen und Technologien entwickelt werden, die die Lärmbelastung trotz Erhöhung des Luftverkehrsaufkommens mittel- und langfristig zu reduzieren helfen. Unter anderem sollte die Analyse der Wirkungen insbesondere des nächtlichen Fluglärms auf den Menschen in die Bewertung von Maßnahmen zur Lärminderung mit einfließen. Hintergrund war eine Entlastung der Bevölkerung bei gleichzeitiger Sicherung der Entwicklung des Luftverkehrs in Deutschland.

Da aus Gründen des Wettbewerbs die Handlungsmöglichkeiten der Industrie eingeschränkt sind (Kosten bei Herstellern und Betreibern), muss es Aufgabe der Großforschung sein, das Lärmsenkungspotential bei Flugzeugen zu demonstrieren – nicht zuletzt, um die internationalen Gremien zu veranlassen, die von künftigen Flugzeugen einzuhaltenden Grenzwerte deutlich zu senken.

Die im DLR vorhandenen Fähigkeiten und Aktivitäten auf den Gebieten der Medizin, Aeroakustik, Flug- und Triebwerkstechnik, Atmosphärenphysik, Flugführung und Verkehrsforschung wurden im Rahmen des Projekts gebündelt und zu einem internen Netzwerk verknüpft. Die Vielfalt und Komplexität der Aufgaben verlangte außerdem die Mitwirkung kompetenter Partner aus Industrie und Forschung, die über ein offenes Netzwerk eingebunden waren.

Durch eine strukturierte Kommunikation und Zusammenarbeit (u.a. in Form eines externen Beraterkreises) wurden daher Luftfahrtindustrie, Fluggesellschaften, Flughäfen, Behörden und Lärmbetroffene in das Projekt mit einbezogen. Sie wurden laufend mit dem Stand und den Ergebnissen des Projekts vertraut gemacht. Die Koordination der eigentlichen Forschungs- und Technologiearbeiten und der Transfer der Ergebnisse zu Partnern und Nutzern wurden durch das Projektmanagement gewährleistet. Ein Lenkungsausschuss auf Institutsleitersebene überwachte das Projekt.

### **1.3. Beziehungen zu Leitkonzepten und Verbundvorhaben**

Das interdisziplinäre Projekt war auf nationaler Ebene Bestandteil des vom DLR initiierten und koordinierten nationalen Forschungsverbundes „Leiser Verkehr“. So konnten Synergien aus Arbeiten zur Lärminderung im Straßen- und Schienenverkehr und aus der im Verbund breit angelegten Querschnitts- und Lärmwirkungsforschung genutzt werden. Auf europäischer Ebene wurde es - zunächst informell - einbezogen in die Arbeitsgruppe der europäischen Luftfahrtforschungseinrichtungen EREA und in das von der Europäischen Kommission eingerichtete thematische Netzwerk X-Noise.

Bei der Lärmwirkungsforschung erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Universitäten Dortmund und Düsseldorf. Hier wurde insbesondere auf das im Verbundvorhaben „Leiser Verkehr“ initiierte Netzwerk zugegriffen. Der Flughafen Köln-Bonn unterstützte die Aktivitäten im Bereich der Lärmwirkungsforschung bei den durchgeführten Felduntersuchungen durch Bereitstellung von Luftverkehrsdaten als Grundlage zur Definition des Untersuchungsraumes.

Auf dem Gebiet des Triebwerks- und Umströmungslärms bestanden schon Industriekooperationen (z.T. im Rahmen von EU-Projekten) mit MTU, BMW-RR, DaimlerChrysler Forschung und Technik, DaimlerChrysler Aerospace Airbus, Rolls-Royce, SNECMA, Airbus und Messier-Dowty sowie Kooperationen mit den Großforschungseinrichtungen NLR und ONERA. Mit weiteren Firmen erfolgte ein enger Informationsaustausch. Insbesondere MTU, BMW-RR und DaimlerChrysler Aerospace Airbus haben das Projekt aktiv mit unterstützt.

Die Arbeiten zu lärm mindernden Flugverfahren erfolgten in Abstimmung und Kooperation mit der Deutschen Lufthansa und der Deutschen Flugsicherung.

In den Arbeitspaketen zu verkehrspolitischen Maßnahmen und zur Fluglärmprognose wurde auf die langjährigen intensiven Kontakte zu den deutschen Verkehrsflughäfen und den maßgeblichen Behörden zurückgegriffen.

## 2. Ziele des Projektes

### 2.1. Übergeordnetes Ziel

Das Projekt war längerfristig angelegt und setzte in einem offenen Netzwerk mit Partnern einen erkennbaren Schwerpunkt der Fluglärmforschung in Deutschland. Dabei sollten nicht nur technologische und operationelle Grundlagen zur Reduktion der Lärmbelastung geschaffen, sondern auch die Relationen und Wechselwirkungen von Lärmemission, -immission und Lärmwirkung beleuchtet werden. Zielsetzung war die sukzessive Bereitstellung verlässlicher Methoden, gesicherter Daten und technisch machbarer Lösungen, um in Zukunft das Wachstum des für Mobilität und Wirtschaft wichtigen Flugverkehrs zu ermöglichen und dabei den Fluglärm auf den Flughafennahbereich zu beschränken.

Zur Erreichung dieser Ziele waren vielfältige, aufeinander abgestimmte oder vernetzte Forschungsaktivitäten erforderlich:

- Bewertungskriterien für humanspezifische Nachtfluglärmwirkungen
  - Schaffung der wissenschaftlichen Grundlage für gezielte Lärm-minderungsstrategien (Technik und Betrieb) und für Planungsmaßnahmen
- Minderung des Lärms an der Quelle (Triebwerks- und Umströmungslärm)
  - Schaffung technologischer Grundlagen für leises Fluggerät und von design-to-noise-Verfahren; Unterstützung der Produktinnovation
- Minderung der Lärmbelastung am Boden durch operationelle Maßnahmen (lärmarme An- und Abflugverfahren)
  - Empfehlungen und Verfahren für Flugsicherung, Fluggesellschaften und Flughäfen
- Analyse und Bewertung verkehrspolitischer Lärm-minderungskonzepte
  - Empfehlungen an Gesetzgeber, Flughäfen und Fluggesellschaften
- Schaffung hochwertiger Lärmprognoseverfahren
  - Sachgerechte Absicherung öffentlicher Planungen und gesetzgeberischer Maßnahmen

Die Arbeiten und ihre Ergebnisse – wie auch die hier zu entwickelnden fortschrittlichen Datenerfassungs- und Datenanalysetechniken – können zur Lösung ähnlicher Problemstellungen bei anderen Verkehrsträgern (Straßen- und Schienenfahrzeuge) beitragen und fügen sich zur Reduzierung der humanspezifischen Lärmbelastung somit in die strategischen Konzepte von DLR und HGF sowie das Verbundvorhaben „Leiser Verkehr“ ein.

