

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

Forschungsbericht 2004-07/D

Nachtfluglärmwirkungen
Band 1
Zusammenfassung

M. Basner
H. Buess
D. Elmenhorst
A. Gerlich
N. Luks
H. Maaß
L. Mawet
E.-W. Müller
U. Müller
G. Plath
J. Quehl
A. Samel
M. Schulze
M. Vejvoda
J. Wenzel

Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
Köln

93 Seiten
25 Bilder
7 Tabellen
30 Literaturstellen



Nachtfluglärmwirkungen

Band 1

Zusammenfassung

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
Abteilung Flugphysiologie
Linder Höhe
51147 Köln
flugphysiologie@dlr.de
www.dlr.de/flugphysiologie

Köln, im April 2004

Institutsleiter:
Prof. Dr. med. R. Gerzer

Verfasser:
M. Basner, H. Buess, D. Elmenhorst,
A. Gerlich, N. Luks, H. Maaß,
L. Mawet, E.-W. Müller, U. Müller,
G. Plath, J. Quehl, A. Samel,
M. Schulze, M. Vejvoda, J. Wenzel

Abteilungsleiter:
Dr. A. Samel

Fluglärm, Schlaf, EEG, Aktometer, Leistung, Konzentration, Stress, Cortisol, Noradrenalin, Adrenalin, Belästigung, logistische Regression

Mathias BASNER et al.

Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des DLR, Köln

Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung

DLR-Forschungsbericht 2004-07/D, 2004, 93 Seiten, 25 Bilder, 7 Tabellen, 30 Literaturstellen

Im Zeitraum von 1999 bis 2003 führte das DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin im Rahmen des HGF/DLR-Projekts "Leiser Flugverkehr" umfangreiche Untersuchungen zu humanspezifischen Wirkungen nächtlichen Fluglärms durch. 128 Versuchspersonen wurden in vier repräsentativen Laborstudien über 13 aufeinanderfolgende Nächte untersucht. Zwischen 23:00 und 07:00 Uhr wurden zwischen 4 und 128 Fluggeräusche mit Maximalpegeln zwischen 45 und 80 dB(A) über Lautsprecher realitätsnah eingespielt. Folgende elektrophysiologische Variablen wurden kontinuierlich erfasst: EEG, EOG, EMG, EKG, Atmungsbewegungen, Atemfluss, Fingerpulsamplitude, Position und Aktometrie. Die Stresshormone Adrenalin, Noradrenalin und Cortisol wurden im nächtlichen Sammelurin bestimmt. Die subjektive Einschätzung der Belastung und Belästigung wurde mit standardisierten Fragebögen erfasst. Computergestützte Leistungstests wurden jeweils abends und morgens durchgeführt. 64 Anrainer des Köln-Bonner Flughafens wurden mit identischer Technik in ihrer gewohnten Umgebung in neun aufeinanderfolgenden Nächten untersucht, wobei der Schallpegel außen und innen (am Ohr des Schläfers) kontinuierlich gemessen wurde. In den Labor- und Feldstudien wurden somit insgesamt 2.240 Probandennächte polysomnografisch untersucht. Die simultane Aufzeichnung von elektrophysiologischen und akustischen Parametern erlaubte eine ereigniskorrelierte Auswertung mit einer Auflösung von 125 ms. Die Versuchspersonen beiderlei Geschlechts waren zwischen 18 und 65 Jahre alt, altersentsprechend schlafgesund und normalhörend. In diesem Band werden neben dem Studiendesign und der Methodik die wichtigsten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Eine umfassendere Darstellung erfolgt in den Forschungsberichten DLR-FB-2004-08/D bis DLR-FB-2004-11/D.

aircraft noise, sleep, EEG, actimetry, performance, concentration, stress, cortisol, adrenalin, noradrenalin, annoyance, logistic regression

(Published in German)

Mathias BASNER et al.

Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin des DLR, Köln

Effects of Nocturnal Aircraft Noise (Volume 1): Executive Summary

DLR-Forschungsbericht 2004-07/D, 2004, 93 pages, 25 figures, 7 tables, 30 references

From 1999 until 2003, the DLR-Institute of Aerospace Medicine conducted extensive investigations on human specific effects of nocturnal aircraft noise within the framework of the HGF/DLR-project "Leiser Flugverkehr". 128 subjects were investigated for 13 consecutive nights in four representative laboratory studies. From 11 p.m. until 7 a.m. between 4 and 128 aircraft noise events with maximum sound pressure levels between 45 and 80 dB(A) were played back in a realistic fashion. The following electrophysiological variables were continuously sampled during the night: EEG, EOG, EMG, EKG, respiratory movements, airflow, finger pulse amplitude, position and actimetry. Concentrations of the stress hormones adrenalin, noradrenalin and cortisol were analyzed in all night urine samples. Subjective assessments of strain and annoyance were collected with standardized questionnaires. Computer assisted performance tests were performed every evening and morning by the subjects. 64 residents of Cologne-Bonn Airport were investigated in their own homes for nine consecutive nights with methods identical to those in the laboratory. Here, sound pressure levels outside and inside the bedroom (at the sleeper's ear) were sampled continuously. In total, 2,240 study nights were polysomnographically investigated. The simultaneous recording of electrophysiological and acoustic data allowed for an event related analysis with a resolution of 125 ms. The age of both male and female subjects was between 18 and 65 years. Subjects did not suffer from intrinsic sleep disorders and had normal hearing thresholds. This volume gives an overview of study design and methods and summarizes the most important findings. For more detailed descriptions and analyses please refer to the research reports DLR-FB-2004-08/E to DLR-FB-2004-11/E.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AGARD	Advisory Group for Aerospace Research and Development
AMSAN	Arbeitsmedizinische Simulationsanlage
AWR	Aufwachreaktionen
CTS	Criterion Task Set
dB	Dezibel, physik. Einheit des Schalldruckpegels
dB(A)	physik. Einheit des A-bewerteten Schalldruckpegels
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
df	Freiheitsgrade
EBF	Erholungs- und Belastungsfragebogen
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
F	F-Wert
FA	allgemeiner Fragebogen Fluglärm
FAT	Ermüdungsfragebogen
FFT	Fast Fourier Transformation
FN-L	spezieller Fragebogen Fluglärm
HCl	Salzsäure
HGF	Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren
kHz	Kilohertz, physik. Einheit der Frequenz
L _{AS}	A-bewerteter Schalldruckpegel gemessen mit der Zeitbewertung „slow“
L _{AS,eq}	energieäquivalenter Dauerschallpegel (=zeitlicher Mittelwert) des in der Zeitbewertung „slow“ gemessenen, A-bewerteten Schalldruck- pegels
L _{AS,eq_event}	energieäquivalenter Dauerschallpegel (=zeitlicher Mittelwert eines Einzelschallereignisses) des in der Zeitbewertung „slow“ gemessenen, A-bewerteten Schalldruckpegels
L _{AS,eq_night}	energieäquivalenter Dauerschallpegel (=zeitlicher Mittelwert aller Schallereignisse einer Nacht) des in der Zeitbewertung „slow“ gemes- senen, A-bewerteten Schalldruckpegels

Abkürzung	Bedeutung
$L_{AS,max}$	Maximalwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, gemessen mit der Zeitbewertung „slow“
L_p	Schalldruckpegel
LRA	logistische Regressionsanalyse
MDBF	Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen
min	Minuten
ml	Mililiter
mm	Milimeter
MS	Mittel der Quadrate
ms	Milisekunden
MST	Memory Search Task
ng	Nanogramm
NREM-Schlaf	Schlafstadien 1 bis 4
Q.d.V.	Quelle der Variationen
QS	Quadratsumme
R&K	Rechtschaffen und Kales
REM-Schlaf	Traumschlaf (rapid-eye-movement sleep)
sd	standard deviation
s	Sekunden
S1-4	Schlafstadium 1-4
Sig von F	Signifikanz von F
SPT	Dauer der Schlafperiode (sleep period time)
SRT	Single Reaction Task
std	Stunden
STRAIN	Study on human specific Response to Aircraft Noise
STRES	Standardized Tests for Research for Environmental Stressors
TST	totale Schlafzeit (total sleep time)
UTT	Unstable Tracking Task
VP	Versuchspersonen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziele des Hauptarbeitspakets	3
3	Studiendesign und Methoden	5
3.1	Studiendesign.....	5
3.2	Probandenauswahl	7
3.3	Beschreibung der Stichprobe	10
3.4	Akustik.....	13
3.4.1	Akustik in den Laborstudien.....	13
3.4.2	Akustik in den Feldstudien	18
3.5	Elektrophysiologie	20
3.6	Klinisch-chemische Methoden	21
3.7	Leistung	22
3.8	Psychologie	22
3.9	Auswertung	23
4	Akustik – Ergebnisse und Diskussion der Feldstudien-Daten	24
5	Schlaf	29
5.1	Einfluss von Nachtfluglärm auf den Schlaf.....	32
5.2	Methodik	33
5.3	Einfluss von Nachtfluglärm auf Gesamtschlafparameter	35

5.4	Ereigniskorrelierte Auswertung	41
5.4.1	Was ist ein geeigneter Deskriptor für lärmbedingte Schlafstörungen?	41
5.4.2	Methodik.....	45
5.4.3	Ergebnisse der Laborstudien.....	45
5.4.4	Ergebnisse der Feldstudien	51
5.4.5	Vergleich der Ergebnisse von Labor- und Feldstudie.....	57
5.5	Aufwachdauer.....	60
5.6	Wiedereinschlafen	62
5.7	Bedeutung der Ergebnisse für die Diskussion von Fluglärmschutzkriterien.....	64
5.8	Anwendung der Ergebnisse auf einen deutschen Verkehrsflughafen	66
6	Psychologie	69
7	Stresshormone	74
8	Leistung.....	79
9	Zusammenfassung.....	84
10	Literatur.....	87

1 Einleitung

Alexander Samel

In dem HGF/DLR-Projekt „Leiser Flugverkehr“ entwickelte das DLR einen Katalog, mit dem technische, operationelle und gesetzliche Maßnahmen zur Minderung des Fluglärms verbessert werden können. Innerhalb dieses Projekts war es die Aufgabe des Hauptarbeitspakets 1 „Humanspezifische Wirkungen des Nachtfluglärms“, in umfangreichen Studien die Grundlagen für ein verbessertes Verständnis der Wirkungen von Nachtfluglärm auf den Schlaf der betroffenen Menschen zu schaffen.

Wesentlicher Grund für diese Forschungsaktivität ist der Mangel an ausreichend großen Studien, bei denen der Schlaf polysomnografisch aufgezeichnet wurde. Dieser Mangel lässt eine verlässliche Beurteilung von fluglärmbedingten Schlafstörungen und deren akute Folgen bisher nur sehr bedingt zu. Zwar werden von verschiedener Seite aus präventivmedizinischer Sicht Vorschläge zu unterschiedlichen Grenzwerten gemacht, diese beruhen aber zum großen Teil auf Datenmaterial aus bisherigen Primärstudien mit sehr wenigen Probanden. Diese Studien kommen darüber hinaus zu teilweise widersprüchlichen Ergebnissen, und lassen zudem in der Methodik, in der Durchführung, in der Auswertung und/oder in den auf den Untersuchungsergebnissen basierenden Schlussfolgerungen erhebliche Defizite erkennen. Die Empfehlungen orientieren sich demnach an Studienergebnissen, die mit unterschiedlichen Methoden an häufig sehr kleinen Untersuchungsgruppen erzielt wurden und führen deshalb immer wieder zu heftigen Diskussionen unter Lärmwirkungsforschern und interessierten Gruppen.

In dieser Situation führte das DLR zwischen 1999 und 2003 mehrere Studien unter Verwendung gleichartiger Methoden an einem großen Kollektiv durch, um die wissenschaftliche Datenbasis erheblich zu verbreitern. Durch

Untersuchungsreihen unter Laborbedingungen und unter Feldbedingungen, d.h. bei Betroffenen zu Hause, war ein direkter Vergleich zwischen simulierten und realen Bedingungen möglich.

2 Ziele des Hauptarbeitspakets

Alexander Samel

Das übergeordnete Ziel war die Entwicklung von Bewertungskriterien für die Wirkung von nächtlichem Fluglärm. Damit sollte eine breitere wissenschaftliche Grundlage für gezielte Lärminderungsstrategien technischer und betrieblicher Art sowie für Planungsmaßnahmen geschaffen werden. Ein wichtiges zweites Ziel war die Entwicklung einer Datenbasis von akustischen, physiologischen und psychologischen Funktionen und Parametern, die in einem möglichst repräsentativen Querschnitt von durch nächtlichen Fluglärm Betroffenen gewonnen wurden.

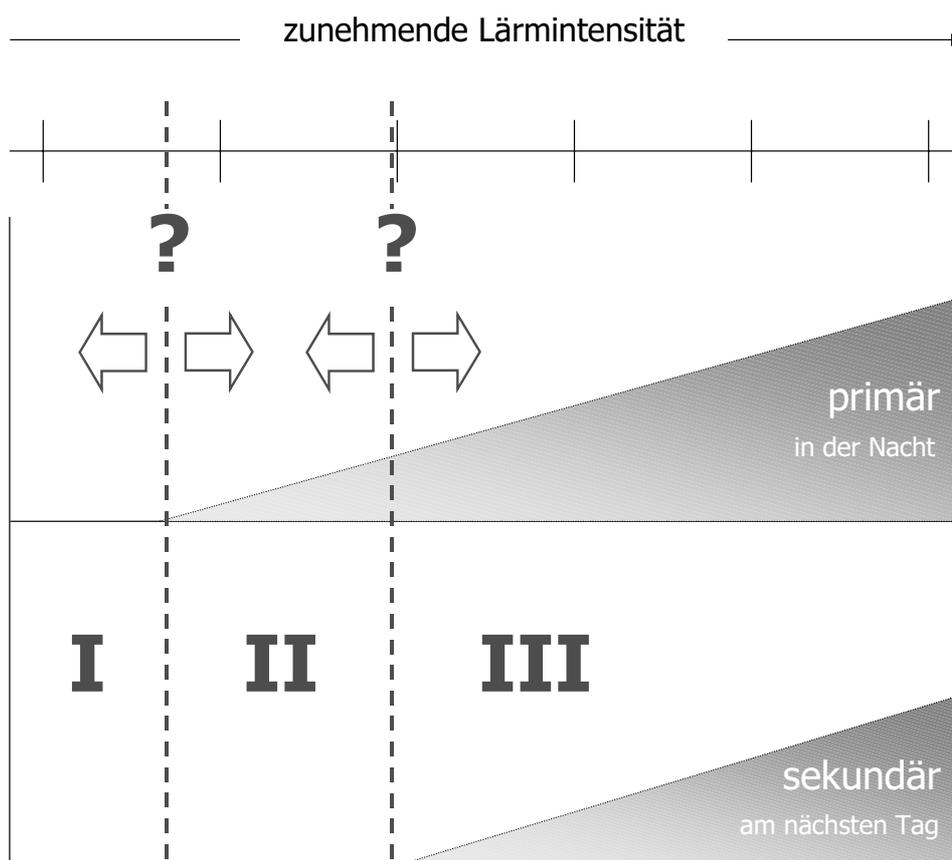


Abbildung 2.1: Entwicklung von Bewertungskriterien anhand primärer und sekundärer Schlafstörungen.

Die Entwicklung von Bewertungskriterien ergibt sich aus der Bestimmung von Dosis-Wirkungsbeziehungen und Schwellenwerten für Reaktionen unterschiedlicher Art, sofern sie vorhanden und durch geeignete Experimente nachweisbar sind.

Dabei ist wichtig, ob sich derartige Beziehungen und Werte für primäre oder sekundäre Schlafstörungen zeigen: Primäre Störungen sind die, die sich in der Nacht als unmittelbare Reaktionen auf Fluglärm manifestieren (z.B. vegetative Arousal, Aufwachreaktionen, vermehrte Ausscheidung von Stresshormonen); sekundäre Schlafstörungen zeichnen sich durch Reaktionen am folgenden Tag aus (z.B. Verminderung der Leistung, Erhöhung der Ermüdung und Belästigung). Bei der Diskussion um Schwellenwerte und Dosis-Wirkungsbeziehungen kann man davon ausgehen, dass es einen Lärmbereich gibt, der zu keinen messbaren Reaktionen auf Lärmereignisse führt (Abbildung 2.1). Oberhalb einer Schwelle wird es – interindividuell unterschiedlich – zu Reaktionen im Schlaf kommen (Primärreaktionen), die aber kurzfristig kompensationsfähig sind und nicht zu Veränderungen am nächsten Tag führen. Bei einer weiteren Steigerung des nächtlichen Lärms ist zu erwarten, dass, möglicherweise beginnend ab einer weiteren Schwelle, die wiederum individuell unterschiedlich sein kann, durch primäre Störungen verursachte sekundäre Reaktionen auftreten. Sofern sich sekundäre Störungen längerfristig manifestieren, können tertiäre Wirkungen (d.h. Beeinträchtigungen der Gesundheit) als eine Ursache unter vielen nicht ausgeschlossen werden (in einer multifaktoriellen Genese).

Aus dem Nachweis von Dosis-Wirkungsbeziehungen bzw. Schwellenwerten für primäre bzw. sekundäre Störungen können Bewertungskriterien entwickelt werden. Es ist anzunehmen, dass, sofern keine (oder kompensationsfähige) primäre bzw. sekundäre Dosis-Wirkungsbeziehungen auftreten, die Ausbildung von Gesundheitsstörungen (tertiäre Schlafstörungen) eher unwahrscheinlich ist.

3 Studiendesign und Methoden

Mathias Basner

3.1 Studiendesign

Die Studie fand im Zeitraum September 1999 bis Juni 2003 statt. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die zeitliche Abfolge der verschiedenen Studienabschnitte.

Name	Zeitraum	Art
STRAIN I	September bis November 1999	Laborstudie
STRAIN II	Mai bis Juli 2000	Laborstudie
STRAIN III	Februar bis April 2001	Laborstudie
STRAIN V	September 2001 bis Mai 2002	Feldstudie
STRAIN VI	Mai 2002 bis November 2002	Feldstudie
STRAIN IV	März bis Juni 2003	Laborstudie

Tabelle 3.1: Zeitliche Abfolge der Abschnitte der Studie STRAIN (STudies on human specific Response to Aircraft Noise)

In den Laborstudien wurden 128 Versuchspersonen während 13 aufeinander folgender Nächte untersucht, in den Feldstudien waren es 64 Probanden in neun aufeinander folgenden Nächten. Die Messungen starteten jeweils an einem Montag, um für beide Kollektive gleichartige Bedingungen bzgl. der Wochentage einzuhalten.

Während der Laborversuche wurden jeweils acht Probanden gleichzeitig untersucht. Dazu stand die Arbeitsmedizinische Simulationsanlage (AM-SAN) des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrt zur Verfügung. Von den 13 untersuchten Nächten diente die erste Nacht als Anpassungs-, die zweite

als Basis- und die 12. und 13. Nacht als Erholungs Nächte, in denen kein Lärm eingespielt wurde. 16 Versuchspersonen standen als Kontrollgruppe zur Verfügung. Bei ihnen wurde während der gesamten 13 Nächte im Labor kein Fluglärm eingespielt, um unter kontrollierten Bedingungen den normalen Schlaf zu ermitteln. Die 112 Probanden der Experimentalgruppe wurden in neun Nächten (Nächte drei bis elf) mit Fluglärm unterschiedlicher Stärke und Häufigkeit beschallt. In allen Nächten war der Beginn der Nachtruhe (Zu-Bett-Geh-Zeit) 23:00 Uhr, das Wecken fand um 7:00 Uhr statt, so dass eine Schlafzeit von maximal 8 Stunden ermöglicht wurde. Insgesamt wurden im Labor 1072 Lärmnächte und 592 Nächte ohne Beschallung (Anpassung, Kontrolle) erfasst.

Für die Feldversuche wurden Gebiete im Raum des Köln-Bonner Flughafens ausgesucht, die möglichst stark durch Fluglärm und möglichst gering durch andere Verkehrslärmarten belastet waren. Da witterungsbedingt Flugrouten wechseln bzw. die Anzahl der Flugbewegungen vom Wochentag abhängt, wurden in neun aufeinander folgenden, das Wochenende einschließenden Nächten Messungen durchgeführt. Dabei wurden neben den Innen- und Außengeräuschen dieselben Funktionen wie im Labor erfasst (s.u.). Im Unterschied zur den Laborstudien konnte die Schlafzeit individuell gewählt werden. Allerdings sollte eine Mindestbettzeit zwischen Mitternacht und 6:00 Uhr gewährleistet sein. In den Feldstudien wurden 64 Probanden in 576 Nächten beobachtet.