## 2.2. Überblick über die Arbeitspakete

Das Projekt gliederte sich in 5 Hauptarbeitspakete (HAP), von denen sich die Hauptarbeitspakete 2 und 5 in zwei separate Arbeitspakete (AP) aufteilen. Abbildung 2-1 zeigt eine Übersicht über die Arbeitspaketstruktur und funktionale Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen:

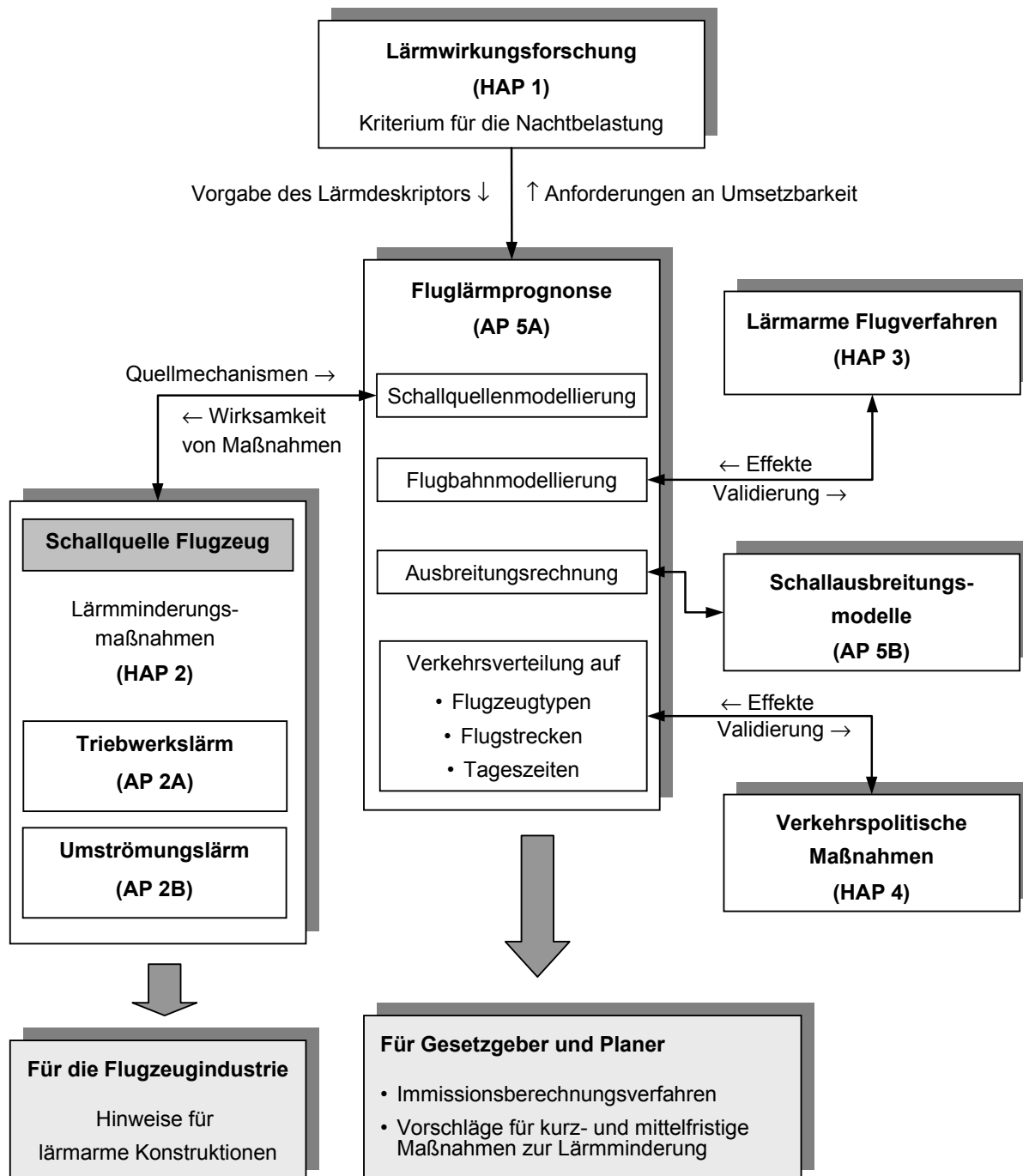


Abb. 2-1: Arbeitspaketstruktur und funktionale Zusammenhänge

### 3. Humanspezifische Wirkung des Nachtfluglärms

**Hauptarbeitspaket 1:** *Dr. Alexander Samel, E-Mail: [alexander.samel@dlr.de](mailto:alexander.samel@dlr.de)  
DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin,  
Abteilung Flugphysiologie, Köln*

#### 3.1. Einleitung

Das Hauptarbeitspaket „Fluglärmwirkungen“ steht am Ende der Kette „Schallemission (Lärmentstehung an der Quelle Flugzeug)“ – „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. Das DLR will hiermit zur Versachlichung der teilweise hoch emotional geführten Diskussionen beitragen.

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)

#### 3.2. Forschungsziel

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 sein,
- 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.

#### 3.3. Studiendesign und Studienablauf

Die fünfjährige DLR-Untersuchung bestand aus vier Studien im Schlaflabor des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln (Studienzeiträume: September bis November 1999, Mai bis Juli 2000, Februar bis April 2001, März bis Juni 2003) und aus zwei Feldstudien (Studienzeitraum September 2001 – November 2002), bei denen die Probanden in ihren eigenen vier Wänden in den fluglärmbelasteten Gebieten des Flughafens Köln/Bonn untersucht wurden.

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. Die Laborstudien fanden im Doppelblindversuch statt, da weder Probanden noch die anwesenden DLR-Wissenschaftler in den jeweils 13 Untersuchungsnächten 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 wohnten. Die Untersuchungen fanden zwischen September 2001 und November 2002 statt. Die Zahl der untersuchten Nächte pro Versuchsperson 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 (s. Abschnitt 3.5), 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 Labor- und Feldstudien wurden identische akustische, physiologische und psychologische Methoden angewendet. Dadurch wurde ein direkter Vergleich der Ergebnisse ermöglicht.

### 3.4. 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. In dieser Studie wurde das Aktometer zusätzlich zur Polysomnografie eingesetzt und kontinuierlich, d.h. über den gesamten Tag und die Nacht, von den Versuchspersonen getragen.

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

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 [3-1] 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.

### 3.5. Akustik

Die im **Schlaflabor** applizierten Geräusche wurden mit Klasse-1-Schallpegelmessern bei Flughafenanwohnern 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 Schlafers) 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 Schlafraum 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 Schlafraum 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 Lärmergebnis hervorgerufen wurde oder spontan (d.h. ohne erkennbare äußere Einwirkung) entstand.

In den **Feldstudien** wurde der Schalldruckpegel außen und im Schlafraum 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, der simultan dasselbe Geräusch innen aufzeichnete, über ein Triggersignal aktiviert. Hierdurch wurde ein Geräuschvergleich zwischen außen und innen ermöglicht. Durch die simultane Aufnahme von

Triggersignal und elektrophysiologischen Signalen wurde auch in der Feldstudie eine ereigniskorrelierte Auswertung mit einer Auflösung bis zu 125 ms ermöglicht. Ein dritter Schallpegelmessers zeichnete Geräusche innen dann auf, sobald ein voreingestellter Pegel im Schlafraum überschritten wurde. Damit wurden zusätzlich auch Geräusche identifiziert, die im Schlafraum erzeugt wurden.

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.

### 3.6. Probandenauswahl

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

Ziel der Studie war es, den Einfluss von nächtlichem Fluglärm auf den Schlaf zu bestimmen. Leidet die Versuchsperson jedoch gleichzeitig unter einer intrinsischen, d.h. nicht durch Umwelteinflüsse verursachten Schlafstörung, kann nicht mehr unterschieden werden, ob die am nächsten Tag beobachteten sekundären Schlafstörungen (Müdigkeitsgefühl, eingeschränkte Leistungsfähigkeit, etc.) durch den Fluglärm oder durch die intrinsische Schlafstörung selbst verursacht worden sind, zumal das Ausmaß der intrinsischen Schlafstörung in verschiedenen Nächten unsystematisch fluktuieren kann.

Häufige spontane Aufwachreaktionen, hervorgerufen durch eine intrinsische Schlafstörung, führen dazu, dass der Anteil lärminduzierter Aufwachreaktionen eher unterschätzt wird. Lärminduzierte Aufwachreaktionen sind solche, die allein auf den Fluglärm zurückgeführt werden können. Sie berechnen sich aus der Differenz "Aufwachreaktionen unter Einfluss von Fluglärm" minus "spontan auftretende Aufwachreaktionen" (s. Abschnitt 3.7.2.3.). Patienten mit einer intrinsischen Schlafstörung entwickeln häufig aufgrund der ständig gestörten Struktur des Schlafs einen erhöhten Schlafdruck, weshalb sie erst auf lautere Fluggeräusche reagieren als schlafgesunde Versuchspersonen. Es steht außer Frage, dass Verkehrslärm für Patienten mit intrinsischer Schlafstörung eine zusätzliche Belastung darstellt. Dennoch würden Empfehlungen, die auf Untersuchungen an solchen Versuchspersonen beruhen, den Einfluss von nächtlichem Fluglärm auf den Schlaf systematisch unterschätzen, wären damit anti-konservativ und nicht im Sinne des Schutzes der betroffenen Bevölkerung. Aus diesem Grund wurden Probanden mit vermuteten intrinsischen Schlafstörungen ausgeschlossen.

Eine genaue Beschreibung des Auswahlverfahrens und der Stichprobe ist im Forschungsbericht DLR-FB 2004-07/D [3-2] zu finden.

### 3.7. Ergebnisse

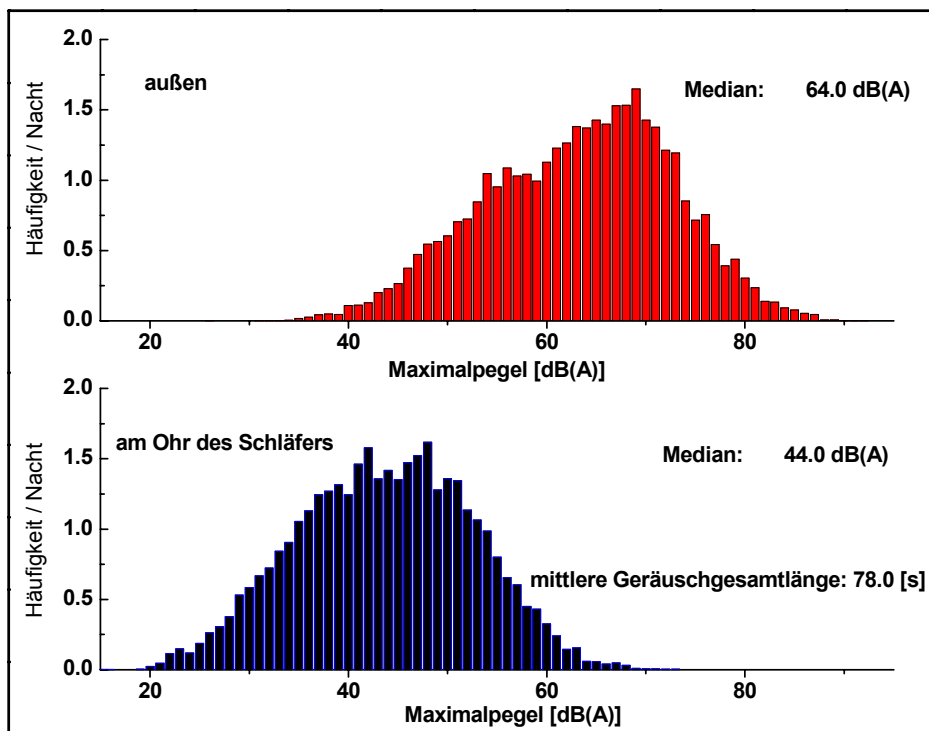
Im Folgenden werden thematisch getrennt die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt. Eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse findet sich im Forschungsbericht DLR-FB 2004-07/D [3-2].

#### 3.7.1. Akustik (Feldstudien)

In den Feldstudien wurden im Durchschnitt pro untersuchter Nacht 41 Überflüge registriert. Sowohl außen als auch innen wurde hinsichtlich des beobachteten Maximalpegels  $L_{AS,max}$  der Fluggeräusche eine recht breite Verteilung festgestellt (s. Abbildung 3-1). 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.

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.



**Abbildung 3-1: Differenzen zwischen außen und am Ohr des Schläfers gemessenen Schallpegeln.**

### 3.7.2. Ergebnisse Schlafstörungen

An dieser Stelle können nur einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt werden. Ausführlichere Informationen sind im Forschungsbericht DLR-FB 2004-07/D [3-2] zu finden.

#### 3.7.2.1. Einleitung

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.

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 Herzinfarktrisiko) werden kontrovers diskutiert (s. Abbildung 3-2).