Insgesamt wurden in den Labor- und Feldstudien 2.240 Probandennächte aufgezeichnet. 20 Probanden nahmen sowohl an den Labor- als auch an den Feldversuchen teil.

Das Studienprotokoll wurde durch die Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein genehmigt. Die Probanden wurden entsprechend der Deklaration von Helsinki aufgeklärt und nahmen freiwillig an den Studien teil; sie konnten den Versuch jederzeit abbrechen.

Die Versuchspersonen erhielten eine Aufwandsentschädigung in Höhe von € 75,- (Feldstudie) bzw. € 55,- (Laborstudie) pro untersuchter Nacht. Das Training der Computer-Leistungstests vor Studienbeginn wurde ebenfalls mit bis zu € 350,- entschädigt.

3.2 Probandenauswahl

Die Versuchspersonen wurden in einem mehrstufigen Auswahlverfahren ausgesucht. Ein Bewerber musste bis zur endgültigen Auswahl folgende Schritte durchlaufen:

- Eingangsfragebogen FA ausfüllen und zurückschicken
- an der Informationsveranstaltung teilnehmen und FPI-Fragebogen [9] ausfüllen
- an der medizinischen Voruntersuchung (Anamnese, körperliche Untersuchung, EKG, Blut- und Urinprobe, Hörtest) teilnehmen
- konstante Leistungen am Ende von 40 Trainingssitzungen des Computer-Leistungstests (s. Kapitel 3.7) zeigen

Eine genaue Darstellung des mehrstufigen Auswahlverfahrens findet sich im Forschungsbericht DLR-FB 2004-08/D: "Nachtfluglärmwirkungen Band 2: Studiendesign und Methodik, Akustik".

Die Bewerber mussten bestimmte Auswahlkriterien erfüllen, um an der Studie teilnehmen zu können. Mit dem Ausschluss bestimmter Bewerber wurde versucht, die Gültigkeit der gefundenen Ergebnisse für die Stichprobe zu erhöhen (interne Validität). Außerdem sollte die Stichprobe möglichst repräsentativ sein, um eine Übertragung der Ergebnisse auf die Gesamtbevölkerung zu ermöglichen (externe Validität).

Im Folgenden werden die wichtigsten Auswahlkriterien kurz beschrieben und begründet. Die Auswahl erfolgte in der Regel so, dass auf den Ergeb-

nissen der Studie beruhende Empfehlungen eher im Sinne der betroffenen Bevölkerung ausfielen, d.h. Fluglärmwirkungen eher über- als unterschätzten.

In der Studie wurden ausschließlich Personen im **Alter** von 18 bis 65 Jahren untersucht. Eine Untersuchung von Kindern über einen Zeitraum von 9 bzw. 13 Nächten war ethisch nicht vertretbar. Menschen mit einem Lebensalter über 65 Jahren hätten nicht zwangsläufig aus der Studie ausgeschlossen werden müssen. Bei einer beschränkten Anzahl von zu untersuchenden Versuchspersonen hätte ein noch weiterer Altersbereich jedoch dazu geführt, dass die Schätzungen für einzelne Altersklassen aufgrund der geringeren Besetzung unpräziser geworden wären. Außerdem ist nicht davon auszugehen, dass die Empfindlichkeit gegenüber Fluglärm von über 65jährigen plötzlich und überproportional steigt, so dass Trends, die bis zum Alter von 65 Jahren gefunden werden, zunächst fortgeschrieben werden können.

Es wurde durch eine geeignete Auswahl darauf geachtet, dass die Versuchspersonen **altersentsprechend schlafgesund** waren. 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 Flug-

lärm" minus "spontan auftretende Aufwachreaktionen" (s. Kapitel 5). 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.

Es wurden bestimmte Ansprüche an die **Schlafgewohnheiten** der Bewerber gestellt. Bewerber für die Laborstudien sollten nicht regelmäßig tagsüber schlafen, weil Nickerchen tagsüber während der Laborstudie nicht erlaubt waren. Die Bewerber sollten regelmäßig mindestens sechs und nicht mehr als zehn Stunden schlafen, weil sie sich sonst nur schwer an die strikten Schlafzeiten von 23:00 Uhr bis 7:00 Uhr in den Laborstudien gewöhnen hätten. Regelmäßiges zu Bett gehen vor 21:00 Uhr bzw. nach 1:00 Uhr führten ebenso wie regelmäßige Nachtarbeit zum Ausschluss aus dem Bewerbungsverfahren. Außerdem sollten die Bewerber nicht regelmäßig öfter als zweimal in der Nacht zur Toilette gehen, da jeder Toilettengang im Labor, abgesehen von der Störung des eigenen Schlafs, mit einer potentiellen Störung des Schlafs der anderen Versuchspersonen verbunden war.

Alle Studienteilnehmer sollten mindestens ein "annähernd normales **Hörvermögen**" zeigen. Deshalb durfte der Hörverlust auf dem schlechteren Ohr altersabhängig nicht mehr als 10% (18 bis 33 Jahre), 15% (34 bis 49 Jahre) bzw. 20% (50 bis 65 Jahre) betragen.

Bewerber mit **Herzrhythmusstörungen** wurden ausgeschlossen, weil sie die Analyse von EKG- und Fingerpulsamplitude erheblich erschwert bzw. unmöglich gemacht hätten.

Bewerber, die regelmäßig **Medikamente** mit zentral dämpfender Wirkung einnahmen, wurden ausgeschlossen, da letztere zu einer Anhebung der Weckschwelle im Schlaf und zu einer Beeinflussung der Leistungstests führen können.

Für die Feststellung der **psychologischen Eignung**, die für das Zusammenleben im Labor von hoher Bedeutung ist, wurde das Freiburger Persönlichkeitsinventar (FPI, s.u.) verwendet. Die Kriterien wurden hinsichtlich der Prognose der sozialen Verträglichkeit, der psychischen sowie physischen Labilität erstellt. Darüber hinaus wurden diejenigen Personen ermittelt, deren Antwortverhalten auf eine übermäßige Antworttendenz im Sinne der "sozialen Erwünschtheit" schließen ließ, und damit Zweifel an der Auswertbarkeit der während der Studie auszufüllenden Fragebogen zuließ.

Die Bewerber mussten der deutschen Sprache mächtig sein. Ansteckende Krankheiten waren zum Schutz der übrigen Versuchspersonen nicht erlaubt. Es durften keine Suchtmittelerkrankungen vorliegen. Klaustrophobische Bewerber wurden von den Schlaflaborstudien ausgeschlossen, da die einzelnen Schlafkabinen recht klein sind und das Labor unterirdisch liegt.

Es wird an dieser Stelle betont, dass andere als die oben beschriebenen Erkrankungen und die mit ihnen verbundenen Besonderheiten ausdrücklich erlaubt waren, solange sie nicht den Ablauf des Versuchs behinderten.

3.3 Beschreibung der Stichprobe

In Labor- und Feldstudie wurden geringfügig mehr Frauen als Männer untersucht (s. Tabelle 3.2), wobei sich in der Laborstudie etwas mehr Männer (52,1%), in der Feldstudie hingegen etwas mehr Frauen (50,6%) bewarben.

	Geschlecht	
	männlich	weiblich
Laborstudie Probanden (n=128)	41,4%	58,6%
Feldstudie Probanden (n=64)	45,3%	54,7%

Tabelle 3.2: Geschlechtsverteilung von Probanden aus den Labor- und Feldstudien.

Tabelle 3.3 zeigt die Alterszusammensetzung der Teilnehmer der Labor- und Feldstudie.

	Altersklassen (Bereich in Jahren)						Alter
	18-25	26-33	34-41	42-49	50-57	58-65	MW (SD)
Laborstudie Probanden (n=128)	19,5%	27,3%	14,1%	14,8%	13,3%	10,9%	38 (13)
Feldstudie Probanden (n=64)	25,0%	14,1%	20,3%	23,4%	9,4%	7,8%	37 (13)

Tabelle 3.3: Verteilung von Probanden aus Labor- und Feldstudie auf sechs Altersklassen mit einer Klassengröße von jeweils acht Jahren (MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung).

Ursprüngliches Ziel war es, eine möglichst gleichmäßige Altersverteilung zu erreichen, um über den gesamten Altersbereich ähnlich präzise Aussagen treffen zu können. Hierfür hätte jede Klasse mit ca. 17% besetzt sein müssen. Es wird ersichtlich, dass dieses Ziel nicht vollständig, aber ausreichend gut erreicht wurde.

Die **Belästigung** der Versuchspersonen durch Fluglärm stellt einen wichtigen Moderator dar, weshalb sie entsprechend bei der Auswahl berücksichtigt wurde. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass die subjektive Einschätzung der *Belästigung* durch Fluglärm nicht mit der tatsächlichen *Belas-*

tung durch Fluglärm gleichgesetzt werden darf. Aus der psychologischen Forschung ist vielmehr bekannt, dass nur ungefähr ein Drittel der Belästigungswirkung auf die tatsächliche Belastung durch Fluglärm zurückgeführt werden kann. Es ist also durchaus möglich, dass sich jemand stark durch Fluglärm belästigt fühlt, ohne tatsächlich stark belastet zu sein und umgekehrt.

Tabelle 3.4 vergleicht die Verteilung von Probanden aus den Labor- und Feldstudien, den Bewerbern für die Laborstudien STRAIN I bis III und einer für die Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2000 repräsentativen Bevölkerungsgruppe [18] auf fünf Belästigungskategorien. Für den letzten Studienabschnitt der Laborstudie und für die Feldstudie wurde die subjektive Einschätzung der Belästigung durch Fluglärm erst nach der Studienteilnahme mit dem FA2-Fragebogen erhoben, weshalb nur für die Bewerber der Studienabschnitte I bis III entsprechende Daten vorliegen.

	Belästigung durch Fluglärm				
	nicht	wenig	mittelmäßig	ziemlich	sehr
Deutschland 2000 Ortscheid und Wende [18]	67,5%	17,7%	9,1%	3,7%	2,0%
STRAIN I bis III Bewerber (n=763)	43,4%	33,2%	13,1%	7,5%	2,9%
Laborstudien Probanden (n=128)	29,7%	38,3%	19,5%	8,6%	3,9%
Feldstudien Probanden (n=64)	3,1%	21,9%	39,1%	28,1%	7,8%

Tabelle 3.4: Belästigung durch Fluglärm – ein Vergleich.

Die Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland verteilt sich sehr ungleichmäßig auf die fünf Belästigungsstufen. Das liegt daran, dass viele Menschen in Gegenden befragt wurden, die nicht im akustischen Einzugs-

gebiet eines Flughafens liegen. Mehr als zwei Drittel der Befragten fühlten sich in dieser Umfrage nicht durch Fluglärm belästigt. Da ein Großteil der Bewerber für die Laborstudien STRAIN I bis III aus der Umgebung des Köln-Bonner Flughafens stammte, in dessen Nähe sich auch das Schlaflabor des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin befindet, fühlten sich in dieser Gruppe nur noch 43,4% nicht durch Fluglärm belästigt.

Vor dem Hintergrund der Verteilung der Belästigung durch Fluglärm in der Gruppe der Bewerber wird deutlich, dass das Anstreben einer Gleichverteilung über die fünf Kategorien hier, im Gegensatz zu Alter und Geschlecht, illusorisch war: Nur 7,5% der Bewerber fühlten sich durch Fluglärm ziemlich belästigt, und sogar nur 2,9% sehr belästigt. Das Auswahlverfahren in den Laborstudien sorgte dafür, dass die Kategorien "mittelmäßig", "ziemlich" und "sehr belästigt" bei den Probanden stärker als bei den Bewerbern und auf Kosten der Kategorien "nicht" und "wenig" besetzt waren. Immerhin zwei Drittel der Teilnehmer der Laborstudie fühlte sich in irgendeiner Form durch Fluglärm belästigt. In den Feldstudien fühlte sich ein Drittel der Teilnehmer "ziemlich" oder "sehr" durch Fluglärm belästigt. Hier waren nur 3,1% der Teilnehmer nicht durch Fluglärm belästigt, im Gegensatz zu 67,5% der Gesamtbevölkerung.

3.4 Akustik

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie die Fluggeräusche in den Laborstudien aufgezeichnet und wiedergegeben wurden, bzw. wie die Aufnahme der Geräusche in den Feldstudien erfolgte.

3.4.1 Akustik in den Laborstudien

Während der Nächte 3 bis 11 wurden im Zeitraum zwischen 23:15 Uhr und 6:45 Uhr zwischen 4 und 128 Geräusche von startenden oder landenden Flugzeugen mit Maximalpegeln $L_{AS,max}$ zwischen 50 und 80 dB(A) einge-

spielt. In der letzten Versuchsphase der Laborstudie wurden zusätzlich Geräusche mit einem Maximalpegel von 45 dB(A) eingespielt. Der Abstand im Maximalpegel zwischen den einzelnen Geräuschen betrug 5 dB(A), so dass insgesamt 14 verschiedene Fluggeräusche verwendet wurden.

Die verwendeten Maximalpegel-Häufigkeitskombinationen können Tabelle 3.5 entnommen werden.

		Anzahl Fluggeräusche startend						Anzahl Fluggeräusche landend						
		4	8	16	32	64	128	4	8	16	32	64	128	
Maximalpegel $L_{As,max}$ in dB	45												32	
	50			16	16	16	16			16	16	16	16	
	55	24	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	60	24	16	16	16	16		16	16	16	16	16		
	65	16	16	16	16	16		16	16	16	16	40		
	70	16	16	16	16			16	16	16	16			
	75	16	16	16				16	16	16				
	80	16	16					16	8					

Tabelle 3.5: Die in den vier Laborstudien verwendeten Maximalpegel-Häufigkeitskombinationen (Beispiel: 24 Untersuchungsächte mit 4x60 dB(A) am Ohr des Schlafers startend). Von der Häufigkeit 16 abweichende Kombinationen sind rot markiert.

Die Kombinationen 4x50 dB(A) und 8x50 dB(A) kamen nicht zum Einsatz, weil in diesem Bereich keine relevanten Reaktionen erwartet wurden. Auf der anderen Seite wurde auf die Kombinationen 128x60 bis 128x80 dB(A), 64x70 bis 64x80 dB(A), 32x75 dB(A), 32x80 dB(A) und 16x80 dB(A) verzichtet, weil hier davon ausgegangen wurde, dass diese Belastungen zum einen in der Realität nicht vorkommen und zum anderen von den Versuchspersonen eventuell nicht toleriert worden wären und zum Abbruch der Studie geführt hätten.

Das Ziel, jede der vorgesehenen Kombinationen in jeder Kategorie (startend/landend) mit mindestens 16 Versuchsächten zu besetzen, gelang bis

auf die Kombination 8x80 dB(A) landend. Die verstärkte Besetzung der Kombinationen 64x45 dB(A) landend und 64x65 dB(A) landend resultiert aus einem speziellen Unterversuch, in dem beide Kombinationen miteinander verglichen werden sollten (s.u.). Die Kombinationen 4x55 dB(A) und 4x60 dB(A) waren stärker besetzt, weil sie sich knapp unterhalb des sogenannten Jansen-Kriteriums befinden und deshalb besonders abgesichert werden sollten.

Die in der Nacht eingespielten Fluggeräusche wurden mit geeichten Klasse-1-Schallpegelmessern der Firma Cortex in der Nähe des Flughafens Düsseldorf bei gekippten oder geschlossenen Fenstern aufgenommen. Das Mikrofon befand sich bei Aufnahme der Geräusche in Nähe des Kopfkissens, also sozusagen am "Ohr des Schläfers".

In einer Studiennacht wurde immer nur ein einziges Fluggeräusch verwendet (z.B. nur 50 dB(A) startend), d.h. innerhalb einer Nacht wurden verschiedene Fluggeräusche nicht gemischt. Alle acht Versuchspersonen einer Studienphase erhielten in der jeweiligen Studiennacht dasselbe Geräuschmuster, d.h. bei jeder Versuchsperson wurde zur gleichen Zeit das gleiche Fluggeräusch eingespielt. Da die einzelnen Schlafräume nicht ausreichend schallisoliert waren, hätte ein zeitlich versetztes Einspielen zu einer Wahrnehmung von Fluggeräuschen aus dem Nachbarraum führen können.

Zwischen 4 und 128 Geräusche wurden gleichverteilt über die Nacht zwischen 23:15 Uhr und 6:45 Uhr eingespielt. Der Abstand zwischen zwei Geräuschen betrug bei 4 Geräuschen 120 Minuten, bei 8 Geräuschen 60 Minuten, bei 16 Geräuschen 30 Minuten, bei 32 Geräuschen 15 Minuten, bei 64 Geräuschen 7 oder 8 Minuten und bei 128 Geräuschen 3 oder 4 Minuten (s. Abbildung 3.1). Da die Versuchspersonen von der Gleichverteilung der Geräusche über die Nacht nichts wussten, war eine Antizipation des Auftretenszeitpunktes des nächsten Fluggeräusches nicht möglich. Uhren und Wecker im Schlafraum waren nicht erlaubt.

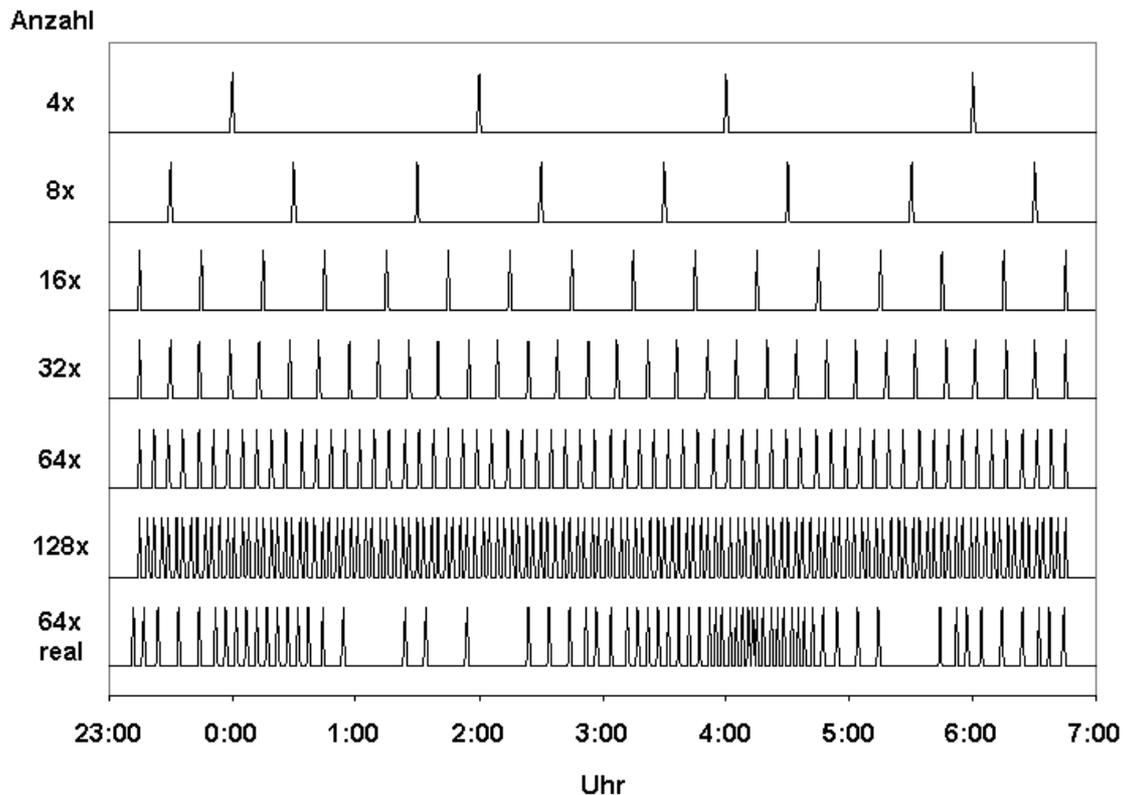


Abbildung 3.1: Einspielmuster in Abhängigkeit von der Anzahl der Fluggeräusche. Ganz unten das realitätsnahe Muster, welches aus den Feldstudien abgeleitet und in Nacht 12 von STRAIN IV mit $L_{AS,max}$ 65 dB(A) eingespielt wurde.