**Abbildung 3-2: 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:

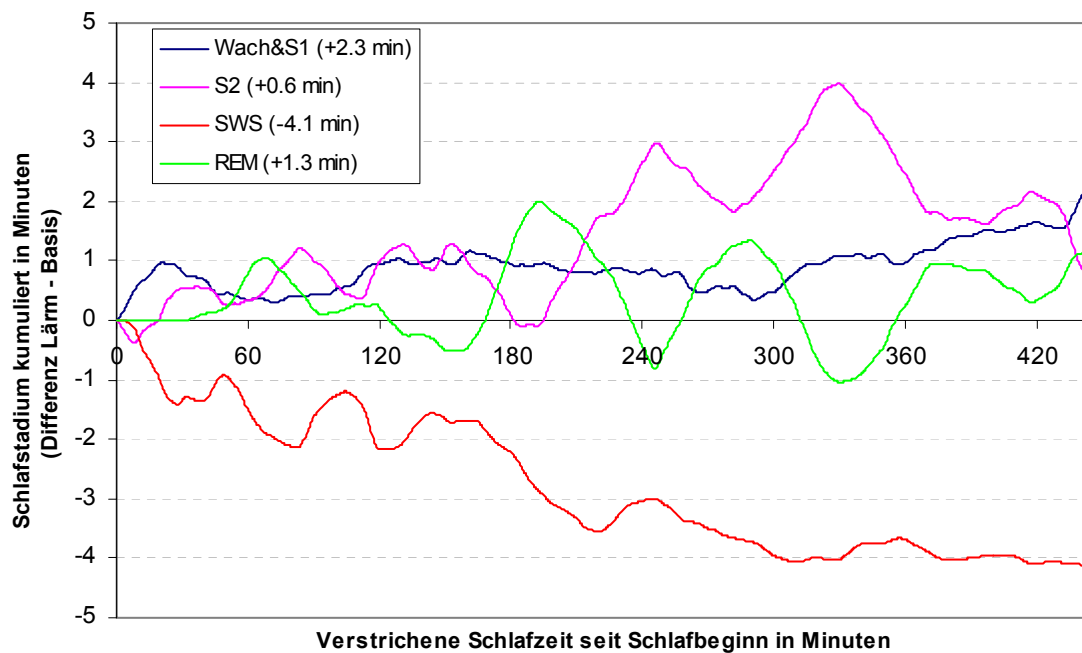
- Sehr lange Induktionszeiten bis zum Auftreten der untersuchten Erkrankung (z.B. Herzinfarkt).
- Wechselnde Expositionen (Lärmdosis) über lange Zeiträume können nur ungenau erfasst werden, was zu möglichen Fehlklassifizierungen führt.
- Viele weitere Risikofaktoren führen zu den untersuchten Krankheitsbildern. Sind diese mit der Exposition assoziiert, handelt es sich um so genannte 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 viele Stärken der einen Studienform die Schwächen der anderen sind und umgekehrt.

### 3.7.2.2. Fluglärmbedingte Veränderungen der Schlafstruktur

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 Schlaf-

stadienanteile von Wach und S1 (+2,3 Minuten) reduziert (s. Abbildung 3-3). Die Veränderungen der einzelnen Schlafstadienanteile waren jedoch jeweils nicht statistisch signifikant.



**Abbildung 3-3: Veränderung der Schlafstadienanteile (mittlere Differenz zwischen Lärm- und Basisnacht) im Verlauf der Nacht in den Laborstudien.**

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.

In der Feldstudie existierte keine Basisnacht ohne Fluggeräusche, so dass hier nach Mediansplit jeweils die vier am stärksten belasteten Nächte mit den vier am schwächsten belasteten Nächten verglichen wurden. Die Veränderungen der Anteile der Schlafstadien variierten um +/- 4 Minuten um Null und waren jeweils nicht signifikant von Null verschieden (Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest für gepaarte Daten).

### 3.7.2.3. Ereigniskorrelierte Analyse lärminduzierter Aufwachreaktionen

Mit ereigniskorrelierter Auswertung ist eine Analyse gemeint, die zeitlich einen direkten Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Fluggeräusches und der Reaktion 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 Schlafs 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 3-4 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.

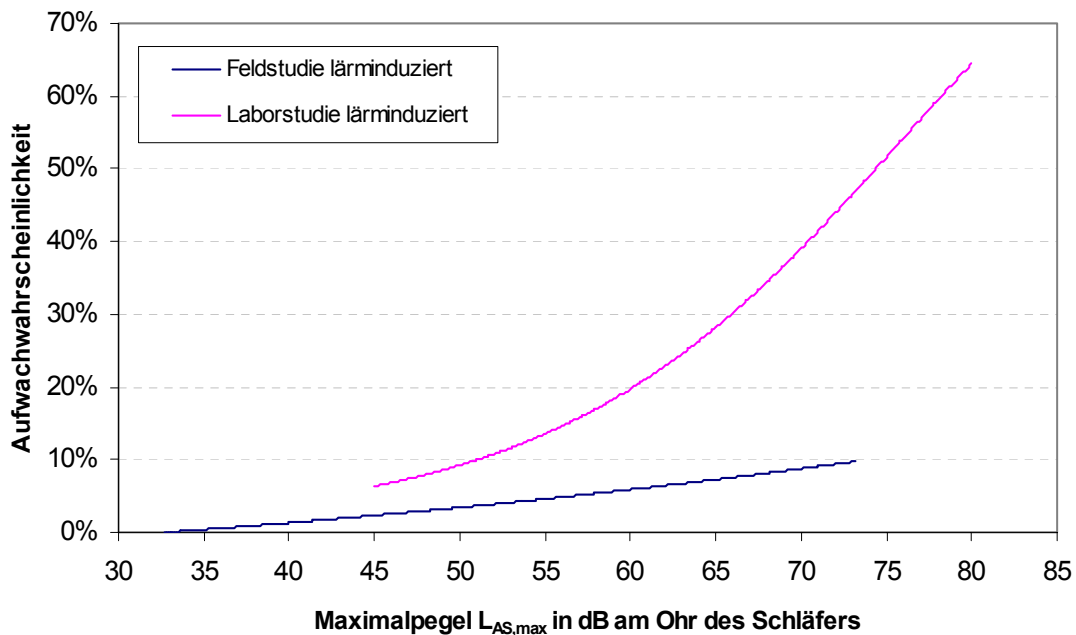
Beide Modelle enthalten den Maximalpegel des Fluggeräuschs, die verstrichene Schlafzeit (SchlZeit) und das Schlafstadium, in dem sich der Schläfer vor Auftreten des Fluggeräuschs befand (StadVor), als erklärende Variablen.

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  $(L_{AS,max})^2$  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 3-4). Bei einem Maximalpegel von 45 dB(A) wird eine Aufwachwahrscheinlichkeit von 6,3%, bei 80 dB(A) von 64,5% vorausgesagt. Eine Schwelle wurde im Labor oberhalb von 45 dB(A) nicht beobachtet (Geräusche mit Maximalpegeln kleiner als 45 dB(A) wurden im Labor nicht eingespielt).

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.

einer nennenswerten Arbeit von Pearsons [3-3] als Ergebnis einer Meta-Analyse von Studien über die Wirkung von Verkehrsgeräuschen beschrieben. Die in der Arbeit beobachteten Reaktionswahrscheinlichkeiten lagen sogar noch unterhalb der in der vorliegenden Feldstudie gemessenen.



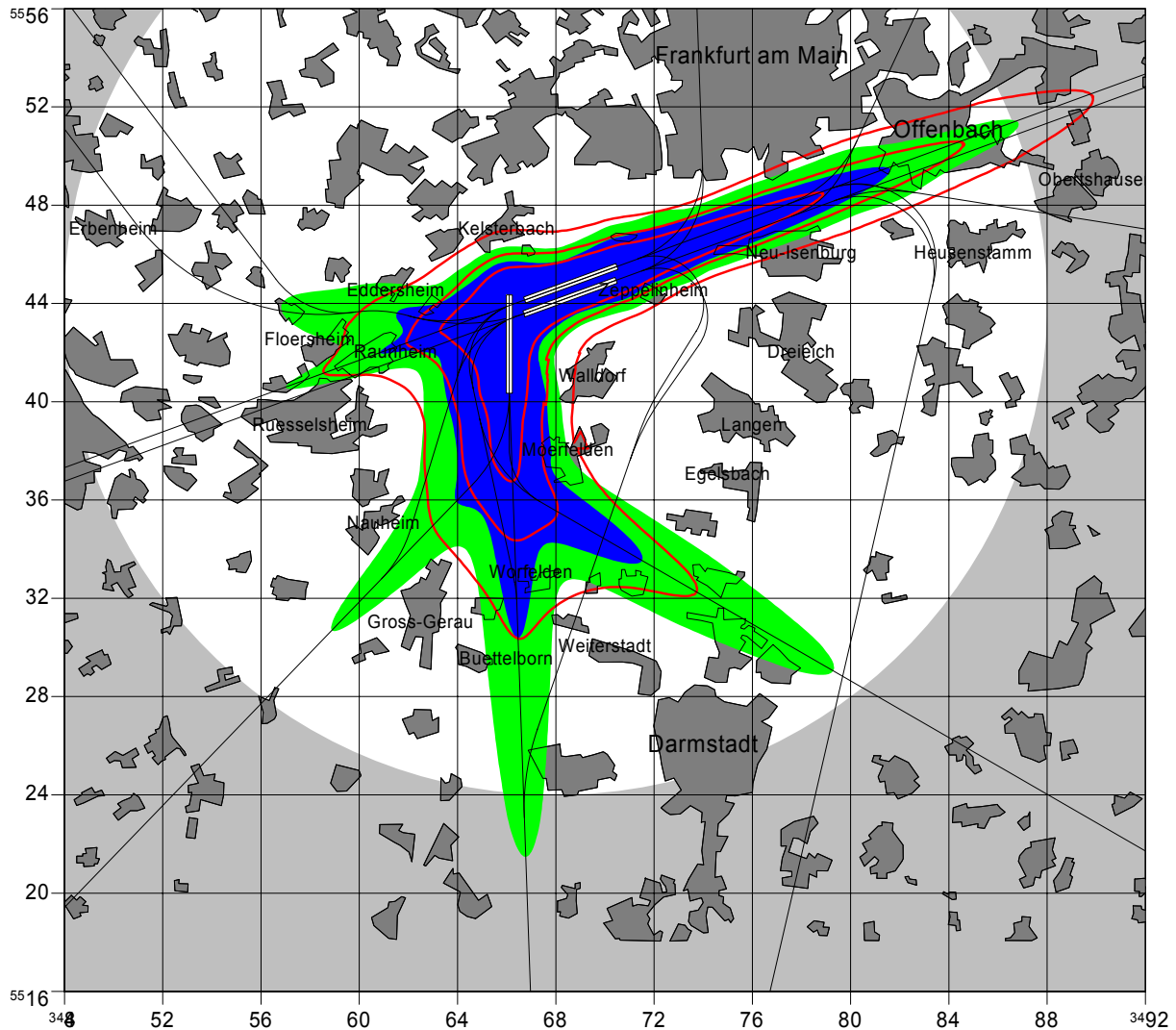
**Abbildung 3-4: Vergleich der Dosis-Wirkungsbeziehungen (Labor – Feld). Beschreibung der Modelle (random effects logistic regression) im Text.**

Die geringere Reaktionswahrscheinlichkeit im Feld im Vergleich zum Labor wurde 1995 in 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 [4] in einer Studie, in der Versuchspersonen zu Hause über Lautsprecher mit Verkehrsgeräuschen beschallt wurden, dass die Reaktionswahrscheinlichkeiten in der gewohnten Umgebung tatsächlich geringer ausfielen als aus Laborstudien bekannt. Die Aufwachwahrscheinlichkeiten zu Hause waren jedoch immer noch höher als die von Pearsons [3-3] 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 Geräuschszenario** eine Rolle zu spielen.

#### 3.7.2.4. 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 keimnal, 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. Diese Gebiete unterscheiden sich qualitativ z.T. deutlich von den Zonen, die alleine auf akustischen Kriterien beruhen (s. Abbildung 3-5).



**Abbildung 3-5: Vergleich von Gebieten am Frankfurter Flughafen, in denen ein  $L_{eq(3)}$  von 55 dB(A) (blau) bzw. 50 dB(A) (grün) überschritten wird, mit Gebieten, außerhalb derer im Mittel mit weniger als 1 (äußerste Linie), 2 oder 3 (innerste Linie) Aufwachreaktionen zusätzlich durch Fluglärm zu rechnen ist.**

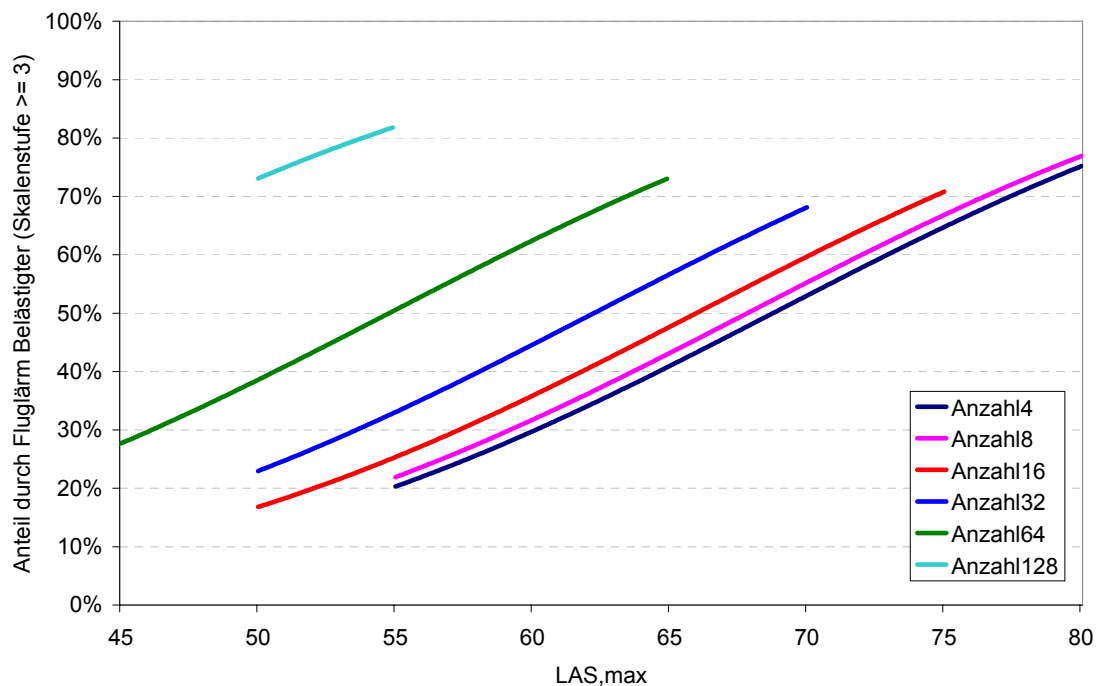
### 3.7.3. Belästigung

Es finden sich keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Ermüdung (FAT), die Befindlichkeit (MDBF) sowie die Erholung und Beanspruchung (EBF).