Die Einspielung dieser Fluggeräusche im Schlaflabor wurde mit Hilfe der Akustik Workstation CF85 der Firma Cortex vorgenommen. Die Schlafkabinen wurden zuvor mit geeichten Klasse-1-Schallpegelmessern akustisch vermessen, um die realitätsnahe Wiedergabe der Fluggeräusche zu gewährleisten.

Der Schalldruckpegel wurde während der Nacht kontinuierlich mit einem Mikrofon aufgezeichnet, um zu kontrollieren, ob die Fluggeräusche auch tatsächlich in allen Schlafräumen zum vorgesehenen Zeitpunkt eingespielt wurden. Außerdem konnten laut schnarchende Versuchspersonen mithilfe des Mikrofons identifiziert werden.

Mit Beginn der Abspielung eines Fluggeräusches wurde ein digitales Triggersignal ausgegeben, welches zusammen mit den elektrophysiologischen Daten mit einer Abtastrate von 8 Hz aufgezeichnet wurde. Somit lagen alle

Signale auf einer gemeinsamen Zeitachse, wodurch eine ereigniskorrelierte Auswertung mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu 125 ms ermöglicht wurde.

Die Versuchspersonen wussten nur, dass die ersten beiden Nächte lärmfrei waren. Ansonsten waren sie gegenüber der Beschallung "verblindet", d.h. die sie wussten nicht, wann, wie viele und welche Fluggeräusche nach der zweiten Nacht eingespielt wurden. Um unterbewusste Beeinflussungen der Versuchspersonen durch die Versuchsleiter zu verhindern, wurden diese ebenso "verblindet", d.h. auch sie wussten nicht, welches Geräuschemuster in der Nacht eingespielt wurde. Erst nach dem Start der Aufzeichnung informierten sich die Untersucher über das Geräuschemuster der jeweiligen Nacht, um die korrekte Einspielung kontrollieren zu können.

Insgesamt wurden 34.688 Fluggeräusche im Schlaflabor eingespielt. Der energieäquivalente Dauerschallpegel [DIN1] in Abhängigkeit von der Maximalpegel-Häufigkeitskombination kann Tabelle 3.6 entnommen werden. Im Schlaflabor herrschte ein durch die Klimaanlage hervorgerufenen, konstantes Hintergrundgeräusch von knapp 30 dB(A).

	Anzahl Fluggeräusche startend						Anzahl Fluggeräusche landend						
	4	8	16	32	64	128	4	8	16	32	64	128	
Maximalpegel $L_{AS,max}$ in dB	45										24,5		
											31,0		
	50			28,0	31,0	34,0	37,0			22,7	25,7	28,7	31,7
				32,1	33,5	35,4	37,7			30,7	31,3	32,3	33,8
	55	25,1	28,1	31,1	34,1	37,1	40,1	21,8	24,7	27,7	30,7	33,7	36,7
		31,2	32,1	33,6	35,5	37,8	40,5	30,6	31,1	32,0	33,3	35,2	37,5
	60	31,7	34,7	37,7	40,7	43,7		26,7	29,5	32,5	35,5	38,6	
		33,9	35,9	38,3	41,0	43,9		31,7	32,8	34,4	36,6	39,1	
65	36,7	39,7	42,7	45,7	48,6		31,7	34,7	37,7	40,7	43,7		
	37,5	40,1	42,9	45,8	48,6		33,9	36,0	38,4	41,1	43,9		
70	41,1	44,1	47,1	50,2			36,0	39,0	42,0	45,1			
	41,4	44,3	47,2	50,2			37,0	39,5	42,3	45,2			
75	46,5	49,5	52,5				42,1	45,1	48,1				
	46,6	49,6	52,6				42,3	45,2	48,2				
80	51,5	54,5					45,6	48,7					
	51,5	54,5					45,8	48,7					

Tabelle 3.6: Energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{AS,eq}(3)$ in Abhängigkeit von der Maximalpegel-Häufigkeitskombination (oben und fettgedruckt: nur Fluglärm, unten: Fluglärm plus konstantem Hintergrundpegel von ca. 30 dB(A)).

3.4.2 Akustik in den Feldstudien

Die beiden Feldstudien STRAIN V und VI wurden bei Anwohnern des Flughafens Köln/Bonn durchgeführt. In diesem Kapitel soll der Aufbau der Akustik in den Feldstudien beschrieben werden. Für die Ergebnisse der Auswertung der akustischen Signale siehe Kapitel 4.

In den Feldstudien wurde lediglich der Fluglärm gemessen, der durch den Flugverkehr des Köln/Bonner-Flughafens hervorgerufen wurde, d.h. es wurde kein zusätzlicher Fluglärm über Lautsprecher eingespielt. Der akustische Aufbau ist schematisch in Abbildung 3.2 dargestellt.

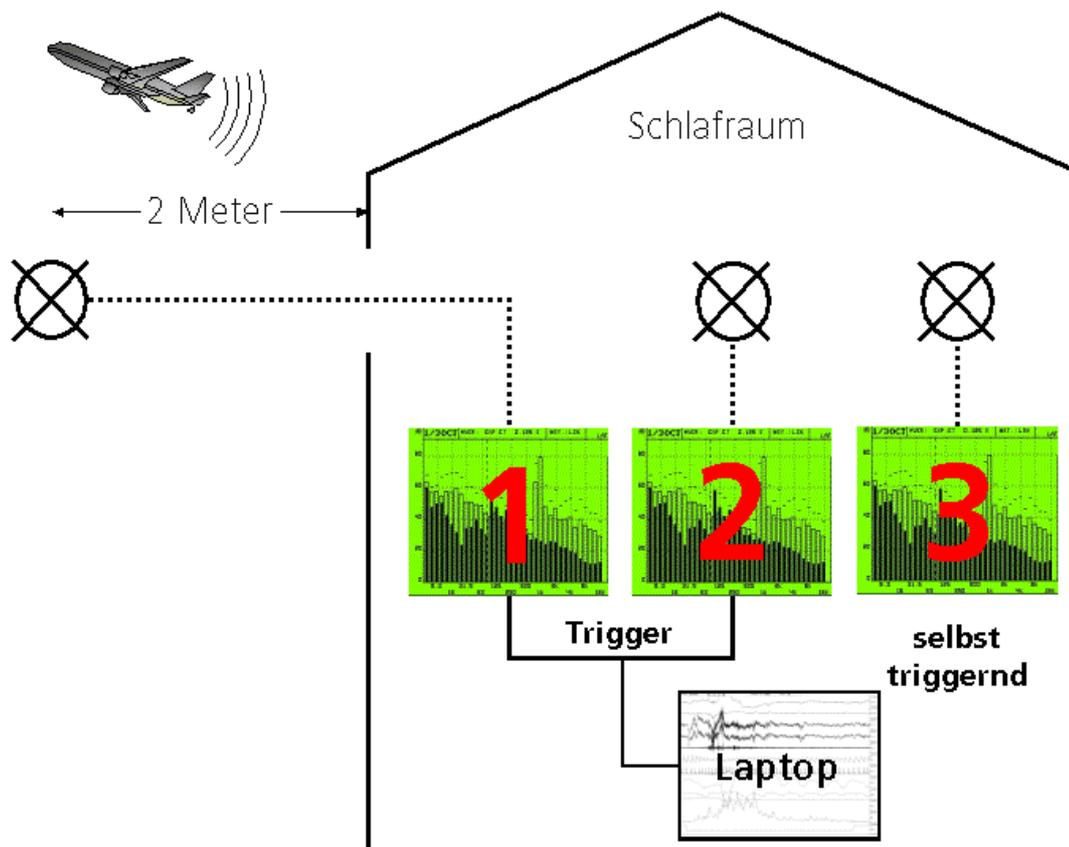


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Akustik in den Feldstudien STRAIN V und VI

Es wurde gleichzeitig mit drei Klasse-1-Schallpegelmessern (NC10, Cortex Instruments) gemessen. Ein Schallpegelmesser (#1) zeichnete die Außengeräusche mit einem in zwei Meter Entfernung vor dem Fenster angebrachten Mikrofon auf, während zwei weitere Schallpegelmesser (#2 und #3) die Innengeräusche möglichst nah am Ohr des Schlafers aufzeichneten.

Der Schallpegel (L_{AS} und L_{in}) wurde kontinuierlich über die gesamte Nacht gemessen und aufgezeichnet. Sobald ein bestimmter Hintergrundpegel (L_{90}) überschritten wurde (in der Regel um mehr als 4 dB), zeichnete #1 das tatsächliche Geräusch mit 24 kHz solange auf, bis die Differenz zum Hintergrundpegel wieder weniger als 4 dB betrug, mindestens jedoch 30 s lang. Die einzelnen Geräusche wurden als wav-Dateien abgelegt. Hiermit war eine Identifizierung der Geräuschquelle (Flugzeug, Straßenverkehr, Schienenverkehr, etc.) möglich. Gleichzeitig wurde mit dem Beginn der Aufzeichnung Schallpegelmesser #2 getriggert, der das Geräusch dann ebenfalls und zeitgleich mit #1, nun allerdings im Schlafraum, aufzeichnete.

Durch die zeitsynchrone Aufnahme des Geräusches innen und außen konnten demnach Aussagen über die Dämpfungseigenschaften der Fenster und des Mauerwerks gewonnen werden (s. Kapitel 4).

Das Triggersignal wurde, ähnlich wie in der Laborstudie, zeitgleich mit den elektrophysiologischen Signalen mit einer Abtastrate von 8 Hz aufgezeichnet, so dass auch in der Feldstudie eine ereigniskorrelierte Auswertung von Wirkungen des Fluglärms auf physiologische Reaktionen mit einer Auflösung von maximal 125 ms ermöglicht wurde.

Ein dritter Schallpegelmesser (#3) zeichnete Geräusche im Schlafraum dann auf, sobald ein bestimmter Hintergrundpegel überschritten wurde (auch hier in der Regel um mehr als 4 dB). Hiermit konnten Geräusch identifiziert werden, die allein im Haus entstanden (z.B. Schnarchen) und durch Schallpegelmesser #2, da dieser von außen getriggert wurde, nicht hätten bestimmt werden können.

3.5 Elektrophysiologie

Alle elektrophysiologischen Signale wurden zeitgleich während der Nacht erfasst, über eine analog-digital Schnittstelle gewandelt und verstärkt und mittels Lichtwellenleiter auf einen PC (Labor) oder Laptop (Feld) übertragen, dort für die spätere Analyse gespeichert und zur Verlaufskontrolle online auf einem Bildschirm dargestellt. Simultan wurden die akustischen Signale mit aufgezeichnet.

Die Schlafstadien wurden klassisch nach Rechtschaffen und Kales [21] durch polysomnografische Ableitungen in jeder Nacht bestimmt. Das Elektroenzephalogramm (EEG) wurde mit Hilfe von Silber/Silberchlorid-Elektroden in den Positionen A1, A2, C3 und C4 erfasst, das Elektrookullogramm (EOG) durch Applikation von Elektroden am rechten und linken Auge und das Elektromyogramm (EMG) durch Fixierung von Elektroden oberhalb der Kinnmuskulatur.

Um vegetative Veränderungen während des Schlafs zu erfassen, wurden das EKG und die Fingerpulsamplitude ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet. Die Atmung wurde durch ein Brustband und einen Thermistor erfasst; sie dienten dazu, etwaige atmungsbedingte Schlafstörungen zu diagnostizieren. Am Brustband war zusätzlich ein Lagesensor angebracht, um Veränderungen der Position im Bett feststellen zu können.

Die gleichzeitige Aufzeichnung der unterschiedlichen elektrophysiologischen Signale und der Geräusche erlaubte es, zwischen spontanen Reaktionen und durch Lärm induzierte Reaktionen zu unterscheiden.

Zusätzliche Informationen wurden durch Aktometer erzielt, die von den Probanden während der gesamten Studiendauer (also auch tagsüber) getragen wurden.

3.6 Klinisch-chemische Methoden

In den Laborversuchen wurden die Ausscheidungsraten der Stresshormone Cortisol, Adrenalin und Noradrenalin aus zwei definierten täglichen Urinsammelperioden bestimmt: Zwischen 19:00 Uhr und 23:00 Uhr (Abendurin) und zwischen 23:00 Uhr und 7:00 Uhr (Nachturin).

Bei den Felduntersuchungen wurde nur der Nachturin zwischen der Zubett-Geh-Zeit (abends) und der Zeit des Erwachens (morgens) gesammelt.

Die Proben für Adrenalin und Noradrenalin wurden mittels Hochdruck-Flüssigkeits-Chromatographie (HPLC) und elektrischem Detektor analysiert. Freies Cortisol im Urin wurde durch Immunoassays bestimmt, bei 164 Probanden durch ein Radio-Immuno-Assay (RIA). Bei 32 Laborprobanden wurde der Urin mit Hilfe eines Festphasen-Chemiluminiszenz-Enzymimmunoassays-Verfahren (LEIA) analysiert. Da beide Verfahren nicht direkt miteinander vergleichbar sind, wurden in der statistischen Analyse hier auch relative Änderungen (zur Basisnacht – Nacht 2) betrachtet.

3.7 Leistung

Das wichtigste objektive Verfahren zur Erfassung sekundärer Folgen der nächtlichen Lärmeinwirkung stellt die Erfassung der mentalen Leistungsparameter mit Hilfe einer computergestützten Testbatterie dar.

Die Tests zur Erfassung der mentalen Leistungsfähigkeit sind der sogenannten AGARD-STRES-Batterie [8] entnommen und umfassten:

- Einzelreaktionsaufgabe ("Single Reaction Time" – SRT)
- Erinnerungs- und Suchaufgabe mit 4 Buchstaben ("Memory Search Task" – MS4)
- Erinnerungs- und Suchaufgabe mit 6 Buchstaben ("Memory Search Task" – MS6)
- Auge-Hand-Koordinierungsaufgabe ("Unstable Tracking Task" – UTT)

Um während der Labor- und Felduntersuchungen stabile Ausgangsbedingungen zu erreichen, wurde in einer Vorbereitungszeit vor den Versuchen jeder Proband in 40 Trainingseinheiten auf die Bearbeitung der Tests trainiert. Alle Leistungstests (Gesamtdauer ca. 25 min.) wurden abends (ca. 2 Stunden vor dem Zu-Bett-Gehen) und morgens (nach dem Wecken und Aufstehen) zur gleichen Zeit ausgeführt, um insbesondere morgens potentielle Effekte einer gestörten Nachtruhe zu detektieren.

3.8 Psychologie

Die Untersuchung der psychologischen Wirkungen des Nachtfluglärms beinhaltete die Erfassung von Veränderungen des subjektiv empfundenen Schlaferlebens, der Belästigung, Befindlichkeit, Beanspruchung und Erholung in Abhängigkeit von der nächtlichen Fluglärmeinexposition. Dazu wurden in den Labor- und Felduntersuchungen folgende standardisierte Fragebögen verwendet:

- Fatigue Checklist FAT [26]
- Fluglärmfragebogen FNL [5]
- Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen MDBF [29]
- Erholungs- und Belastungsfragebogen EBF [13]

Alle erhobenen psychologischen Variablen wurden in Relation zu physikalischen Fluglärmparametern (Maximalpegel $L_{AS,max}$, energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{AS,eq}$, Anzahl von Flugereignissen) gesetzt, um Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen akustischer Belastung und resultierender Reaktion aufzuzeigen.

3.9 Auswertung

Hinweise zu den für die Analyse verwendeten statistischen Verfahren können den einzelnen Kapiteln 4 bis 8 entnommen werden. Die Datenanalyse erfolgte mit den Statistikpaketen SPSS (Firma SPSS Inc., Version 11.5.1) und EGRET (Firma Cytel, Version 2.0.31).

4 Akustik – Ergebnisse und Diskussion der Feldstudien-Daten

Uwe Müller

In den Feldstudien wurde der Schallpegel außen und innen am Ohr des Schläfers kontinuierlich über die gesamte Nacht aufgenommen. Zusätzlich wurden all die Geräusche mit 24 kHz Abtastung aufgezeichnet, die mindestens 4 dB(A) über dem Hintergrundpegel lagen (siehe auch Kapitel 3.4.2).

Dieses Vorgehen erlaubte eine eindeutige Identifizierung jedes auftretenden Geräusches in der gesamten Nacht. Hierzu wurde bei der Auswertung aller Nächte jedes Geräusch mit Anfangs- und Endzeitpunkt markiert und mit Kommentar identifiziert. Das Auswertungsprogramm berechnete hierzu die Gesamtlänge, die T10-Zeit, den Maximalpegel, die Zeit des Auftretens des Maximalpegels, den Pegelanstieg, den Leq_Event und den vorhergehenden Hintergrundpegel zum entsprechenden Ereignis. Maßgeblich für die Auswertung war der Innenpegel am Kopfende des Bettes, um eine Ereigniskorrelation der Akustikdaten am Ohr des Schläfers mit dessen Schlafdaten zu ermöglichen, berechnet wurden obengenannte Werte aber sowohl für den Innen- als auch für den Außenpegel.

Insgesamt wurden in den 14 Monaten der Feldstudienuntersuchungen 46 Messstellen mit insgesamt 64 Probanden für 9 aufeinander folgende Nächten untersucht, d.h. in 18 Fällen wurden 2 Personen gleichzeitig an einer Messstelle untersucht. Dabei fielen die Untersuchungen an 9 Messstellen in den Frühling, an 11 in den Sommer, an 19 in den Herbst und an 7 in den Winter. In die folgenden Auswertungen gehen 394 Nächte ein, in denen sowohl der Außen- als auch der Innenpegel vorlagen.

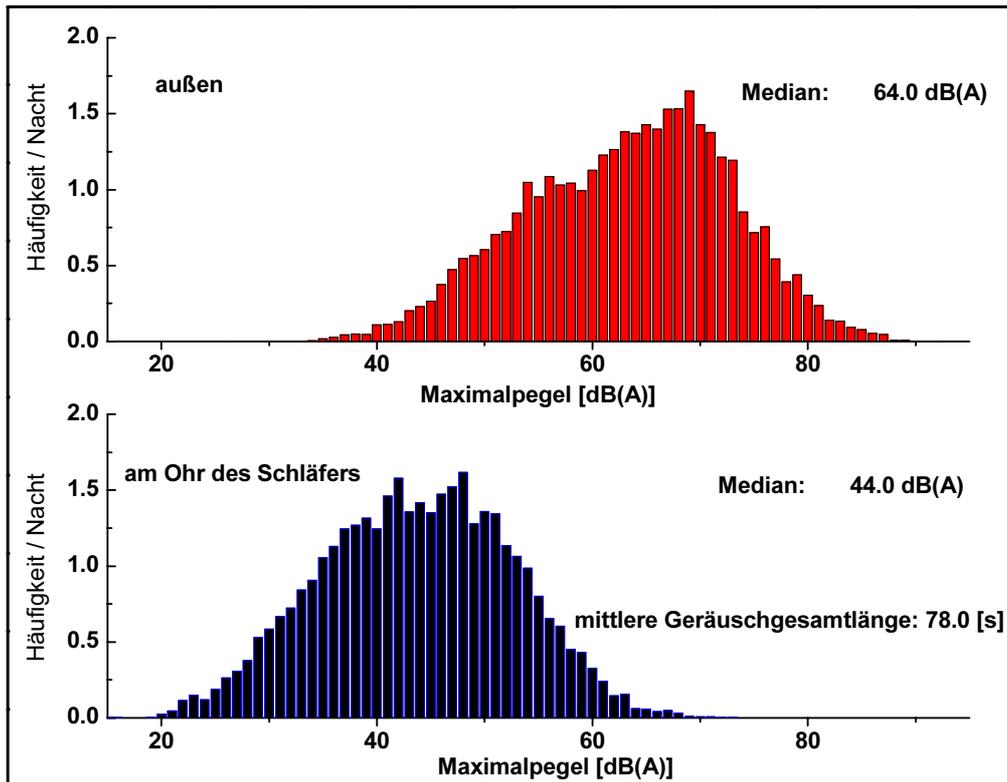


Abbildung 4.1: Häufigkeitsverteilung der Flugzeugmaximalpegel außen (2 m vor der Hauswand) und innen (am Ohr des Schläfers) in 1 dB(A)-Schritten, gemittelt über 394 Nächte. Für diese Auswertung wurden nur die Fluggeräusche berücksichtigt, die nicht durch andere Geräuschquellen gestört wurden.