Für die statistisch wichtigste psychologische Lärmwirkung - die Belästigung durch Lärm – wurden signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Labor- als auch Feldstudien erhebungen anhand von logistischen Regressionsanalysen mit Zufallseffekten (logistic regression with random effects) abgeleitet. Zur Generierung einer dichotomen abhängigen Belästigungsvariablen wurden die Kategorien 3 bis 5 der ursprünglich 5-stufigen Antwortskala zu einem Wert zusammengefasst (d.h. Vorliegen einer Belästigung durch Fluglärm), die Stufen 1 und 2 indizierten keine Belästigung. Da sich lediglich 20% aller Belästigungseinstufungen in den Laborstudien und nur 4% aller Einstufungen in den Felduntersuchungen auf die Stufen 4 und 5 verteilen, erfolgte keine Betrachtung der Bewertungen auf den oberen 25-30% der Skala, die nach dem so genannten Schultz-Kriterium [3-5] die Gruppe der „ziemlich“ belästigten Personen (highly annoyed) konstituieren. Eine Beschränkung auf diesen Anteil der Personen hat zudem den Nachteil, dass der (quantitativ ebenfalls bedeutende) Teil der Per-

sonen, deren Lärmbelastigung im mittleren Bereich der verwendeten Antwortskala liegt, ignoriert wird.

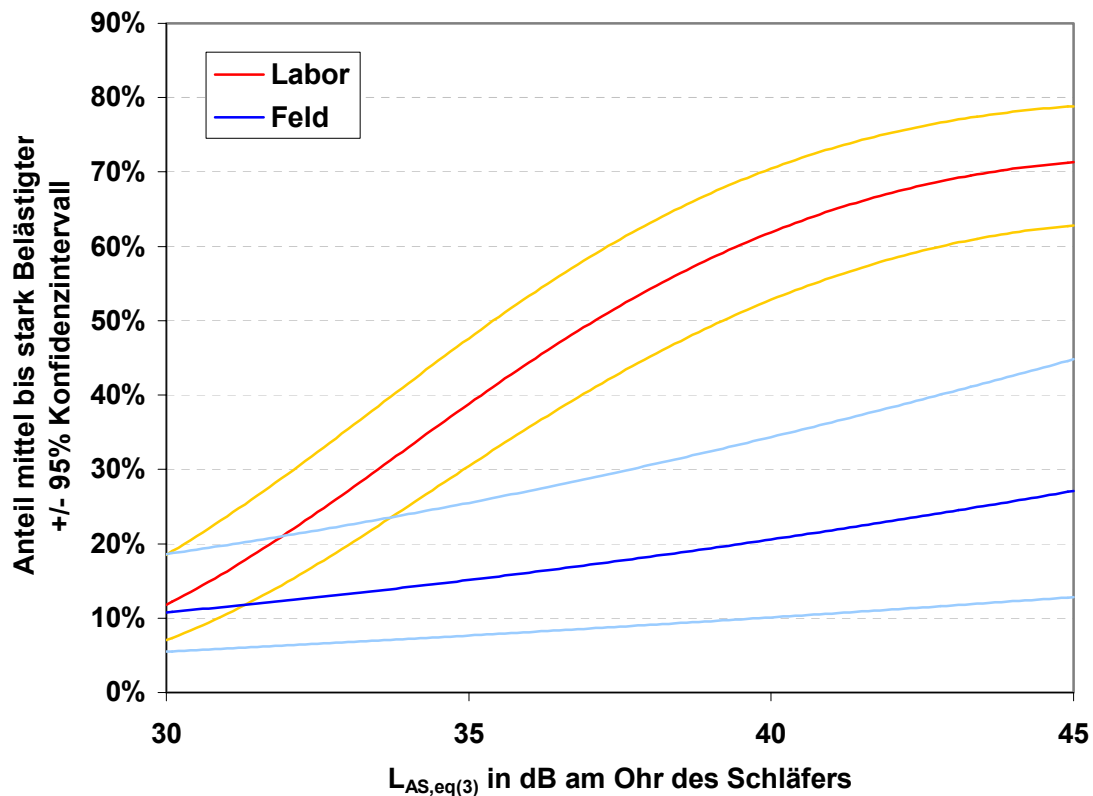
Da in der Literatur sowohl der  $L_{AS,eq}$  [3-6] als auch der  $L_{AS,max}$  zusammen mit der Anzahl an Fluglärmereignissen [3-7,-8] als valide physikalische Indikatoren zur Beschreibung der Fluglärmelastigung angesehen werden, wurden für die Laborerhebungen jeweils zwei logistische Regressionsmodelle entwickelt. Für die Feldstudien wurde für die Anzahl an nächtlichen Flugereignissen und den  $L_{AS,eq}$  je ein spezifisches Modell abgeleitet. In alle Modelle wurden fluglärmspezifische (eingestufte Gesundheitsschädlichkeit, Vermeidbarkeit und Notwendigkeit des Flugverkehrs, allgemeine Einstellung zum Flugverkehr, Gesundheitsgefährdung durch Fluglärm) und personale (Vorbelastigung durch Fluglärm, Lärmempfindlichkeit, Gewöhnung an Fluglärm, Alter, Geschlecht) Moderatoren integriert und auf Signifikanz geprüft.



**Abbildung 3-6: Durch Regressionsmodell L1 vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter (Skalenstufe 3 bis 5) in Abhängigkeit vom Maximalpegel  $L_{AS,max}$  und der Anzahl an Flugereignissen.**

In den laborspezifischen Regressionsmodellen L1 (Anzahl und  $L_{AS,max}$ ) und L2 ( $L_{AS,eq}$ ) erweisen sich das Geschlecht (vorhergesagter Anteil durch Fluglärm belästigter Personen bei Frauen höher), die Vorbelastigung durch Fluglärm (je vorbelastigter, desto höher der Anteil Fluglärmelastigter) und die eingestufte Notwendigkeit des Flugverkehrs (je geringer die Notwendigkeit, desto höher der Anteil Belästigter) als signifikante psychologische Einflussgrößen. Nach der Schätzung von L1 haben sowohl der  $L_{AS,max}$  als auch die Anzahl an Fluglärmereignissen einen signifikanten Einfluss auf die Fluglärmelastigung (s. Abbildung 3-6). Das Ausmaß an Belästigung wächst linear sowohl mit Ansteigen des  $L_{AS,max}$  als auch der Häufigkeit von Ereignissen, was mit Befunden aus bisherigen Feldstudien zur Fluglärmwirkung übereinstimmt. 128 mal 55 dB(A) führen zum höchsten Anteil prognostizierter Lärmbelästigter von über 80%. Im Gegensatz zu vorangegangenen Felduntersuchungen steigt der Teil der Belästigten auch bei wenigen Flugbewegungen (< 16 Überflüge pro Nacht) mit zunehmendem  $L_{AS,max}$  signifikant an. L2 prognostiziert einen signifikanten Zuwachs an Belästigten mit steigendem  $L_{AS,eq}$  (15% bei 30,6 dB(A) bis 70% bei 46,6 dB(A)) (ohne Abbildung).