In diesen 394 Nächten wurden insgesamt 16.102 Flugzeuge gezählt (das entspricht 40,9 pro Nacht, gemittelt über die gesamte Woche), wovon 14.247 Geräusche am Ohr des Schläfers nicht von anderen Geräuschen überlagert wurden und im weiteren mit „ungestört“ bezeichnet werden. Weiterhin wurden 12.256 Autos (11.653 ungestörte), 239 Motorräder (217 ungestörte) und 127 LKW (120 ungestörte) gezählt. Diese Aufstellung zeigt, dass vorwiegend Messstellen ausgesucht wurden, die stark von Fluglärm, aber nur schwach von anderen Verkehrslärmarten betroffen waren. Abbildung 4.1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Flugzeugmaximalpegel, gemittelt über alle 394 Nächte und somit nicht differenziert nach dem Wochentag.

In der Feldstudie sollten die Versuchspersonen möglichst ihren normalen Schlafgewohnheiten nachgehen, mit der Einschränkung, dass eine Mindestbettzeit von 0 Uhr bis 6 Uhr eingehalten werden sollte. Somit war den Probanden auch freigestellt, bei welcher Fensterstellung sie schliefen.

Die Pegeldifferenz zwischen dem Außenmikrofon und dem Innenmikrofon am Ohr des Schläfers wird vor allem durch die Größe des Fensterspalts und die Entfernung des Innenmikrofons zum Fenster bestimmt, zusätzlich aber auch durch die Fenstergröße, dessen Schalldämmmaß, die Frequenzverteilung des Fluggeräusches und die Wetterlage. Um auch diese zusätzlichen, sich teilweise täglich ändernden Einflussgrößen bei der Bestimmung einer mittleren Pegeldifferenz zu berücksichtigen, wurde in jeder Nacht der Leq_Event eines jeden ungestörten Fluggeräusches bestimmt. Aus diesen durchschnittlich 36 Werten pro Nacht wurde dann der Median ermittelt. Somit wurde für jede der 9 Messnächte an einer Messstelle ein Median erhalten, aus dem dann der Gesamt-Median für die Messstelle ermittelt wurde. An drei Messstellen wurde während der 9 Messnächte die Fensterstellung geändert. Diese Messstellen gingen zweimal in die Auswertung ein, allerdings mit kleinerer Anzahl von Nächten zur Bestimmung des der Fensterstellung entsprechenden Gesamtmedians der Messstelle.

Abbildung 4.2 zeigt die Ergebnisse für die mittlere Pegeldifferenz zwischen dem Außen- und Innenmikrofon am Ohr des Schläfers. Da der Abstand des Bettes zum Fenster an den einzelnen Messstellen variierte, streuen die Messwerte der verschiedenen Fensterstellungen entsprechend. Obwohl die Entfernung der Innenmikrofone zum Fenster nicht gemessen wurde, ist diese Streuung vorwiegend auf die unterschiedlichen Entfernungen der Kopfenden der Betten zum Fenster zurückzuführen, da bei gekippten Fenstern die genaue Spaltöffnungsbreite und die genaue Fensterfläche und bei geschlossenen Fenstern das Schalldämmmaß und die Fenstergröße nur noch einen kleinen Beitrag zur Pegeldifferenz verglichen mit Normwerten für gekippte und geschlossene Fenster beitragen [14]. Die Medianwerte von 28,4 dB(A) für die geschlossenen, 18,4 dB(A) für die gekippten und 13,5 dB(A)

für die geöffneten Fenster (letztere bei allerdings nur 3 Messstellen!) geben aber einen guten Hinweis auf die Pegeldifferenzsituation für Flugzeuggeräusche in der Praxis.

Im Gegensatz zur Ermittlung des energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{eq(3)}$ für die kontrollierten akustischen Bedingungen im Schlaflabor, hängt der $L_{eq(3)}$ an den verschiedenen Messstellen im Feld nicht ausschließlich von den Fluggeräuschen, sondern vor allem auch von den Beiträgen anderer Verkehrsträger und der jeweiligen Wettersituation ab.

Gemittelt über alle Messstellen wurde für die Zeit zwischen 0 und 6 Uhr im Frühling ein gesamter mittlerer $L_{eq(3)}$ -Außenwert von 54,8 dB(A) und ein gesamter Innenwert von 34,3 dB(A) errechnet, im Sommer 52,8 dB(A) außen und 37,3 dB(A) innen, im Herbst 53,5 dB(A) außen und 36,0 dB(A) innen und im Winter 55,0 dB(A) außen und 36,8 dB(A) innen. Berücksichtigt man, dass die mittlere Anzahl der Flugbewegungen zwischen 0 und 6 Uhr im Jahresdurchschnitt zu 21,1% in den Frühling, zu 30,0% in den Sommer, zu 22,9% in den Herbst und zu 25,9% in den Winter fielen, dann erkennt man, dass in die $L_{eq(3)}$ -Gesamtberechnungen sehr stark auch die unterschiedlichen Wettersituationen (Wind und Regen führen zu deutlich höheren Schallpegeln) und die mit den Jahreszeiten variierenden Fensterstellungen eingehen.

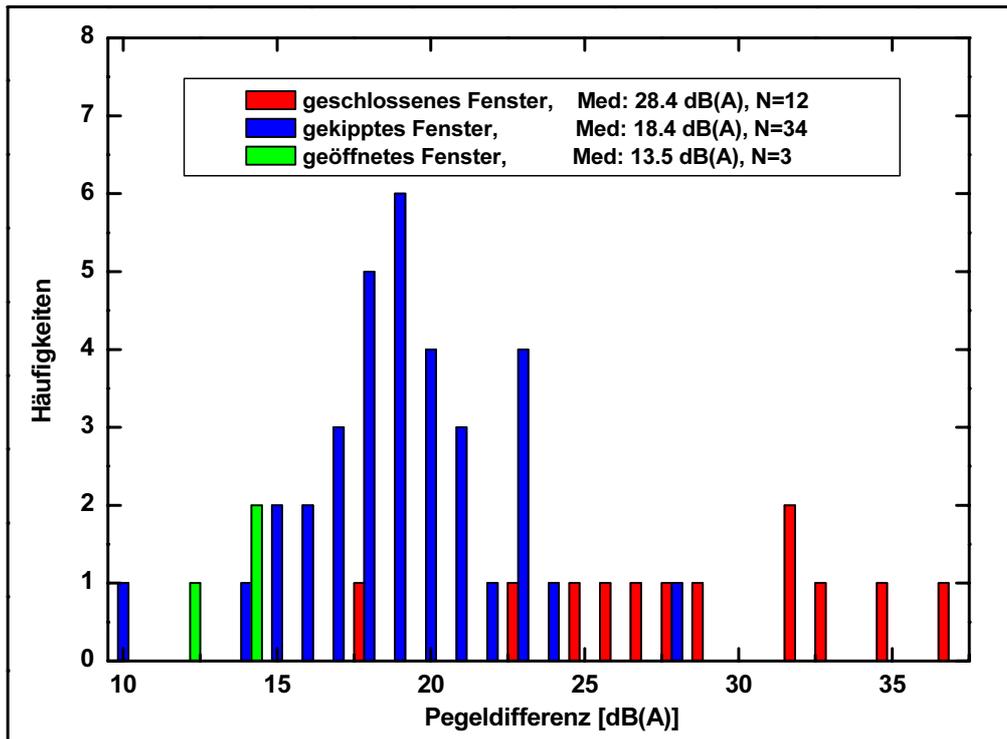


Abbildung 4.2: Mittlere Pegeldifferenz zwischen dem Außenmikrofon und dem Innenmikrofon am Ohr des Schläfers. Es wurde der Medianwert aus 9 Messnächten genommen, wobei der kleinste und größte Wert nicht mit in die Auswertung eingingen. Zur Bestimmung der Differenz siehe Text. An 3 Messstellen änderte sich die Fensterstellung während des Versuchs. Auch diese Messwerte wurden berücksichtigt mit entsprechend kleinerem n in der Medianermittlung.

5 Schlaf

Mathias Basner

Der Schlaf ist ein Zustand, in dem das Bewusstsein, also die Wahrnehmung des Menschen gegenüber sich selbst und seiner Umwelt, eingeschränkt ist. Der Mensch verbringt etwa ein Drittel seines Lebens schlafend. Durch die Aufzeichnung und Darstellung bestimmter Biosignale, die sogenannte Polysomnografie, kann ein wacher Mensch mit geschlossenen Augen von einem schlafenden Menschen unterschieden werden. Zudem kann der Schlaf anhand der Biosignale in sechs funktionell verschiedene Schlafstufen unterteilt werden. Man unterscheidet zunächst zwischen Wachsein und Schlaf. Der Schlaf wird in REM-Schlaf (s.u.) und non-REM-Schlaf differenziert, und der non-REM-Schlaf wiederum in die Schlafstadien S1, S2, S3 und S4 klassifiziert. Die Schlafstadien S1 und S2 werden auch als Leichtschlaf, die Stadien S3 und S4 als Tiefschlaf bezeichnet. Diese Bezeichnungen beruhen auf der Feststellung, dass Menschen aus dem Tiefschlaf schwerer erweckbar sind als aus dem Leichtschlaf. Für die Klassifizierung des Schlafs in die fünf verschiedenen Schlafstadien und "Wach" wird die Nacht in 30 Sekunden lange Epochen unterteilt. Jeder Epoche wird entsprechend einem internationalen Standard [21] eines der oben beschriebenen Schlafstadien zugewiesen. Dieser Prozess ist personal- und zeitaufwendig und demnach kostenintensiv, weshalb die Polysomnografie in der Vergangenheit nur in vergleichsweise kleinen Studien mit wenigen Probandennächten eingesetzt wurde.

In der Polysomnografie werden die folgenden Signale aufgezeichnet:

Das **Hirnstrombild** (Elektroenzephalogramm – EEG) wird über auf der Kopfhaut angebrachte Elektroden abgeleitet. Neben Frequenz und Amplitude des EEG spielen bestimmte Muster (z.B. K-Komplexe und Spindeln) eine wichtige Rolle für die Bestimmung der unterschiedlichen Schlafstadien.

Der Tiefschlaf z.B. zeichnet sich durch langsame und hohe Wellen im Hirnstrombild aus, er wird deshalb im angelsächsischen Raum auch als *slow wave sleep* (SWS) bezeichnet.

Die **Augenbewegungen** (Elektrooculogramm – EOG) werden mit zwei seitlich neben den Augen angebrachten Elektroden erfasst. Während des Einschlafens können langsame Augenbewegungen beobachtet werden, im REM-Schlaf hingegen herrschen schnelle konjugierte Bewegungen der Augäpfel vor. Letztere geben dem REM-Schlaf auch seinen Namen (*rapid eye movement sleep*).

Der **Anspannungszustand der Muskulatur** (Elektromyogramm – EMG) wird mit zwei über der Kinnmuskulatur angebrachten Elektroden bestimmt. Mit zunehmender Schlaftiefe sinkt die Muskelanspannung. Sie erreicht ihren tiefsten Punkt während des REM-Schlafs.

Die Anteile der verschiedenen Schlafstadien am Gesamtschlaf unterscheiden sich und sind zudem altersabhängig. In den 128 Basisnächten der Laborstudie verteilten sich die Schlafstadien im Mittel wie folgt: S2 ~ 52%, REM ~ 22%, Tiefschlaf ~ 16%, Wach ~ 8% und S1 ~ 2%. Bei weitem am häufigsten kann also das Schlafstadium S2 beobachtet werden, wohingegen S1 als Übergangsstadium zwischen Wachen und Schlafen in ungestörten Nächten extrem selten vorkommt. Im Alter wird eine Reduzierung des Tiefschlafanteils beobachtet, hauptsächlich zugunsten von S2. Im hohen Alter wird häufig gar kein Tiefschlaf mehr gesehen.

Wechselnde Episoden von non-REM-Schlaf und REM-Schlaf werden als Schlafperioden bezeichnet. Jede Nacht besteht aus mehreren Schlafperioden, die zwischen 60 und 120 Minuten andauern. Die Zusammensetzung der einzelnen Schlafperioden ändert sich im Laufe der Nacht: Im ersten Drittel dominiert der Tiefschlaf, während im letzten Drittel der REM-Schlaf überwiegt. Die Auftragung der einzelnen Schlafstadien im Verlauf der Nacht führt zu einem sog. Hypnogramm, in dem die Architektur des Schlafs an-

schaulich dargestellt wird. Abbildung 5.1 zeigt die Hypnogramme von zwei Teilnehmern der Laborstudie.

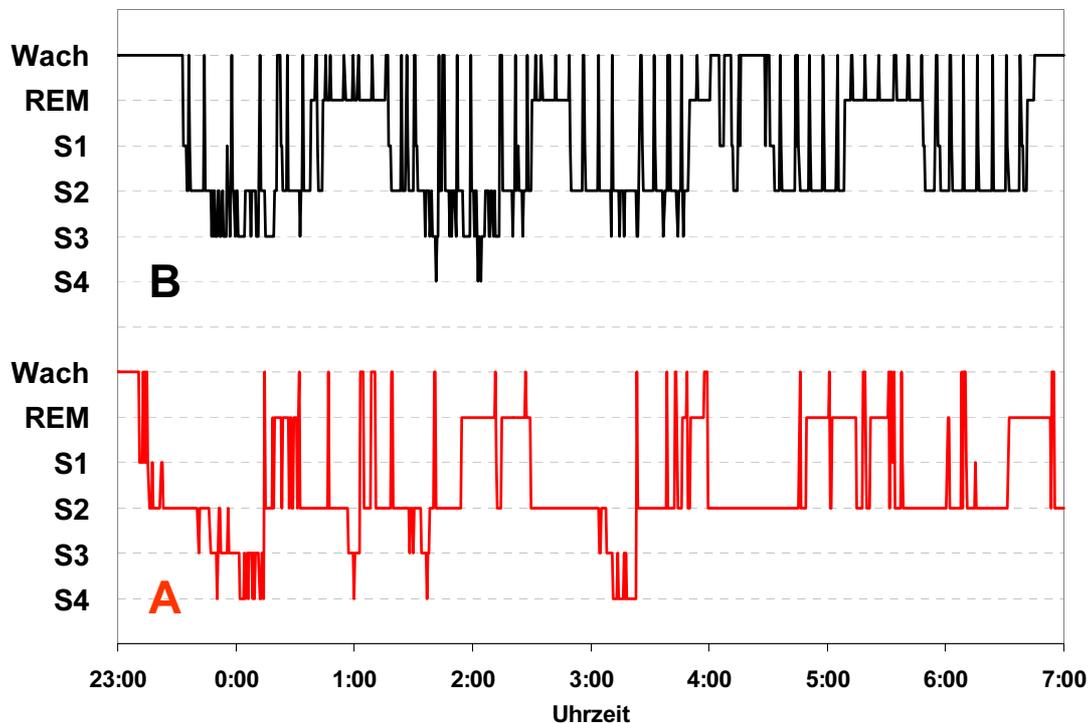


Abbildung 5.1: Hypnogramme von zwei Teilnehmern der Laborstudie. In den dargestellten Nächten wurden jeweils 64 Fluggeräusche mit einem Maximalpegel von 65 dB(A) am Ohr des Schläfers eingespielt.

Beide Versuchspersonen erhielten in der dargestellten Nacht 64 Fluggeräusche mit einem Maximalpegel von 65 dB(A). Die Gruppe aller Versuchspersonen, die mit 64 x 65 dB(A) beschallt wurden, wachte im Mittel mit einer Wahrscheinlichkeit von 23,3% bei einem Fluggeräusch auf. Versuchsperson A wachte nur bei 3,3% aller Geräusche auf und war damit am unempfindlichsten. Versuchsperson B hingegen wachte bei 88% der Geräusche auf und reagierte damit am empfindlichsten.

In Abbildung 5.1 wurden absichtlich die beiden Extremfälle dargestellt, um die starken interindividuellen Unterschiede in der Empfindlichkeit des Schlafs für Umweltlärm zu verdeutlichen. Daher reicht es nicht aus, Unter-

suchungen an kleinen Kollektiven, z.B. mit einem Stichprobenumfang von 16 Versuchspersonen, vorzunehmen, da zufallsbedingt 16 sehr empfindliche oder 16 sehr unempfindliche Personen ausgewählt werden können, so dass die ermittelten Ergebnisse ebenfalls stark durch den Zufall beeinflusst werden. Diese Gefahr wird durch größere Stichproben und eine geeignete Probandenauswahl deutlich reduziert.

Neben der Dauer ist auch die Struktur des Schlafs wichtig für dessen regenerative Funktion. Es wird momentan davon ausgegangen, dass sich die verschiedenen Schlafstadien in ihrer Bedeutung für die Erholung im Schlaf unterscheiden. Dabei ist weiterhin unklar, welche Funktion die einzelnen Schlafstadien genau ausüben und über welche Mechanismen sie diese Funktionen erfüllen. Der Tiefschlaf wird unter anderem aus den folgenden Gründen als besonders wichtig für die im Schlaf stattfindende Regeneration erachtet [7]:

- seine Nähe zum Schlafbeginn
- sein sofortiger Rebound nach Schlafentzug
- seine Assoziation mit hohen sensorischen Schwellen und mit der Ausschüttung von Wachstumshormonen

Befunde neuester Zeit deuten darauf hin, dass Tiefschlaf an der Konsolidierung expliziter Gedächtnisinhalte beteiligt ist, wohingegen REM-Schlaf insbesondere für die Konsolidierung von impliziten Gedächtnisinhalten bedeutsam zu sein scheint [22]. Der Wachzustand und das Schlafstadium S1 tragen nicht bzw. kaum zum Erholungsprozess des Schlafs bei, während das Schlafstadium S2 vermutlich eine intermediäre Position einnimmt.

5.1 Einfluss von Nachtfluglärm auf den Schlaf

Die Regeneration von mentaler und physischer Leistungsfähigkeit findet vorwiegend während des Schlafs statt. Ein ungestörter Schlaf ist Vorausset-

zung für diesen Regenerationsprozess. Der menschliche Organismus registriert, bewertet und reagiert auch während des Schlafs auf Geräusche. Diese primären Reaktionen sind Bestandteil einer globalen Aktivierung des Organismus und äußern sich z.B. in Schlafstrukturänderungen und Herzfrequenzbeschleunigungen. Durch wiederholte Aktivierungen kann Umgebungslärm zu einer Einschränkung der regenerativen Funktion des Schlafs führen, wobei das Ausmaß dieser Einschränkung sowohl von der Häufigkeit als auch von der Stärke der Aktivierung abhängt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit und das Ausmaß einer solchen Aktivierung hängen neben vielen anderen moderierenden Faktoren maßgeblich von der Art und von der Lautstärke des Geräusches ab.

5.2 Methodik

In der Studie STRAIN wurde der Einfluss von nächtlichem Fluglärm auf den Schlaf des Menschen systematisch in Labor- und Feldstudien an 192 Versuchspersonen in 2.240 Experimentalnächten untersucht. In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen Fluglärm und primären Schlafstörungen unter Berücksichtigung einer Vielzahl einflussnehmender Moderatoren dargestellt.

Für eine detaillierte Darstellung von Methodik und Ergebnissen sei an dieser Stelle auf den Forschungsbericht DLR-FB-2004-09/D: "Nachtfluglärmwirkungen Band 3: Schlaf" verwiesen.

In den Laborstudien fand die Messung zwischen 23:00 und 07:00 Uhr statt, wobei die Fluggeräusche äquidistant zwischen 23:15 und 6:45 Uhr eingespielt wurden. In der Feldstudie war die Schlafzeit von der Versuchsperson frei wählbar, sie musste jedoch mindestens das Intervall zwischen 0:00 und 6:00 Uhr einschließen.

Die Bestimmung der Schlafstadien erfolgte durch erfahrene Auswerter nach den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [21]. Bewegungen, die mehr als

die Hälfte einer Epoche einnahmen und eigentlich zu der Klassifikation *movement time* geführt hätten, wurden als Wach klassifiziert, weil davon ausgegangen wurde, dass derartige Bewegungen nicht ohne entsprechende kortikale Aktivierung stattfinden.