In die feldspezifischen Regressionsmodellen F1 (Anzahl) und F2 ( $L_{AS,eq}$ ) fließen die Gewöhnung an Fluglärm (je geringer die Gewöhnung, desto höher der Anteil Fluglärm-belästigter) und zusätzlich in F1 das Alter (je älter, desto höher der Anteil Belästigter) als signifikante psychologische Moderatoren ein. Nach F1 hat die Anzahl an Flugbewegungen eine signifikante Wirkung auf die Fluglärm-belastigung (ohne Abbildung). Der Anteil an belästigten Personen nimmt mit dem Anstieg der Häufigkeit von Ereignissen zu. 128 Fluglärmsituationen pro Nacht bedingen das höchste Ausmaß an Lärm-belastigten (etwa 55%). F2 sagt eine signifikante Zunahme des Teils an Belästigten mit ansteigendem  $L_{AS,eq}$  vorher, der sein Maximum bei 47,3 dB(A) mit etwa 30% erreicht (Abbildung 3-7).



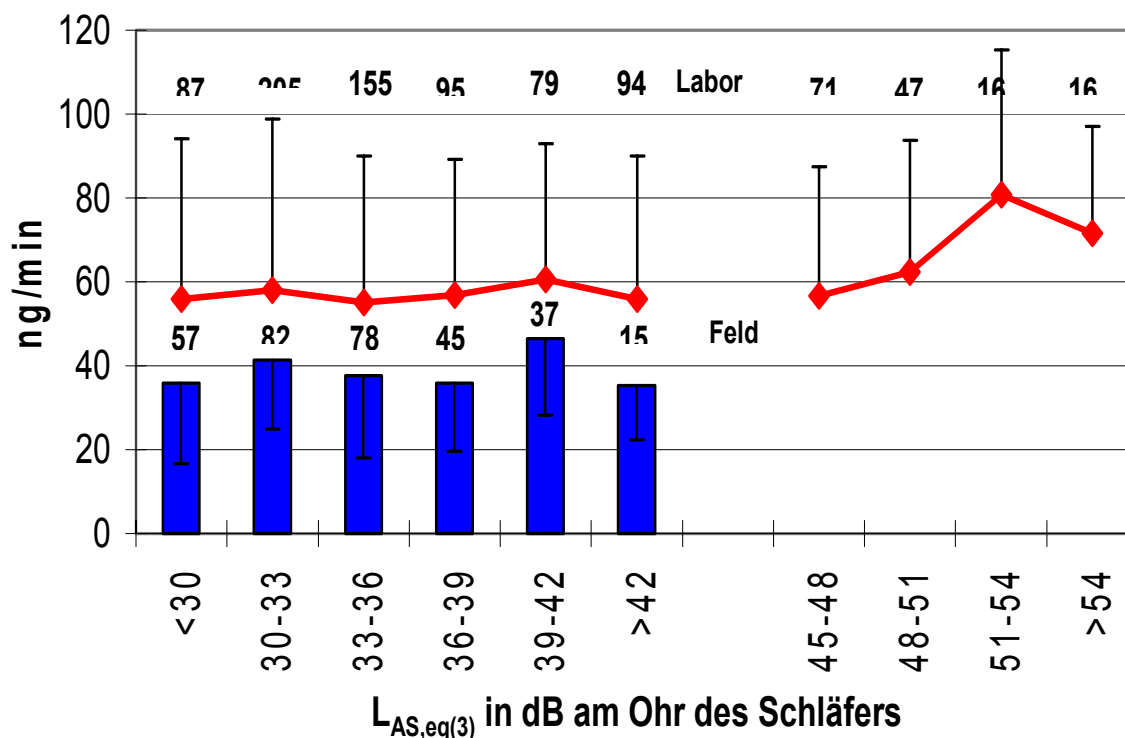
**Abbildung 3-7: Durch labor- und feldspezifische Regressionsmodelle L2 und F2 vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter (Skalenstufe 3 bis 5) in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel  $L_{AS,eq}$ .**

Vergleicht man die aus den Regressionsmodellen abgeleiteten labor- und feldspezifischen Dosis-Wirkungs-Kurven für gemeinsame Wertebereiche des  $L_{AS,eq}$  zeigt sich, dass die aus L2 vorhergesagte Kurve deutlich über der Feldkurve liegt (bis zu 40%-Punkte Unterschied) (Abbildung 3-7). Bei einem  $L_{AS,eq}$  von 30,6 dB(A) ist der prognostizierte Teil Fluglärm-belästigter in beiden Untersuchungssettings noch annähernd gleich (12% bis 15%). Bei 47,3 dB(A) sind es 30% im Feld gegenüber über 70% im Labor, d.h., dass die Probanden im Schlaflabor durch den nächtlichen Fluglärm signifikant belästigter als bei den Felduntersuchungen zu Hause waren. Es muss jedoch beachtet werden, dass in die Labor- und Feldmodelle unterschiedliche psychologische Einflussgrößen integriert wurden (Labor: Geschlecht, Vorbelastigung durch Fluglärm, eingestufte Notwendigkeit des Flugverkehrs; Feld: Gewöhnung an Fluglärm).

#### 3.7.4. 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  $L_{AS,eq}$  ergab sich ein entsprechender Trend (s. Abbildung 3-8). 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.



**Abbildung 3-8:** Mittlere Cortisolausscheidung ( $\pm$  Standardabweichung) im nächtlichen Sammelurin unter Laborbedingungen ( $n = 88$ , nur Experimentalgruppen mit identischer Bestimmungsmethode, Linie) und im Feld ( $n = 64$ , Balken) bei Einteilung des mittleren äquivalenten Dauerschallpegels in 3 dB breite Klassen.

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.