Vor der Bestimmung der Schlafstadien wurden die zu analysierenden Dateien umbenannt und in eine zufällige Reihenfolge gebracht, um die Auswerter zu verblinden, so dass sie nicht wussten, um welche Nacht es sich bei der gerade ausgewerteten handelt, und damit auch nicht, ob und wenn ja, wie viele Fluggeräusche in dieser Nacht eingespielt wurden (Labor) bzw. real vorkamen (Feld). Hierdurch wurden mögliche durch den Analyseprozess bedingte systematische Verzerrungen vermieden. Es wurden jeweils alle Nächte einer Versuchsperson von einem einzigen Auswerter analysiert, wodurch das Problem der Interratervariabilität bei intraindividuellen Vergleichen behoben wurde. Durch Randomisierung der Auswertereihenfolge der Nächte wurde eine systematische Anpassung des Auswerterers an das individuelle EEG-Muster einer Versuchsperson immer in der gleichen Reihenfolge (Nacht 1 bis 13 bzw. 9) vermieden.

Von 1.072 Lärmnächten im Labor konnten 1050 (97,9%) ausgewertet werden. In einem Fall startete die Aufzeichnung nach 23:15 Uhr. In 29 Nächten kam es zu Elektrodenausfällen vor 6:30 Uhr, weshalb in diesen Fällen nicht mehr die gesamte Nacht ausgewertet werden konnte. Inklusive der Anpassungs-, Basis-, Kontroll- und Erholungsnächte wurden in der Laborstudie 1.463.998 Epochen visuell klassifiziert.

In der Feldstudie konnte eine Person aufgrund einer intrinsischen Schlafstörung (sog. *REM-sleep behaviour disorder*) nicht in die Auswertung einbezogen werden. Von den übrigen 63 Versuchspersonen wurden jeweils die Nächte 2 bis 9 ausgewertet, da die erste Nacht als Anpassungsnacht diente. Von den verbleibenden 504 Nächten konnten 492 (97,6%) ausgewertet werden. In 16 Nächten kam es zu Elektrodenausfällen vor dem Ende der Nacht, weshalb diese nur in Teilen in die Auswertung einbezogen wurden.

In der Feldstudie wurden 458.196 Epochen visuell bestimmt. Insgesamt wurden in den Labor- und Feldstudien 1.922.194 Epochen durch einen menschlichen Auswerter klassifiziert.

5.3 Einfluss von Nachtfluglärm auf Gesamtschlafparameter

Nächtlicher Fluglärm kann neben einer Verminderung der Schlafzeit zu Veränderungen der Schlafstruktur, d.h. der Anteile der verschiedenen Schlafstadien an der Gesamtschlafzeit, führen. Wie oben bereits näher erläutert, wird insbesondere dem Tiefschlaf eine wichtige Rolle für die regenerative Wirkung des Schlafs beigemessen. Der Zustand Wach und das Schlafstadium S1 hingegen fördern den Erholungseffekt nicht, sie wurden ganz im Gegenteil in der Vergangenheit als klassische Indikatoren eines gestörten und nicht erholsamen Schlafs identifiziert. Deshalb können intrinsische oder extrinsische Störungen, die zu einer Verminderung von Tiefschlaf zugunsten von Leichtschlaf und Wach einhergehen, als potentiell schädlich für die regenerative Wirkung des Schlafs angesehen werden.

Abbildung 5.2 verdeutlicht die Veränderung der Schlafstadienanteile aller Fluglärmnächte ($n = 996$) im Vergleich zu lärmfreien Basisnächten ($n = 112$) im Verlauf der Nacht unter Laborbedingungen. Alle Nächte wurden auf den Schlafbeginn synchronisiert. Dargestellt ist jeweils die Differenz zwischen Lärm- und Basisnächten, d.h. negative Werte bedeuten geringere Anteile in den Lärmnächten.

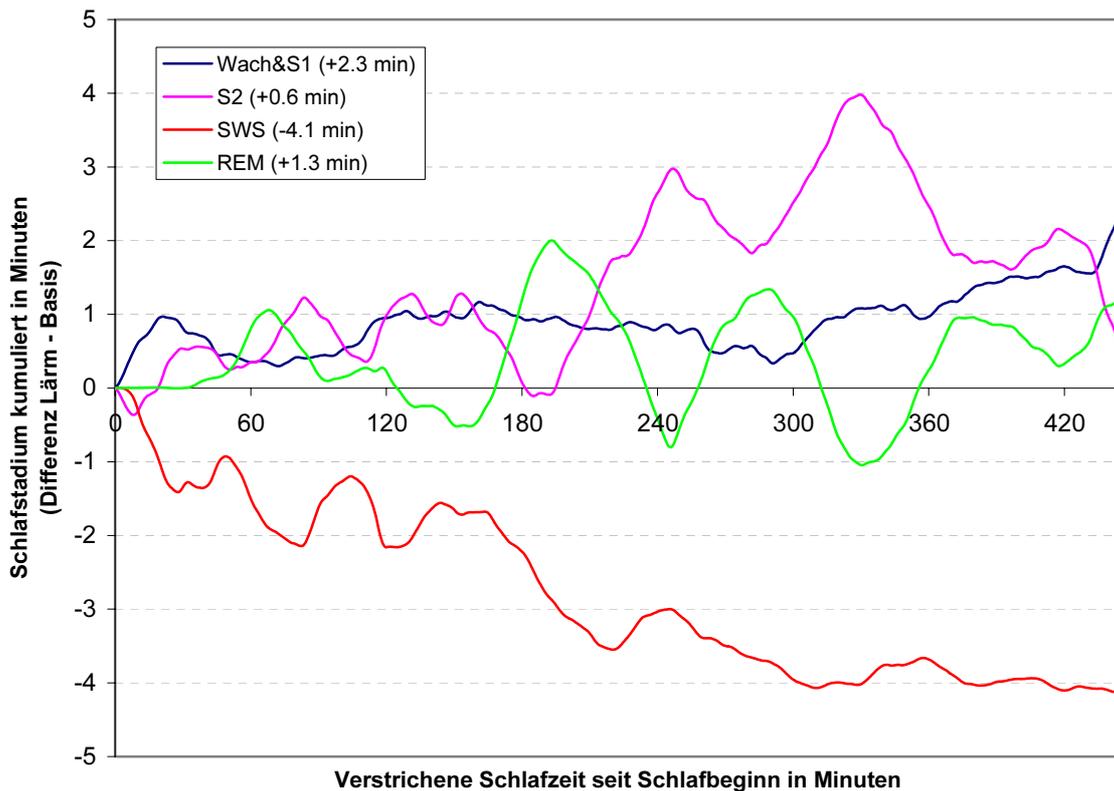


Abbildung 5.2: Veränderung der Schlafstadienanteile (mittlere Differenz zwischen Lärm- und Basisnacht) im Verlauf der Nacht in den Laborstudien.

Bei einer Gesamtschlafzeit von 7 Stunden und 24,5 Minuten war der Schlaf um 1,8 Minuten nicht signifikant ($p=0,262$) kürzer. Es wurden jedoch Veränderungen in der Schlafstruktur beobachtet: Der Tiefschlaf war im Mittel um 4,1 Minuten insbesondere zugunsten der Schlafstadienanteile von Wach und S1 (+2,3 Minuten) reduziert. Die Veränderungen der jeweiligen Schlafstadienanteile waren jedoch nicht statistisch signifikant.

In Abbildung 5.2 wurden zunächst alle Lärmnächte mit den Basisnächten verglichen, ohne die Anzahl oder die Lautstärke der eingespielten Fluggeräusche zu berücksichtigen. Abbildung 5.3 hingegen stellt den Vergleich der Tiefschlafanteile in Basisnächten und den Lärmnächten dar, in denen Fluggeräusche mit einem Maximalpegel von 55 dB(A) eingespielt wurden, in Abhängigkeit von der verstrichenen Schlafzeit und der Anzahl der eingespielten Geräusche.

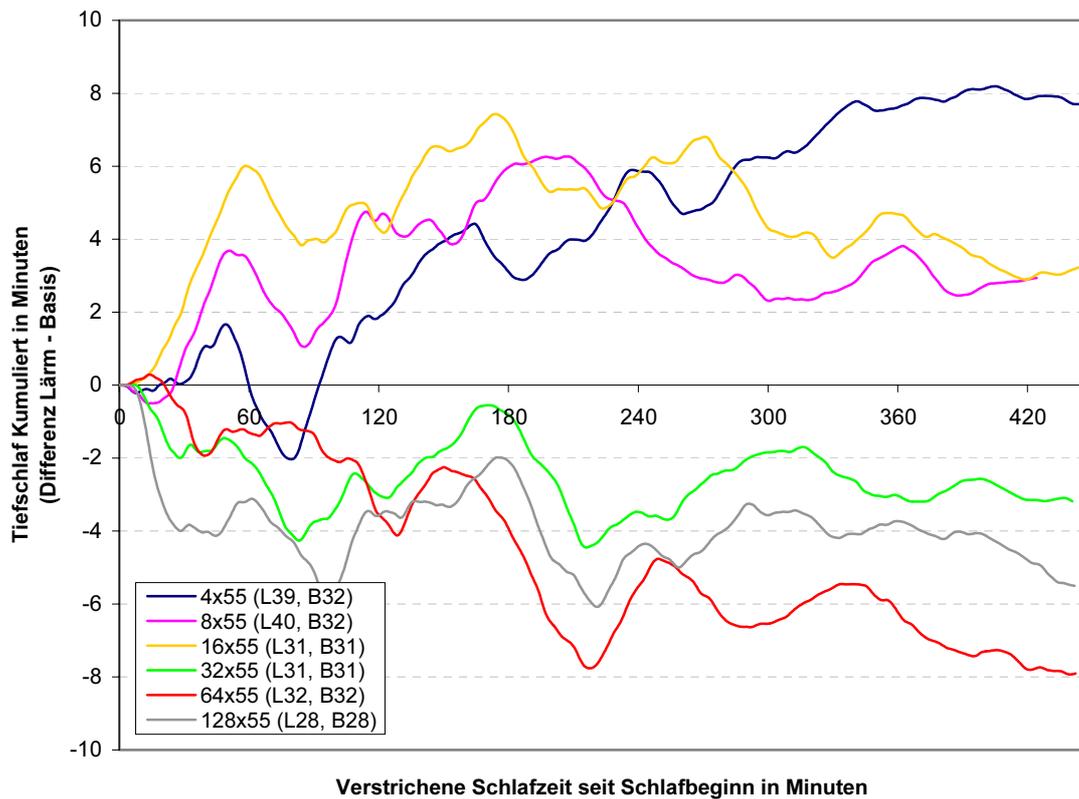


Abbildung 5.3: Veränderung des Tiefschlafanteils in Lärmnächten mit Maximalpegeln von 55 dB(A) am Ohr des Schlafers im Vergleich zu Basisnächten in Abhängigkeit von der verstrichenen Schlafzeit und von der Anzahl der Fluggeräusche (L = Anzahl der Lärmnächte, B = Anzahl der Basisnächte).

Auch wenn die Veränderungen der Tiefschlafanteile für alle Häufigkeiten wiederum nicht statistisch signifikant waren, wird deutlich, dass bei einem Maximalpegel von 55 dB(A) und geringen Häufigkeiten (hier: 4 bis 16 Fluggeräusche pro Nacht) der Tiefschlafanteil in den Lärmnächten im Vergleich zu den Basisnächten eher erhöht war. Die Kompensation eines in den vorausgehenden Lärmnächten entstandenen Schlafdefizits ist eine mögliche Erklärung für die beobachtete Zunahme des Tiefschlafanteils bei vergleichsweise geringer Lärmbelastung. Hieraus würden sich zwei wichtige Konsequenzen ergeben:

- Die Lärmbelastung in den Laborstudien führte zu einer Reduktion von Tiefschlaf, die, auch wenn statistisch nicht signifikant, groß genug war,

um in Nächten mit geringer Lärmbelastung zu einer Kompensation zu führen.

- Der Nachweis von erhöhten Tiefschlafanteilen in Nächten mit geringer Lärmbelastung im Vergleich zu den Basisnächten zeigt, dass eine Kompensation von Tiefschlaf in Nächten mit geringer Lärmbelastung grundsätzlich möglich ist.

Dagegen spricht jedoch, dass in den lärmfreien Erholungsnächten (Nacht 12) der Laborstudien 1 bis 3 kein Rebound von Tiefschlaf beobachtet werden konnte, obwohl man ihn hier am ehesten erwartet hätte.

Bei einer höheren Anzahl von Geräuschen (32 bis 128 Fluggeräusche pro Nacht) war der Tiefschlafanteil im Vergleich zur Basisnacht statistisch nicht signifikant vermindert. Man erkennt, dass die Reduktion des Tiefschlafanteils bei einzelnen Pegel-Häufigkeitskombinationen auch höher ausfallen kann als die 4,1 Minuten, die durch die Mittelung aller Lärmnächte zustande kommen (s.a. Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1 zeigt die Veränderung des Tiefschlafanteils in Lärmnächten im Vergleich zu Basisnächten in Minuten in Abhängigkeit von Anzahl und Maximalpegel der eingespielten Fluggeräusche. Die Tiefschlafanteile in Lärm- und Basisnächten wurden für jede Maximalpegel-Häufigkeitskombination mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest für gepaarte Daten auf Gleichheit überprüft. Da multiples Testen vorlag, wurde eine Bonferroni-Korrektur des Signifikanzniveaus vorgenommen und eine statistisch signifikante Änderung bei p-Werten kleiner 0,0017 ($=0,05/30$) angenommen.

		Anzahl Fluggeräusche					
		4	8	16	32	64	128
Maximalpegel L _{AS,max} in dB	45					+1,9 min p=0,739	
	50			+1,4 min p=0,647	-5,6 min p=0,243	+1,7 min p=0,721	-9,4 min p=0,073
	55	+7,7 min p=0,139	+2,9 min p=0,507	+3,2 min p=0,241	-3,2 min p=0,300	-7,9 min p=0,166	-5,5 min p=0,232
	60	-4,7 min p=0,347	+0,7 min p=0,975	-5,7 min p=0,349	-18,0 min p=0,002	-0,2 min p=0,888	
	65	+0,1 min p=0,961	-2,3 min p=0,652	-8,9 min p=0,079	-2,3 min p=0,769	-6,6 min p=0,051	
	70	-3,0 min p=0,252	+2,6 min p=0,376	-17,8 min p=0,004	-9,0 min p=0,089		
	75	-5,6 min p=0,170	-7,8 min p=0,018	-4,3 min p=0,400			
	80	-7,7 min p=0,092	-8,6 min p=0,248				

Tabelle 5.1: Tiefschlafanteil (SWS): Differenz Lärmnacht – Basisnacht (positive Zahlen bedeuten mehr Tiefschlaf in den Lärm- im Vergleich zu den Basisnächten). Das Signifikanzniveau wurde Bonferroni-korrigiert, signifikante Unterschiede bei $p < 0,0017$ angenommen.

Insgesamt können 30 verschiedene Pegel-Häufigkeitskombinationen differenziert werden. Wenn nächtlicher Fluglärm keinen Einfluss auf den Tiefschlafanteil hätte, würde man erwarten, dass in 15 von 30 Fällen der Anteil in den Lärmnächten erhöht und in der anderen Hälfte der Fälle erniedrigt war. Tatsächlich wurde jedoch in 21 von 30 Fällen eine Erniedrigung des Tiefschlafanteils durch Lärm beobachtet. Unter der Annahme, dass Fluglärm keinen Einfluss auf den Tiefschlafanteil hatte, ist die Wahrscheinlichkeit, eine Erniedrigung des Tiefschlafanteils unter Lärm in 21 von 30 Fällen zu beobachten, nur 4,3% (exakter Binomialtest, zweiseitig, Testanteil 50%). Dieses spricht für Lärm als Ursache für eine Erniedrigung des Tiefschlafanteils, auch wenn keine der einzelnen Pegel-Häufigkeitskombinationen das Signifikanzniveau erreichte.

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. Dies ist beispielhaft für die Anzahl der in der Schlafzeit (SPT) aufgetretenen Fluggeräusche in Abbildung 5.4 dargestellt.

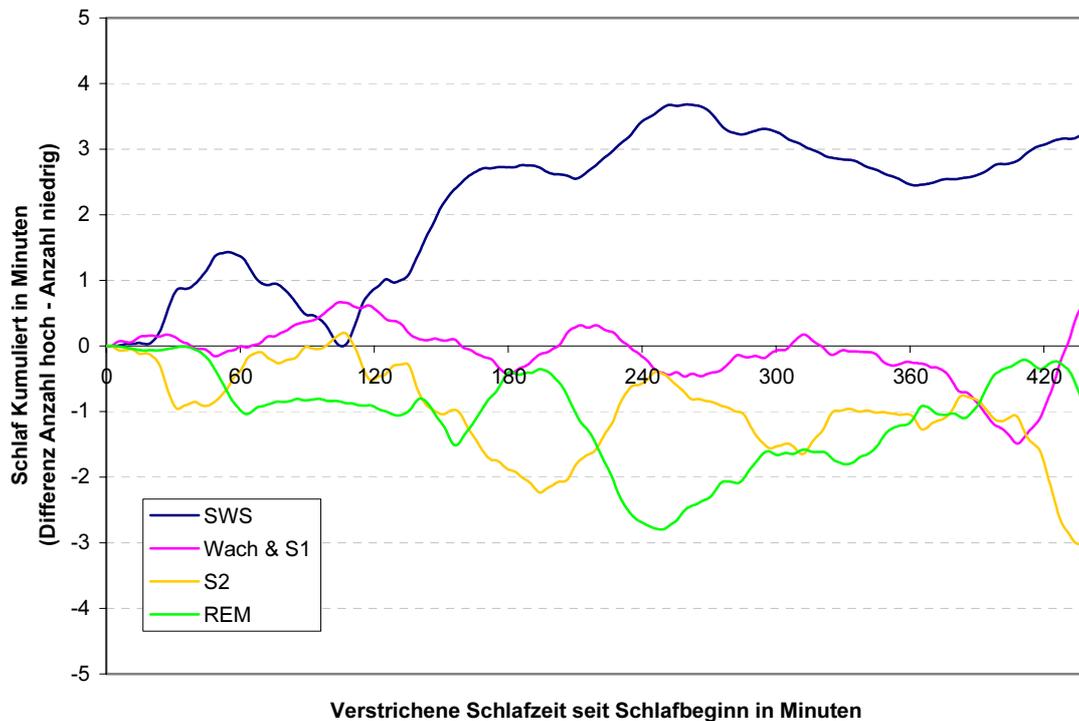


Abbildung 5.4: Veränderung der Schlafstadienanteile in Nächten mit im Mittel 52,2 versus 21,9 Fluggeräuschen (Mediansplit) in Abhängigkeit von der verstrichenen Schlafzeit (n = 472 Nächte).

Die Anteile der Schlafstadien variierten um +/- 4 Minuten um Null und waren jeweils nicht signifikant von Null verschieden (Wilcoxon-Vorzeichen-Rangsummentest für gepaarte Daten). Die Analyse wurde mit folgenden akustischen Parametern wiederholt:

- $L_{AS,eq}$ am Ohr des Schläfers in der Schlafzeit, hervorgerufen durch Fluggeräusche mit Maximalpegeln größer als 35 dB(A)
- $L_{AS,eq}$ am Ohr des Schläfers in der Schlafzeit, hervorgerufen durch Verkehrsgeräusche mit Maximalpegeln größer als 35 dB(A)

- $L_{AS,eq}$ am Ohr des Schläfers in der Schlafzeit gesamt

Die Unterschiede fielen ähnlich groß und ebenfalls jeweils statistisch nicht signifikant aus.

5.4 Ereigniskorrelierte Auswertung

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 ms erzielt.

Parameter wie die nächtliche Sekretionsrate von Stresshormonen oder die am Morgen erfragte Belästigung der Versuchsperson bilden sich in einem einzigen Datum ab, welches die Wirkungen sämtlicher Fluggeräusche einer Nacht beschreibt. Solche Kumulativmaße sind für eine ereigniskorrelierte Auswertung ungeeignet, da der Bezug zu einzelnen Fluggeräuschen nicht hergestellt werden kann. Auch Gesamtschlafparameter wie die Anteile der verschiedenen Schlafstadien sind Kumulativmaße und können deshalb nicht ereigniskorreliert ausgewertet werden.

5.4.1 Was ist ein geeigneter Deskriptor für lärmbedingte Schlafstörungen?

Die Reaktionen des schlafenden Menschen auf Fluggeräusche sind unspezifisch, weil sie auch während des natürlichen, nicht durch Geräusche gestörten Schlafs beobachtet werden können. Reaktionen, die während eines Fluggeräusches beobachtet werden, lassen sich anhand elektrophysiologischer Kriterien nicht von spontanen Reaktionen unterscheiden. Gerade des-

halb ist es notwendig, akustische und elektrophysiologische Aufzeichnungen zu synchronisieren, um diese Differenzierung vornehmen zu können.

Da spontane Reaktionen unregelmäßig vorkommen, können sie auch während eines Fluggeräusches auftreten. Wenn man im Zusammenhang mit einem Fluggeräusch eine Reaktion beobachtet, muss man sich also immer fragen, wie häufig die beobachtete Reaktion 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:

$$P_{\text{induziert}} = P_{\text{Fluggeräusch}} - P_{\text{spontan}} \quad (1)$$

Mit dem Begriff **Lärmfenster** wird der Zeitraum nach dem Beginn eines Fluggeräusches bezeichnet, der auf eine Reaktion des Schlafenden überprüft wird. Das Lärmfenster wurde so gewählt, dass die Wahrscheinlichkeit einer induzierten Reaktion auf Fluggeräusche ($P_{\text{induziert}}$ in Gleichung 1) maximiert wurde. Es hatte in den Laborstudien eine Größe von 2 Epochen (60 Sekunden). In den Feldstudien erwies sich aufgrund einer längeren Fluggeräuschdauer ein Lärmfenster von 3 Epochen (90 Sekunden) als optimal.

In der Vergangenheit wurden mehrere potenzielle Indikatoren für lärmbedingte Schlafstörungen identifiziert und vorgeschlagen. Sogenannte **Arousal** sind EEG- und EMG-Aktivierungen, die jedoch aufgrund ihrer Kürze nicht zu einer Klassifizierung der Epoche als Stadium Wach führen. Bei **Aufwachreaktionen** hingegen handelt es sich um EEG- und EMG-Aktivierungen, die mindestens 15 Sekunden andauern und damit auch zu einem Wechsel in das Stadium Wach führen. **Schlafstiefenwechsel** treten bei dem Übergang von einem Schlafstadium in ein anderes auf. Im Zusammenhang mit Lärmwirkungen werden in der Regel nur solche Schlafstiefenwechsel berücksichtigt, die zu einer Verflachung des Schlafs führen, z.B. der Wechsel vom Tiefschlafstadium S4 in das oberflächlichere Stadium S2.

Bei fast allen in der Vergangenheit durchgeführten Studien, in denen die Polysomnografie zum Einsatz kam, wurden Aufwachreaktionen als primärer Indikator für durch Geräusche aus der Umwelt hervorgerufene Schlafstörungen benutzt. Aus den folgenden Gründen sind Aufwachreaktionen als derartige Indikatoren besonders gut geeignet:

- Eine Aufwachreaktion ist die **stärkste Ausprägung einer Aktivierung** des Organismus im Schlaf. Dementsprechend groß sind die Folgen für die regenerative Funktion des Schlafs.
- Aufwachreaktionen sind relativ **spezifisch**, d.h. sie treten spontan im Vergleich zu anderen Indikatoren selten auf. In den 112 ungestörten Basisnächten der Experimentalgruppe wurden im Mittel ca. 24 Aufwachreaktionen pro Nacht beobachtet. Spontane Schlaftiefenwechsel traten im Mittel ca. 52 Wechsels pro Nacht mehr als doppelt so häufig auf. Mathur und Douglas [17] untersuchten das spontane Auftreten von EEG-Arousal nach ASDA-Kriterien [3]. Sie beobachteten im Mittel ca. 21 Arousal pro Stunde Schlaf. Legt man die mittlere in den Basisnächten der Laborstudie beobachtete Schlafzeit (SPT) von 411,5 Minuten zu Grunde, entspricht dieser Wert ca. 144 spontanen EEG-Arousal pro Nacht.
- In eigenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Stärke und/oder die Häufigkeit von Herzfrequenzbeschleunigungen stark herabgesetzt sind, wenn nicht gleichzeitig eine Aufwachreaktion im EEG beobachtet wird. Gerade das regelmäßige Auftreten dieser nächtlichen **vegetativen Reaktionen** scheint jedoch eine mögliche Ursache für die Entstehung von Bluthochdruck und den damit verbundenen Erkrankungen des Gefäßsystems (Herzinfarkt, Schlaganfall) zu sein. Schlaftiefenwechsel oder kurze Arousal allein führen nicht in dem Ausmaß zu vegetativen Aktivierungen wie Aufwachreaktionen.
- Der Großteil der Aufwachreaktionen ist genau eine Epoche (15 bis 45 Sekunden) lang und damit zu kurz, um am nächsten Tag erinnert zu

werden. Aufwachreaktionen können jedoch auch zu längeren Wachphasen führen, bei denen der Mensch das Wachbewusstsein wieder erlangt. An diese längeren Wachphasen erinnert man sich am nächsten Tag, und sie bestimmen maßgeblich die Einschätzung der Schlafqualität und Schlafquantität. Kriterien, die das generelle Auftreten von Aufwachreaktionen regulieren, beschränken damit auch die Anzahl möglicher **erinnerbarer Aufwachreaktionen** und sorgen damit dafür, dass die Güte des Schlafs hoch eingeschätzt wird. Schlaftiefenwechsel und Arousal werden hingegen am nächsten Tag nicht erinnert, da sie nicht zu einer Erlangung des Wachbewusstseins führen.

Aufgrund einer vermeintlich zu geringen Sensitivität äußern einige Autoren immer wieder hartnäckig Kritik an der Auswahl von Aufwachreaktionen als Indikator für geräuschinduzierte Schlafstörungen [15]. Die Sensitivität ist jedoch ausreichend hoch, denn in den Laborstudien wurde bei Maximalpegeln oberhalb von 45 dB(A) keine Reaktionsschwelle gefunden, im Feld lag sie mit ca. 6 dB(A) nur knapp über dem Hintergrundpegel (s.u.).

Das Schlafstadium S1 trägt nicht oder kaum zur Erholungsfunktion des Schlafs bei und wurde als eine typische Folge erhöhter Schlaffragmentierung beobachtet [30]. Aus diesem Grund wurde nicht nur der Wechsel in das Stadium Wach, sondern auch der für die Schlafgüte relevante Schlaftiefenwechsel in das Stadium S1 als Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen in der Analyse dieser Studie berücksichtigt. Mit dieser präventivmedizinischen Vorgehensweise wurde der Anteil geräuschinduzierter Reaktionen erhöht, ohne die Spezifität des Indikators gravierend zu verringern. Wenn im folgenden von Aufwachreaktionen gesprochen wird, ist daher implizit immer ein Wechsel vom Schlafstadium REM, S4, S3 oder S2 in das Schlafstadium S1 oder Wach gemeint.

5.4.2 Methodik

Die Aufwachwahrscheinlichkeit hängt nicht nur vom Maximalpegel des Fluggeräusches ab. Einerseits spielen andere akustische Eigenschaften des Geräusches wie die spektrale Zusammensetzung oder die Dauer eine Rolle. Andererseits moderieren situative und individuelle Faktoren die Reaktion des Organismus auf Fluggeräusche im Schlaf. Daher müssen, um allein den Einfluss des Maximalpegels $L_{AS,max}$ eines Fluggeräusches zu bestimmen, die übrigen moderierenden Faktoren kontrolliert werden. In einem Regressionsmodell ist dies möglich und wird dort auch als Adjustierung bezeichnet.

Da es sich bei dem Auftreten einer Aufwachreaktion um eine dichotome abhängige Variable (ja/nein) handelt, wurde ein **logistisches** Regressionsmodell verwendet. Die beobachteten Reaktionen sind jedoch nicht unabhängig, da jede Versuchsperson mehrfach mit Fluggeräuschen beschallt wurde und demnach mit mehreren Werten in die Analyse eingeht. Mit einer logistischen Regression mit Zufallseffekten (*random effects logistic regression*) wurde eine Analyseform gewählt, welche die oben beschriebene Abhängigkeit der Daten berücksichtigt.

In dieser Zusammenfassung kann der komplexe methodische Ansatz, der für die ereigniskorrelierte Auswertung in den Labor- und Feldstudien gewählt wurde, nicht detailliert beschrieben werden. Für eine genaue Beschreibung sei an dieser Stelle auf den ausführlichen Bericht zum Thema Schlaf verwiesen, in dem Aspekte der Stichprobengrößenbestimmung, Auswahl der statistischen Verfahren und der Modellierung detailliert beschrieben werden. Im Folgenden können nur die wichtigsten Ergebnisse schlaglichtartig dargestellt werden.

5.4.3 Ergebnisse der Laborstudien

In den Nächten 3 bis 11 wurden insgesamt 30.584 Geräusche eingespielt. In 2.857 Fällen (9,3%) war die Versuchsperson vorher wach oder im Stadi-

um S1. In 1.483 Fällen (4,8%) war sie noch nicht eingeschlafen, oder die Bestimmung der Schlafstadien war aufgrund von Elektrodenausfällen nicht mehr bis zum Ende der Nacht möglich. 836 Geräusche (2,7%) konnten nicht ausgewertet werden, weil die Aufzeichnung fehlschlug. Insgesamt wurden daher 25.408 Geräusche (83,1%) in die Auswertung einbezogen. Als Lärmfenster (s.o.) wurde ein Intervall von 2 Epochen (60 Sekunden) gewählt, wodurch der Anteil lärminduzierter Reaktionen maximiert wurde.

Abbildung 5.5 zeigt die Ergebnisse eines logistischen Regressionsmodells mit Maximalpegel und Maximalpegel² als einzige erklärende Variablen. In diesem Modell wurde die Anzahl der applizierten Geräusche noch nicht berücksichtigt. Die roten Rauten zeigen die tatsächlich beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Maximalpegel. Sie stimmen mit den von der Regression vorhergesagten Werten sehr gut überein. Der Zusammenhang zwischen Maximalpegel und Aufwachwahrscheinlichkeit stellt sich als eindeutig **nicht linear** dar. Die logistische Regression sagt bei einem Maximalpegel von 45 dB(A) eine Aufwachwahrscheinlichkeit von ca. 11% und bei 80 dB(A) von ca. 65% voraus.

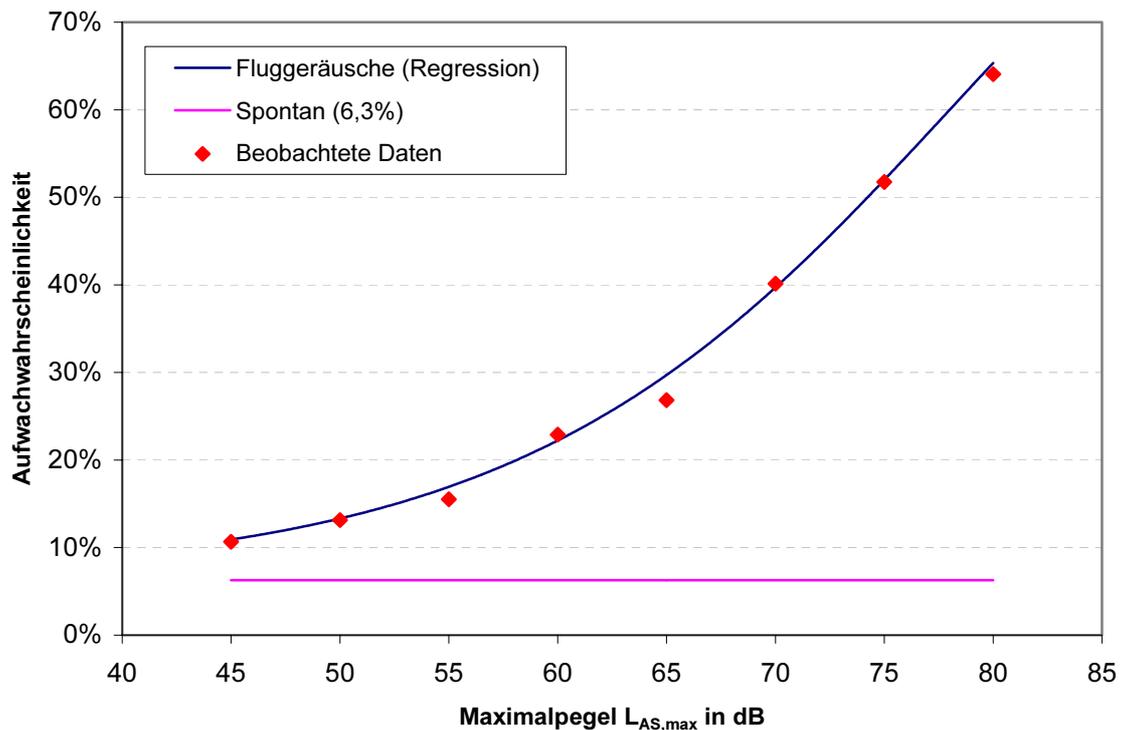


Abbildung 5.5: Laborstudie. Logistische Regression mit Zufallseffekten. Maximalpegel und Maximalpegel² als einzige erklärende Variablen. Basierend auf 112 Versuchspersonen und 25.408 Fluggeräuschen.

Die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit wurde in den Basisnächten jeweils desselben Probanden ermittelt. Für jedes Lärmereignis wurde zur gleichen Uhrzeit in der Basisnacht überprüft, ob spontan, d.h. ohne Geräuscheinwirkung, Aufwachreaktionen auftraten oder nicht. Auf diese sogenannten virtuellen Lärmereignisse wurde in 6,3% eine spontane Aufwachreaktion beobachtet (s. untere Linie in Abbildung 5.5).

Aus Abbildung 5.5 geht ebenfalls hervor, dass im Labor bis zu Werten von 45 dB(A), also 15 dB(A) über dem von der Klimaanlage erzeugten konstanten Hintergrundgeräusch, keine Schwelle gefunden wurde. Die Regressionsgerade nähert sich vielmehr asymptotisch der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit an. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Ergebnissen von Griefahn et al. [11], die nach einer Meta-Analyse eine Schwelle bei ca. 60 dB(A) annehmen. Maschke et al. [16] kommen nach einer Re-Analyse der gleichen Daten zu einer Schwelle von ca. 33 dB(A). In beiden Fällen

wurde mit der **linearen** Regression gearbeitet, die für binäre Zielvariablen nur bedingt geeignet ist, da die Annahmen der Homoskedastizität und eines normalverteilten Fehlers notwendigerweise verletzt werden.

Andererseits wird deutlich, dass selbst Geräusche mit einem Maximalpegel von 80 dB(A) von ca. 35% der Versuchspersonen verschlafen werden, d.h. nicht zu einem Wechsel in das Stadium Wach oder S1 führen.

In dem Modell, auf das die Regressionslinie in Abbildung 5.6 beruht, finden sich neben Maximalpegel und Maximalpegel² zusätzlich das Schlafstadium, in dem sich die Versuchsperson vor Auftreten des Fluggeräusches befindet (StadVor), und die verstrichene Schlafzeit (SchlZeit) als erklärende Variablen.

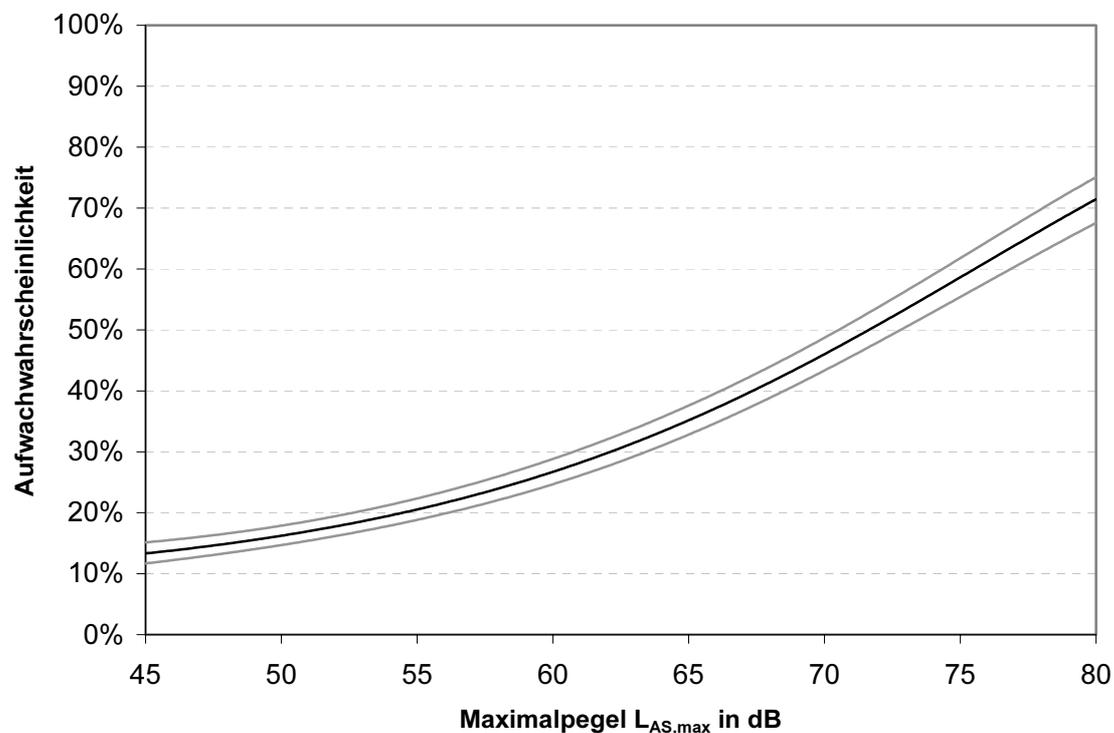


Abbildung 5.6: Laborstudie. Logistische Regression mit Zufallseffekten und 95% Konfidenzintervall. Modell mit Maximalpegel, Maximalpegel², Schlafstadium vor Fluggeräusch (Stadium S2) und verstrichener Schlafzeit (Mitte 2. Nachthälfte) als erklärende Variablen. Basierend auf 112 Versuchspersonen und 25.408 Fluggeräuschen.

Die Werte für die zusätzlichen erklärenden Variablen wurden so gewählt, dass Abbildung 5.6 direkt mit einem auf den Daten der Feldstudie beru-

henden Modell verglichen werden kann, welches in Abbildung 5.8 dargestellt ist. Aus präventivmedizinischen Gründen wurde das Schlafstadium vor dem Fluggeräusch mit S2, also dem geräuschempfindlichsten Stadium (s.u.) angenommen. Für die verstrichene Schlafzeit wurde ein Wert von 601 Epochen (ca. 5 Stunden) gewählt, was in der Feldstudie der Mitte der zweiten Nachthälfte entsprach. Entsprechend ist die Linie in Abbildung 5.6 im Vergleich zu Abbildung 5.5 zu etwas höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten verschoben.

Die Präzision der Schätzung kann an der Weite des 95% Konfidenzintervalls abgelesen werden (graue Linien in Abbildung 5.6). Sie ist über den gesamten Wertebereich des Maximalpegels aufgrund der großen Fallzahlen sehr hoch und schwankt zwischen 3,2% bei 49,5 dB(A) und 7,5% bei 80 dB(A).

Neben dem Maximalpegel wurden folgende Variablen zunächst im univariablen Modell und anschließend in multivariablen Modellen auf ihren Einfluss auf fluggeräuschinduziertes Erwachen überprüft:

Akustische Variablen: Innerhalb einer Nacht wurde eine Gewöhnung an die Fluggeräusche festgestellt, denn mit zunehmender Anzahl der bereits eingespielten Geräusche sank die Aufwachwahrscheinlichkeit. Dieser Effekt war für laute Fluggeräusche stärker als für leise. Zudem stieg die Aufwachwahrscheinlichkeit an, je größer das geräuschfreie Intervall zwischen zwei Fluggeräuschen war. Im univariablen Modell führten Geräusche von startenden im Vergleich zu Geräuschen von landenden Flugzeugen zu höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten. Nach Adjustierung für die Geräuschkdauer verschwand dieser Effekt jedoch. Die beobachtete Aufwachwahrscheinlichkeit sank mit zunehmender Geräuschkdauer, was u.a. durch langsamere Pegelanstiegssteilheiten bedingt sein kann. Der SEL (*single event level*) eignete sich im Vergleich zum Maximalpegel $L_{AS,max}$ deutlich schlechter zur Vorhersage fluggeräuschbedingter Aufwachreaktionen. Diese Ergebnisse

werden von denen einer aktuellen holländischen Untersuchung [19] unterstützt.