### 3.7.5. Leistung

Bezüglich der am Morgen gemessenen Leistungsvariablen konnten in den bisherigen statistischen Analysen keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen ermittelt werden. Die bisherigen Ergebnisse der Leistungsmessungen zeigen keine relevante Beeinträchtigung unter

nächtlichem Lärmeinfluss. Die in Abschnitt 3.7.2.2. beschriebenen Ergebnisse zum Schlaf zeigen eine Verminderung der Gesamt-Schlafzeit von durchschnittlich weniger als 2 min. Von daher ist es kaum zu erwarten, dass eine signifikante Beeinträchtigung der Leistung eintritt. Hingegen wurden relevante Einflüsse in den hier betrachteten Leistungsparametern in einer vergleichenden Studie zum partiellen Schlafentzug erst bei einem Schlafentzug von jeweils drei Stunden in mehreren aufeinander folgenden Nächten gefunden.

Da die hier präsentierten Mittelwerte die Leistung aller Probanden umfassen, könnte es sinnvoll sein, eine Differenzierung hinsichtlich der Teilnehmer vorzunehmen, die von ihrem Schlafverhalten her besonders empfindlich auf die nächtliche Lärmbeeinflussung reagierten und daher möglicherweise auch eine Beeinträchtigung ihrer Tagesleistungsfähigkeit aufweisen; ebenso ist noch zu analysieren, ob die Zahl der lärminduzierten Aufwachreaktionen besonders in dieser Gruppe einen überproportional höheren Einfluss ausübte als die reine Verminderung der Schlafzeit.

### **3.8. 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 Auf-

wachreaktionen entwickelt. Ähnliches lässt sich für andere physiologische Funktionen entwickeln.

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

### 3.9. Zusammenfassung

Im Rahmen des HGF/DLR-Projekts „Leiser Flugverkehr“ wurde bei 192 schlafgesunden Versuchspersonen im Alter zwischen 18 und 65 Jahren in 2.240 Nächten in Labor- und Feldstudien die Wirkung von Nachtfluglärm auf den Schlaf (durch Polysomnografie), auf die Stresshormonausscheidung (durch die Bestimmung von Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol aus dem nächtlichen Sammelurin), auf die Leistung (abendliche und morgendliche Durchführung von Computer-Leistungstests) und auf die Belästigung, Ermüdung, Befindlichkeit und Erholung und Beanspruchung (durch subjektive Einschätzungen) untersucht. Aufwachreaktionen auf Fluglärmereignisse wurden durch die simultane Aufzeichnung von elektrophysiologischen und akustischen Signalen erfasst.

In den Feldstudien (im Bereich des Köln-Bonner Flughafens) wurden durchschnittlich 41 Überflüge pro untersuchter Nacht registriert. 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. Innen lagen die Werte zwischen 20 dB(A) und 73 dB(A), im Mittel bei 44 dB(A). Der auf Fluggeräusche bezogene mittlere energieäquivalente Dauerschallpegel zwischen 0 Uhr und 6 Uhr betrug außen 53,9 dB(A) und am Ohr des Schlafers 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.

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

Es finden sich keine signifikanten Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die subjektive Einschätzung der Ermüdung, der Befindlichkeit und der Erholung und Beanspruchung. Dagegen ergab sich eine signifikante Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen dem energieäquivalenten Dauerschallpegel der Fluggeräusche und dem Anteil der Versuchspersonen, der sich mittel bis stark durch Fluglärm belästigt fühlte. Der Belästigungsgrad im Feld war erheblich geringer als im Labor, auch bei Zugrundelegung vergleichbarer äquivalenter Dauerschallpegel.

Bei den Ausscheidungsraten der Stresshormone Adrenalin und Noradrenalin wurde keine signifikante Veränderung ermittelt. Bei Cortisol wurde nur unter Laborbedingungen ein signifikanter Trend mit wachsenden Lärmpegeln gefunden, dagegen unter Feldbedingungen keine Veränderungen diagnostiziert.

Im Labor wurde bei dem Vergleich aller Lärmnächte mit den lärmfreien Basisnächten eine statistisch nicht signifikante Verkürzung der Schlafzeit um etwa zwei Minuten festgestellt. Gleichzeitig wurden Veränderungen in der Schlafstruktur ermittelt: Der Tiefschlafanteil war zugunsten oberflächlicher Schlafstadien verkürzt, jedoch statistisch nicht signifikant.

Erste Aufwachreaktionen wurden im Feld oberhalb einer Schwelle von etwa 33 dB(A), gemessen am Ohr des Schlafers, beobachtet. Eine Schwelle wurde im Labor oberhalb von 45 dB(A) nicht beobachtet (Geräusche mit Maximalpegeln kleiner als 45 dB(A) wurden im Labor nicht eingespielt). Alle nachgewiesenen Effekte waren unter Feldbedingungen erheblich geringer als unter Laborbedingungen.

Dosis-Wirkungs-Beziehungen für fluglärmbedingte, elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen wurden erstmalig mit einer sehr hohen Präzision entwickelt. Die Basis dafür wurde im Labor durch über 30.000 eingespielte Lärmereignisse, im Feld durch mehr als 15.000 gemessene Fluggeräusche erzielt. Aufgrund dieser hohen Fallzahl konnten präzise

Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen dem Maximalpegel eines Fluggeräuschs und dem Auftreten von Aufwachreaktionen bestimmt werden.

Unter Zugrundelegung dieser sehr großen Datenbasis wurde ein Prognosemodell entwickelt, welches für gegebene akustische Verhältnisse an einem Flughafen Vorhersagen über die Wahrscheinlichkeit von fluglärmbedingten Aufwachreaktionen machen kann. 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 keimnal, genau einmal, genau zweimal usw. zusätzlich durch nächtlichen Fluglärm wahrscheinlich 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.

### 3.10. Literatur

- [3-1] AGARD-AG-308 (1989): ISBN 92-835-0510-7, Human Performance Assessment Methods
- [3-2] Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gerlich, A., Luks, N., Maaß, H., Mawet, L., Müller, E.-W., Müller, U., Plath, G., Quehl, J., Samel, A., Schulze, M., Vejvoda, M., Wenzel, J. (2004): Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung. DLR-FB 2004-07/D
- [3-3] Pearsons, K., Barber, D., Tabachnick, B.G., Fidell, S. (1995): Predicting noise-induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustical Society of America* 97(1): 331-338
- [3-4] Hume, K., Whitehead, C. (2003): Sleep disturbance due to introduced aircraft noise. In: de Jong, R. G., Houtgast, T., Franssen, E. A. M., and Hofman, W. (Editors): *Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem*. 199-200
- [3-5] Schultz, T.J. (1978): Synthesis of social surveys on noise annoyance. *Journal of the Acoustical Society of America* 64(2): 377-405
- [3-6] Aasvang G.M., Engdahl B. (1999): Aircraft noise in recreational areas: A quasi-experimental field study on individual annoyance responses and dose-response relationships. *Noise Control Eng.J.* 47(4): 158-162
- [3-7] Bjorkman, M., Ahrlin, U., Rylander, R. (1992): Aircraft noise annoyance and average versus maximum noise levels. *Archives of Environmental Health* 47(5): 326-329
- [3-8] Sato, T., Yano, T., Björkman, M., Rylander, R. (1999): Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level. *Journal of Sound and Vibration* 223: 775-784