Situative Variablen: Das Schlafstadium, in dem sich die Versuchsperson befand, bevor das Fluggeräusch auftrat, zeigte eine stark moderierende Wirkung. Die Aufwachwahrscheinlichkeit nahm in der Reihenfolge S2 → REM → S3 → S4 ab. Da relativ viele spontane Aufwachreaktionen aus dem REM Schlaf beobachtet wurden, ergab sich für lärminduzierte Aufwachreaktionen ($P_{\text{Fluggeräusch}} - P_{\text{spontan}}$) eine abnehmende Reaktionsbereitschaft in der Reihenfolge S2 → S3 → REM → S4. Im oberflächlichen Stadium S2 wurden somit im Vergleich zum spontanen Erwachen am leichtesten Aufwachreaktionen hervorgerufen. Mit steigender Anzahl der bereits im Labor verbrachten Untersuchungs Nächte nahm die Reaktionswahrscheinlichkeit ab, was im Sinne einer Gewöhnung und/oder eines kumulierten Schlafdefizits interpretiert werden kann. Im Verlauf einer Nacht nahm die Aufwachwahrscheinlichkeit entsprechend der zunehmenden Entmüdung stetig zu. Der Grad der Ermüdung vor dem Zu-Bett-Gehen, erfragt mit dem Fatigue-Fragebogen (FAT), hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit.

Individuelle Variablen: Männer wachten mit im Mittel 20,1% weniger häufig auf als Frauen (21,4%). Versuchspersonen im Alter von ca. 45 Jahren reagierten am unempfindlichsten, ältere und jüngere Probanden wachten jeweils mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auf. Passchier-Vermeer et al. [19] ermittelten in einer mit Aktometern durchgeführten Feldstudie zu fluggeräuschinduzierten Bewegungen hingegen ein empfindlichstes Alter von ca. 46 Jahren. Eine plausible Erklärung für diesen Unterschied existiert nicht. Mögliche Ursachen sind Unterschiede in der Untersuchungssituation (Labor versus Feld) oder in der Zusammensetzung des Probandenkollektivs. Stärker durch Fluglärm subjektiv vorbelastigte (nicht zu verwechseln mit vorbelasteten) Versuchspersonen reagierten häufiger auf Fluggeräusche. Eine Unterscheidung von größerer Belästigung aufgrund höherer Empfindlichkeit von größerer Empfindlichkeit aufgrund höherer Belästigung ist mit

den vorliegenden Informationen nicht möglich. Versuchspersonen, die sich eher als lärmempfindlich einstuften, reagierten häufiger auf Fluggeräusche als solche, die sich eher als lärmunempfindlich einstuften.

5.4.4 Ergebnisse der Feldstudien

Eine von insgesamt 64 Versuchspersonen konnte aufgrund einer intrinsischen Schlafstörung (sog. *REM-sleep behavior disorder*) nicht in die endgültige Auswertung mit einbezogen werden. Bei den übrigen Versuchspersonen diente die erste Nacht als Anpassungsnacht. Von den verbleibenden 504 Nächten scheiterte in 21 Fällen (4,2%) die Aufzeichnung der akustischen und/oder der elektrophysiologischen Signale. In den übrigen 483 Nächten wurden während der Aufzeichnung 18.509 Fluggeräusche identifiziert. In 1.954 Fällen (10,6%) war die Versuchsperson vorher wach oder im Stadium S1. In 999 Fällen (5,4%) war sie noch nicht eingeschlafen, oder die Bestimmung der Schlafstadien war aufgrund von Elektrodenausfällen nicht bis zum Ende der Nacht möglich. Insgesamt gingen somit 15.556 Geräusche in die endgültige Auswertung ein. In der Feldstudie wurde abweichend von der Laborstudie ein Lärmfenster von 3 Epochen gewählt, da hiermit der Anteil lärminduzierter Reaktionen maximiert wurde.

Im Gegensatz zur Laborstudie herrschten in der Feldstudie keine kontrollierten Bedingungen vor. Das Hervortreten eines Geräusches aus dem Hintergrundgeräusch (Emergenz) wurde in der Vergangenheit neben dem Maximalpegel als wichtige Einflussvariable für das Auftreten einer Aufwachreaktion identifiziert. Aufgrund des konstanten Hintergrundpegels von ca. 30 dB(A) war die Emergenz in den Lärmnächten der Laborstudien ebenfalls konstant. In der Feldstudie wurde der Hintergrundpegel jeweils als energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{AS,eq}$ in der Minute vor dem Beginn eines Fluggeräusches bestimmt. Die Werte lagen zwischen 16,4 und 58,3 dB(A) mit einem Median von 27,1 dB(A). 258 von 15.556 Fluggeräuschen wurden

in der Auswertung nicht berücksichtigt, da ihre Emergenz kleiner oder gleich 0 dB(A) war.

Zwischen zwei Fluggeräuschen und auch während eines Fluggeräusches können Fremdgeräusche auftreten, die sowohl innerhalb als auch außerhalb des Schlafraums entstehen können. Diese Fremdgeräusche wurden in der Feldstudie identifiziert. Ein Fluggeräusch ging nur dann in die Auswertung ein, wenn folgende Bedingungen erfüllt waren:

- In der Minute vor dem Beginn des Fluggeräusches waren nur Geräusche vom Probanden selbst (außer Schnarchen) oder eines vorangehenden Flugzeuges erlaubt. Der Ausschluss von diesen anderen Fluggeräuschen hätte zu einer Unterschätzung der Aufwachwahrscheinlichkeit in Zeiten mit hohem Flugverkehrsaufkommen und damit zu einer systematischen Verzerrung geführt.
- Wenn während des Fluggeräusches gleichzeitig ein Fremdgeräusch eintrat, das eine Aufwachreaktion unabhängig vom Fluggeräusch hätte hervorrufen können, wurde dieses Fluggeräusch während der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Vom Probanden selbst hervorgerufene Geräusche, die als Reaktion auf das Fluggeräusch entstehen können, wurden dagegen explizit nicht ausgeschlossen.

Insgesamt trafen die Bedingungen auf 10.658 Fluggeräusche zu, auf denen die unten vorgestellten Regressionsmodelle beruhen. Eine Versuchsperson, die zusammen mit Ihrem Lebenspartner gemessen wurde, schnarchte ununterbrochen, so dass keines der Fluggeräusche die oben genannten Bedingungen erfüllte. Demnach gingen nur 61 der zunächst vorgesehenen 64 Versuchspersonen in die endgültige Auswertung ein.

Auch in der Feldstudie wurden virtuelle Fluggeräusche benutzt, um die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit zu ermitteln: Bei jedem Fluggeräusch wurde in den jeweils sieben anderen Nächten einer Versuchsperson zum gleichen Zeitpunkt nach Schlafbeginn überprüft, ob sich ein Fluggeräusch

im Lärmfenster befand, und wenn nein, ob spontan eine Aufwachreaktion oder ein Wechsel in das Stadium S1 auftrat oder nicht. Letztlich gingen dadurch 19.608 virtuelle Fluggeräusche in die Auswertung ein.

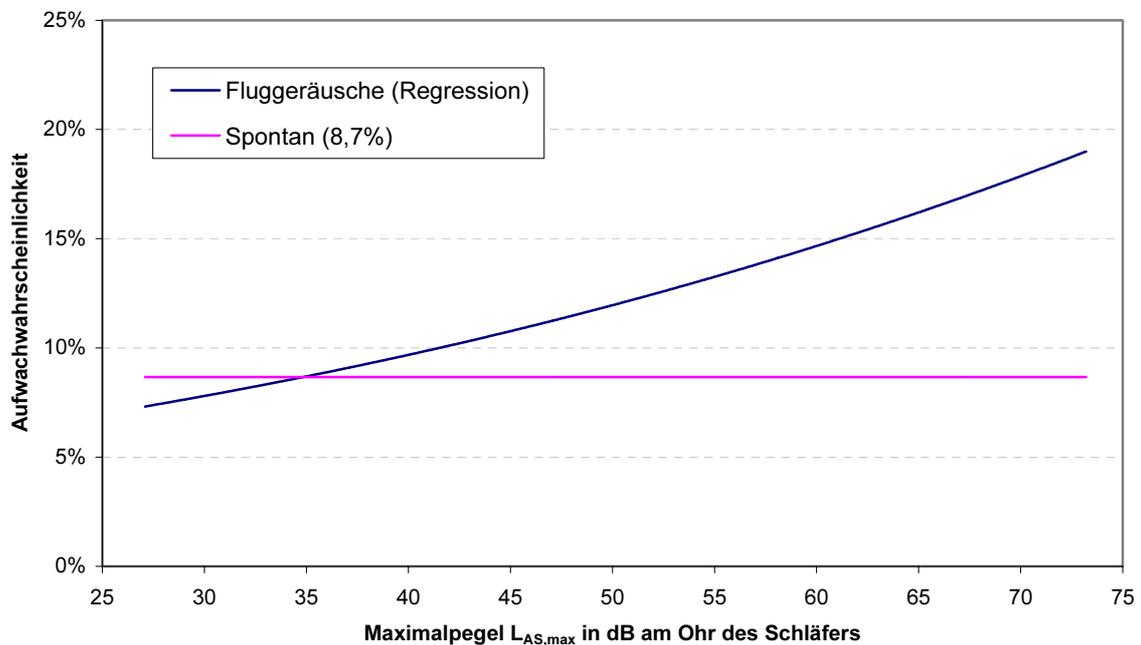


Abbildung 5.7: Feldstudie: Logistische Regression mit Zufallseffekten. Maximalpegel, Hintergrundpegel $L_{AS,eq}$ 60 Sekunden vor Auftreten des Fluggeräuschs und Interaktionsterm als einzige erklärende Variablen. Basierend auf 61 Versuchspersonen und 10.658 Fluggeräuschen. Als Hintergrundpegel wurde für die Abbildung der Median von 27,1 dB(A) gewählt.

In Abbildung 5.7 ist das Ergebnis eines multivariablen Regressionsmodells dargestellt, das auf den Daten der Feldstudie beruht. Neben dem Maximalpegel und dem Hintergrundpegel ist auch der signifikante Interaktionsterm zwischen $L_{AS,max}$ und Hintergrundpegel im Modell enthalten. Letzterer wurde für Abbildung 5.7 mit 27,1 dB (Median) als konstant angenommen. Wegen der hohen Variabilität des Hintergrundpegels ist eine Darstellung der tatsächlich beobachteten Daten wie in Abbildung 5.5 nicht möglich.

Die Reaktionswahrscheinlichkeit war im Feld bei gleichen Maximalpegeln deutlich geringer als in den Laborstudien (für einen Vergleich s. Abbildung 5.9). Der höchste im Feld gemessene Maximalpegel lag innen bei

73,2 dB(A). Hier wurde eine Aufwachwahrscheinlichkeit von ca. 19% beobachtet (Labor: 47,4%).

Die mit virtuellen Lärmereignissen berechnete spontane Aufwachwahrscheinlichkeit betrug im Mittel 8,7%. Bei einem Lärmfenster von drei Epochen entspricht dieser Wert 2,9% pro Epoche. Im Labor war die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit mit 3,1% pro Epoche etwas höher als im Feld (6,2% bei einem Lärmfenster von 2 Epochen).

Bei Verwendung des in Abbildung 5.7 dargestellten Modells wurde, im Gegensatz zum Labor, ein Schwellenwert von etwa 35 dB(A) gefunden. Erst bei Maximalpegeln oberhalb 35 dB(A) kam es demnach zu einer Zunahme der unter Fluglärm beobachteten im Vergleich zur spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit. Der Schwellenwert lag etwa 8 dB(A) über dem angenommenen Hintergrundpegel.

In dem Modell, auf dem die Regressionslinie in Abbildung 5.8 beruht, finden sich neben Maximalpegel, Hintergrundpegel und Interaktionsterm zusätzlich das Schlafstadium, in dem sich die Versuchsperson vor Auftreten des Fluggeräusches befindet (StadVor), und die verstrichene Schlafzeit (SchlZeit) als erklärende Variablen.

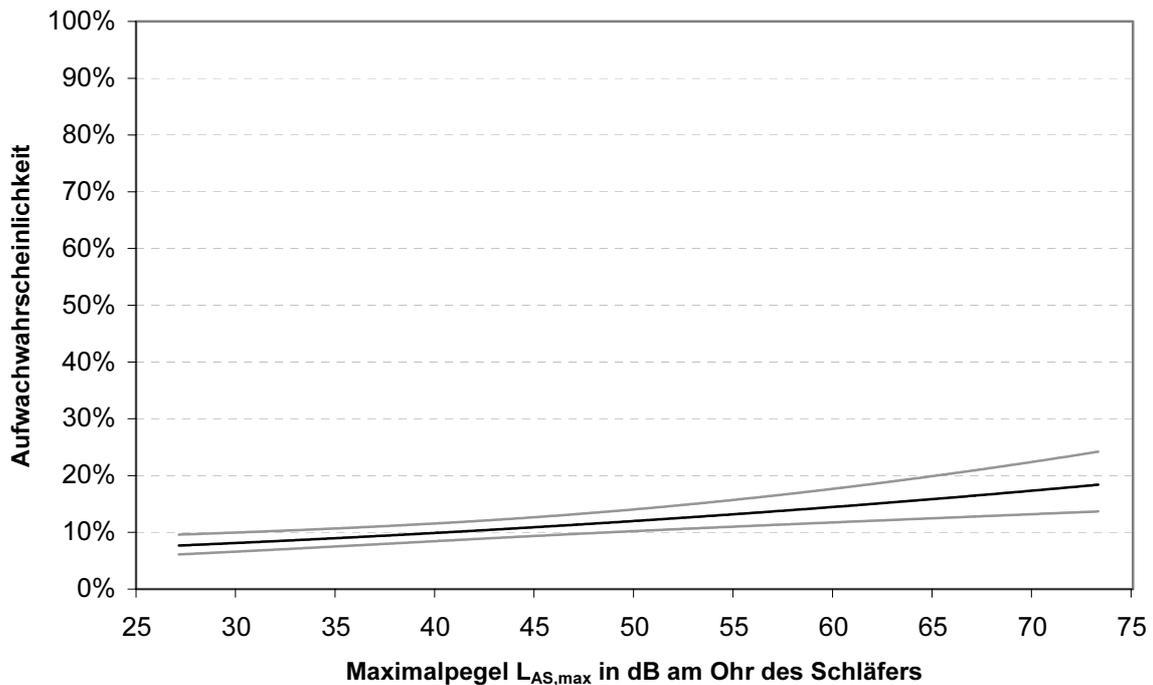


Abbildung 5.8: Feldstudie: Logistische Regression mit Zufallseffekten und 95% Konfidenzintervall. Maximalpegel, Hintergrundpegel 60 Sekunden vor Auftreten des Fluggeräuschs (= Median 27,1 dB), Interaktionsterm, Schlafstadium vorher (= Stadium S2) und verstrichene Schlafzeit (= 601 Epochen) als erklärende Variablen. Basierend auf 61 Versuchspersonen und 10.658 Fluggeräuschen.

Die Werte für die zusätzlichen erklärenden Variablen und der Maßstab auf der Hochachse wurden so gewählt, dass Abbildung 5.8 direkt mit einem auf den Daten der Laborstudie beruhenden Modell verglichen werden kann, welches in Abbildung 5.6 dargestellt ist. Aus präventivmedizinischen Gründen wurde das Schlafstadium vor dem Fluggeräusch mit S2, also dem geräuschempfindlichsten Stadium angenommen. Für die verstrichene Schlafzeit wurde ein Wert von 601 Epochen (ca. 5 Stunden) gewählt, was in der Feldstudie der Mitte der zweiten Nachthälfte entsprach. Entsprechend ist die Linie in Abbildung 5.8 im Vergleich zu Abbildung 5.7 zu etwas höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten verschoben.

Die Präzision der Schätzung kann an der Weite des 95% Konfidenzintervalls abgelesen werden (graue Linien in Abbildung 5.8). Sie ist über den gesamten Wertebereich des Maximalpegels aufgrund der großen Fallzahlen

hoch und schwankt zwischen 3,1% bei 39 dB(A) und 10,5% bei 73,2 dB(A).

Neben dem Maximalpegel wurden folgende Variablen zunächst im univariablen Modell und anschließend in multivariablen Modellen auf ihren Einfluss auf fluggeräuschinduziertes Erwachen überprüft:

Akustische Variablen: Der Hintergrundpegel, definiert als $L_{AS,eq}$ eine Minute vor Beginn des gerade untersuchten Fluggeräusches, hatte einen signifikanten Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit. Dieser war bei geringen Maximalpegeln stärker als bei hohen Maximalpegeln, d.h. es konnte eine signifikante Interaktion festgestellt werden. Kurze Geräusche mit starker Pegelanstiegssteilheit (dB/s) gingen mit höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten einher als längere Geräusche oder Geräusche mit geringer Pegelanstiegssteilheit. Die in den Laborstudien ermittelte Gewöhnung an die Fluggeräusche innerhalb einer Nacht war in den Feldstudien wesentlich geringer ausgeprägt und statistisch nicht signifikant.

Situative Variablen: Das Schlafstadium, in dem sich die Versuchsperson befand, bevor das Fluggeräusch auftrat, zeigte eine stark moderierende Wirkung. Im Gegensatz zum Labor nahm die Aufwachwahrscheinlichkeit in der Reihenfolge REM \rightarrow S2 \rightarrow S3 \rightarrow S4 ab. Da spontan annähernd so viele Aufwachreaktionen aus dem REM Schlaf beobachtet wurden wie unter Fluglärm, ergab sich für lärminduzierte Aufwachreaktionen ($P_{\text{Fluggeräusch}} - P_{\text{spontan}}$) jedoch eine abnehmende Reaktionsbereitschaft in der Reihenfolge S2 \rightarrow S3 \rightarrow S4 \rightarrow REM. Im oberflächlichen Stadium S2 wurden somit im Vergleich zum spontanen Erwachen am leichtesten Aufwachreaktionen hervorgerufen. Die Nummer der Untersuchungsnacht hatte im Gegensatz zum Labor keinen Einfluss auf das Aufwachverhalten. Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Schlafraum beeinflussten die Aufwachwahrscheinlichkeit ebenfalls nicht signifikant. Wie im Labor nahm die Aufwachwahrscheinlichkeit im Verlauf einer Nacht entsprechend der zunehmenden Entmüdung stetig zu.

Individuelle Variablen: Im Gegensatz zum Labor wurde kein signifikanter Einfluss von Alter oder Geschlecht auf die Aufwachwahrscheinlichkeit festgestellt. Auch die subjektive Einschätzung der Fluglärmvorbelastung und die Einschätzung der Lärmempfindlichkeit spielten keine Rolle. Die subjektive Einschätzung der Müdigkeit vor dem Zu-Bett-Gehen zeigte wie im Labor keinen signifikanten Effekt.

5.4.5 Vergleich der Ergebnisse von Labor- und Feldstudie

In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse aus den Labor- und Feldstudien gegenübergestellt. Dargestellt ist jeweils die Aufwachwahrscheinlichkeit, die allein auf Fluggeräusche zurückgeführt werden kann (lärminduziert), d.h. die spontane wurde von der unter Fluglärm beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeit subtrahiert. Nur auf diese Weise ist ein Vergleich von Labor- und Feldstudie möglich, da Lärmfenster von unterschiedlicher Dauer verwendet wurden, um den Anteil fluglärminduzierter Reaktionen zu maximieren. Die Darstellung erfolgt jeweils nur über den untersuchten Wertebereich des Maximalpegels, der im Labor von 45 bis 80 dB(A) und im Feld bis 73,2 dB(A) reicht.

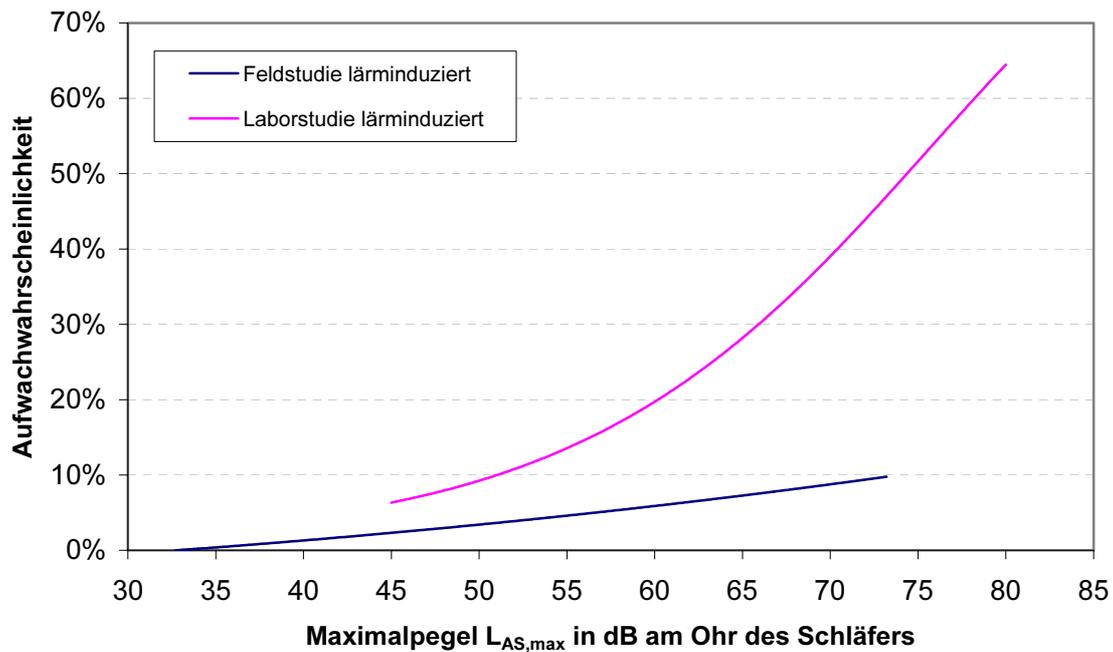


Abbildung 5.9: Logistische Regression mit Zufallseffekten. Vergleich der Ergebnisse aus Labor und Feld. Dargestellt sind die Aufwachwahrscheinlichkeiten, die allein auf die Fluggeräusche zurückzuführen sind (lärminduziert). Beschreibung der Modelle im Text.

Beide Modelle sind multivariabel und beinhalten Maximalpegel, Schlafstadium vor Auftreten des Fluggeräuschs und verstrichene Schlafzeit als erklärende Größen. Im Modell der Feldstudie sind zusätzlich der Hintergrundpegel und der Interaktionsterm zwischen Hintergrund- und Maximalpegel enthalten. Für den Hintergrundpegel wurde wie in Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 ein konstanter Wert von 27,1 dB (Median) angenommen. Durch die Hinzunahme des Schlafstadiums vorher und der verstrichenen Schlafzeit verschiebt sich die oben beschriebene Schwelle von ca. 35 dB(A) auf ca. 32,7 dB(A). Das Modell der Laborstudie hingegen enthält zusätzlich Maximalpegel² als erklärende Variable. In beiden Modellen wurde präventivmedizinisch das Schlafstadium vor dem Fluggeräusch mit S2, also dem geräuschempfindlichsten Stadium angenommen. Für die verstrichene Schlafzeit wurde ein Wert von 601 Epochen (ca. 5 Stunden) gewählt, was in der Feldstudie der Mitte der zweiten Nachthälfte entsprach.

Die Unterschiede zwischen Labor- und Feldstudie können über den gesamten Wertebereich des Maximalpegels beobachtet werden. Mit zunehmendem Maximalpegel werden die Unterschiede aufgrund einer schneller wachsenden Aufwachwahrscheinlichkeit in der Laborstudie größer.

Die geringere Reaktionswahrscheinlichkeit im Feld im Vergleich zum Labor wurde 1995 in einer Arbeit von Pearsons [20] als Ergebnis einer Meta-Analyse verschiedener Studien zum Verkehrslärm 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 [12] 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 ausfallen als im Labor. Da es sich jeweils um dieselben Geräusche handelte, konnte der beobachtete Unterschied nur durch die verschiedenartige Umgebung hervorgerufen worden sein (s. Seite 68). Die Aufwachwahrscheinlichkeiten zu Hause waren jedoch immer noch höher als die von Pearsons [20] 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.

Diese Befunde konnten wir durch eine Subanalyse von 20 Versuchspersonen stützen, die sowohl an der Feld- als auch an der Laborstudie teilnahmen. Da diese Probanden in ihrer häuslichen Umgebung mitunter seit Jahren mit Fluggeräuschen konfrontiert waren, würde man aufgrund eines Gewöhnungseffektes im Labor eine geringere Reaktionswahrscheinlichkeit erwarten als bei den übrigen Teilnehmern der Laborstudie, die zum größeren Teil zu Hause nicht mit Fluggeräuschen vorbelastet waren. Tatsächlich

wachten die 20 Teilnehmer beider Studienformen jedoch im Labor geringfügig häufiger auf als die Versuchspersonen, die ausschließlich an der Laborstudie teilnahmen. Mögliche Gründe sind auch hier neben der ungewohnten Umgebung die im Labor eingespielten Fluggeräusche, die sich von der spezifischen Situation zu Hause, je nach Abstand zum Flugpfad, deutlich unterscheiden können. Bei Flughafenanwohnern scheint eine Gewöhnung deshalb nicht grundsätzlich an Fluggeräusche überhaupt stattzufinden, sondern vielmehr spezifisch an die spezielle häusliche Geräuschsituation.

Es ist des weiteren möglich, dass ein Fluggeräusch, welches im Labor eine Aufwachreaktionen oder einen Wechsel in das Stadium S1 hervorruft, im Feld nur noch zu subtileren Veränderungen der Schlafstruktur führt, wie z.B. zu Schlaftiefenwechseln von Stadium S4 in das Stadium S2. Auch diese Möglichkeit wurde untersucht. Bei der Analyse von Schlaftiefenwechseln fielen die Unterschiede zwischen Labor und Feld jedoch ähnlich groß aus wie bei der Analyse von Aufwachreaktionen und Wechseln in das Stadium S1 allein.

5.5 Aufwachdauer

Für die Bewertung von fluglärminduzierten Aufwachreaktionen spielt neben der Anzahl auch die Dauer der Reaktionen eine Rolle. In Kapitel 5.4.1 wurde bereits erläutert, dass längere Aufwachreaktionen dadurch eine besondere Bedeutung haben, dass sie potentiell erinnert werden und die subjektive Bewertung der Schlafqualität damit beeinflussen können. Es stellt sich also die Frage, ob Fluggeräusche neben der Anzahl auch die Dauer der Aufwachreaktionen verändern können.

Daher wurde in der Laborstudie untersucht, ob sich spontane Aufwachreaktionen in ihrer Dauer von Aufwachreaktionen unterscheiden, die in Folge eines Fluggeräusches beobachtet wurden. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 5.10 dargestellt, wobei zwischen Fluggeräuschen mit niedrige-

ren (45 bis 60 dB) und höheren (65 bis 80 dB) Maximalpegeln unterschieden wurde.

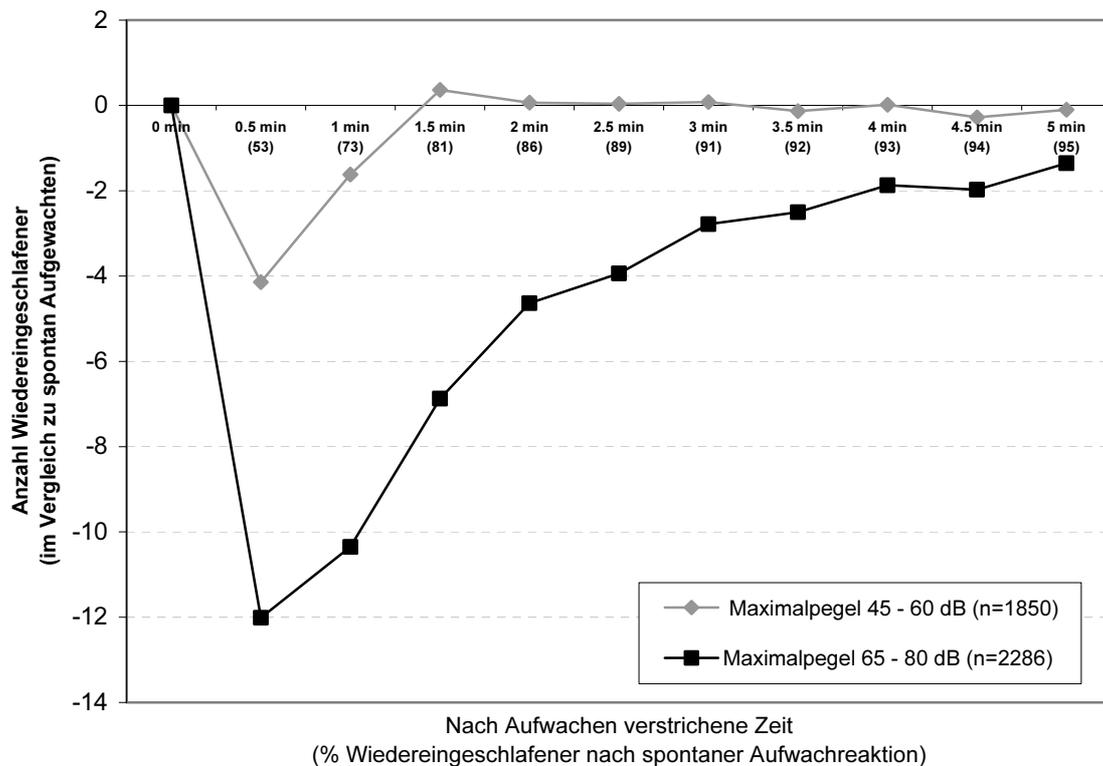


Abbildung 5.10: Aufwachdauer in Abhängigkeit vom Maximalpegel (Laborstudie).

Man erkennt zunächst, dass von den spontan Erwachten nach 30 Sekunden bereits 53% wieder eingeschlafen sind. Nach drei Minuten sind es mehr als 90%, nach 5 Minuten sogar 95%. Da das Wachbewusstsein wahrscheinlich erst bei Aufwachreaktionen mit einer Dauer von mindestens vier Minuten einsetzt [4], wird nur ca. jede 10. spontane Aufwachreaktion erinnert.

Bei den Geräuschen mit eher niedrigen Maximalpegeln zwischen 45 und 60 dB(A) wurden nur geringe Unterschiede in der Aufwachdauer im Vergleich zu spontanen Aufwachreaktionen gefunden: Nach 30 Sekunden waren 4% weniger eingeschlafen, also 49% statt 53%. Nach 1,5 Minuten wurde kein Unterschied mehr beobachtet. Daraus kann geschlossen werden, dass bei eher niedrigen Maximalpegeln keine zusätzlichen erinnerbaren Aufwachreaktionen durch Fluggeräusche induziert werden.

Bei den eher lauten Fluggeräuschen mit Maximalpegeln zwischen 65 und 80 dB(A) traten größere Unterschiede auf. Hier waren nach 30 Sekunden im Mittel 12% der Versuchspersonen weniger eingeschlafen, also 41% statt 53%. Auch nach vier Minuten waren noch 2% wach, die in der spontanen Situation bereits wieder eingeschlafen waren. Aufgrund der Dauer dieser prolongierten Aufwachreaktion ist es möglich, dass sich diese am nächsten Tag daran erinnern. Anders ausgedrückt: Jede 50. Aufwachreaktion, die durch Maximalpegel größer oder gleich 65 dB(A) hervorgerufen wurde, wurde am nächsten Tag wahrscheinlich erinnert.

Insgesamt unterscheiden sich durch Fluggeräusche ausgelöste Aufwachreaktionen nach Abbildung 5.10 in ihrer Dauer von spontanen Aufwachreaktionen, wobei die Größe des Unterschieds von der Höhe des Maximalpegels abhängt.

5.6 Wiedereinschlafen

Die oben beschriebenen Analysen gelten nur für Situationen, in denen die Versuchsperson schläft bzw. sich im Schlafstadium S2, S3, S4 oder REM befindet. Wie bereits näher erläutert, befanden sich die Versuchspersonen jedoch in 2.857 Fällen (Labor) bzw. 1.954 Fällen (Feld) vor dem Auftreten eines Fluggeräuschs im Schlafstadium S1, oder sie waren wach.

In diesen Situationen können Fluggeräusche den Schlaf negativ beeinflussen, indem sie das Wiedereinschlafen verhindern. Wenn der Mensch bereits so lange wach liegt, dass er seine Umgebung bewusst wahrnimmt, können diese Situationen zu starken Belästigungsreaktionen führen. So beschwerten sich Flughafenanwohner besonders häufig über in den frühen Morgenstunden auftretende Fluggeräusche. Der zu dieser Uhrzeit verminderte Schlafdruck führt neben niedrigeren Weckschwellen auch dazu, dass die Menschen erschwert wieder einschlafen, insbesondere wenn sie durch Geräusche von Flugzeugen, die sie jetzt eventuell bewusst wahrnehmen, daran gehindert werden.

Die Analyse dieser Annahmen ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Zunächst wird deutlich, dass die Versuchspersonen der Laborstudie auch in den Basisnächten in der zweiten Nachthälfte später wieder einschlafen als in der ersten Nachthälfte: In der ersten Nachthälfte sind nach fünf Minuten 75% (graue Linie) wieder eingeschlafen, während es in der zweiten Nachthälfte 63% (rosa Linie) sind.

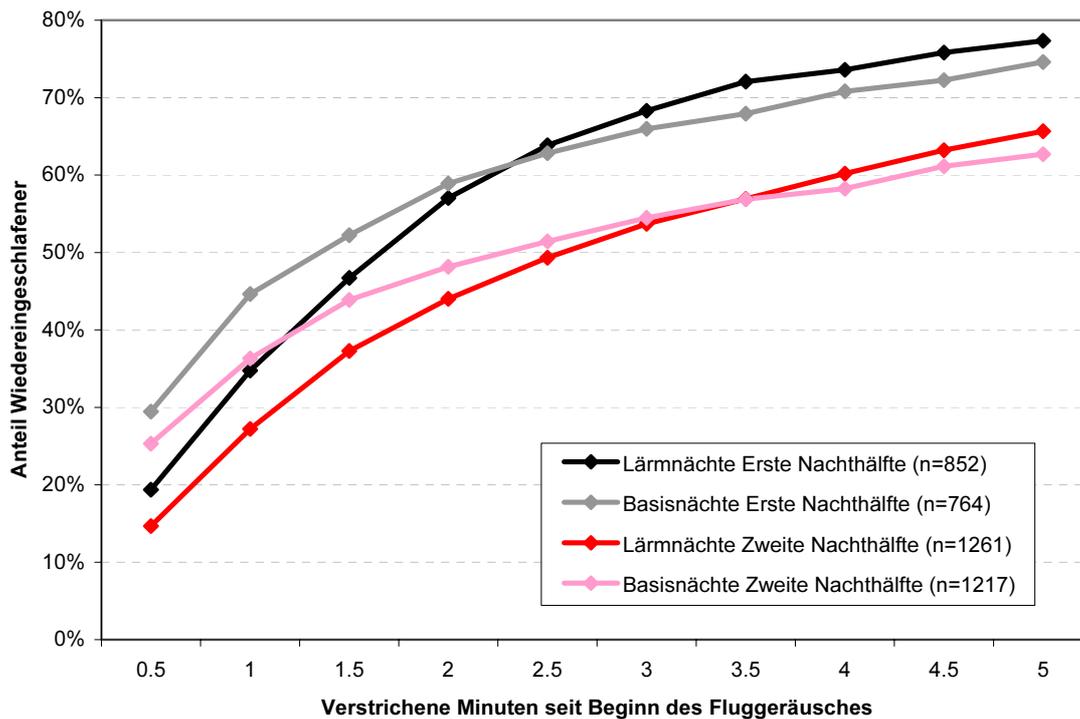


Abbildung 5.11: Labor: Anteil Wiedereingeschlafener in Abhängigkeit von der Nachthälfte in Basisnächten und Lärmnächten.

Fluggeräusche führten in der ersten Nachthälfte zu einer Verringerung des Anteils Wiedereingeschlafener. Nach 30 Sekunden waren nur 19% im Vergleich zu 29% in den Basisnächten wieder eingeschlafen. Nach 2,5 Minuten konnte jedoch kein Unterschied mehr zwischen Lärm- und Basisnächten beobachtet werden. Der Anteil Wiedereingeschlafener war ab 3 Minuten nach Fluggeräuschbeginn sogar eher größer als in den Basisnächten, was evtl. durch einen durch Fluggeräusche in den vorausgehenden Nächten oder in derselben Nacht erzeugten vermehrten Schlafdruck erklärt werden kann.

In der zweiten Nachthälfte kann man ebenfalls Unterschiede zwischen Basis- und Lärmnächten beobachten. Im Gegensatz zur ersten Nachthälfte waren hier in den Lärmnächten erst nach 3,5 Minuten genauso viele Versuchspersonen wieder eingeschlafen wie in den Basisnächten.

Die Analyse zeigt, dass Fluggeräusche in der zweiten Nachthälfte aufgrund der längeren spontanen Aufwachdauer mit einer etwas höheren Wahrscheinlichkeit im Wachzustand erlebt werden als in der ersten Nachthälfte. Fluggeräusche, die in der Laborstudie auf einen wachen Organismus trafen, führten zu einer Verzögerung des Wiedereinschlafens. Diese Verzögerung war mit im Mittel 2,5 Minuten in der ersten und 3,5 Minuten in der zweiten Nachthälfte jedoch erstaunlich kurz.

5.7 Bedeutung der Ergebnisse für die Diskussion von Fluglärmschutzkriterien

In den Vorschlägen für die Novellierung des Fluglärmgesetzes dominiert eine Kombination von *number above threshold* (NAT)- und L_{eq} -Kriterien. An dieser Stelle kann keine ausschöpfende Diskussion von Vor- und Nachteilen dieser Kriterien geliefert werden, es soll jedoch trotzdem kurz auf die Problematik eingegangen werden.

NAT-Kriterien beruhen auf der Annahme, dass unterhalb eines Grenzwertes oder einer Schwelle keine oder nur noch sehr geringe Fluglärmwirkungen auftreten. In der vorliegenden Studie wurde gezeigt, dass bei den in dieser Untersuchung beobachteten Flughafenwohnern bei der Induktion von Aufwachreaktionen eine Schwelle bei einem $L_{AS,max}$ von ca. 33 dB(A) existiert, d.h. erst unterhalb dieser Schwelle wurden keine Reaktionen mehr beobachtet. Die momentan diskutierten NAT-Werte liegen weit oberhalb dieser Schwelle, so dass Reaktionen, die durch Fluggeräusche mit Maximalpegeln zwischen der Schwelle und dem vorgeschlagenen NAT-Wert ausgelöst werden, nur im L_{eq} Berücksichtigung finden. Allerdings können die auf den L_{eq} basierenden sog. Auffangkriterien dieses nicht vollständig kompensieren.

sieren, da der L_{eq} maßgeblich durch Geräusche mit hohen Maximalpegeln beeinflusst wird.

Eine Halbierung der Anzahl der Fluggeräusche mit gleichem Maximalpegel bedeutet, dass der $L_{eq(3)}$ um 3 dB sinkt. Kriterien, die alleine auf dem $L_{eq(3)}$ beruhen, gehen demnach implizit davon aus, dass neben dieser Energieäquivalenz auch eine Wirkungsäquivalenz vorliegt, d.h. dass eine Verminderung des $L_{eq(3)}$ um 3 dB auch zu einer Halbierung der hervorgerufenen Wirkung führt, also z.B. zu einer Reduktion der Anzahl der induzierten Aufwachreaktionen um 50%.

In Abbildung 5.12 wird anschaulich dargestellt, dass diese Wirkungsäquivalenz nicht gegeben ist. In Anlehnung an dem in der Epidemiologie häufig benutzten Begriff *numbers needed to harm* ist hier in Abhängigkeit vom Maximalpegel die Anzahl der Fluggeräusche dargestellt, die genau eine zusätzliche Aufwachreaktion hervorruft.

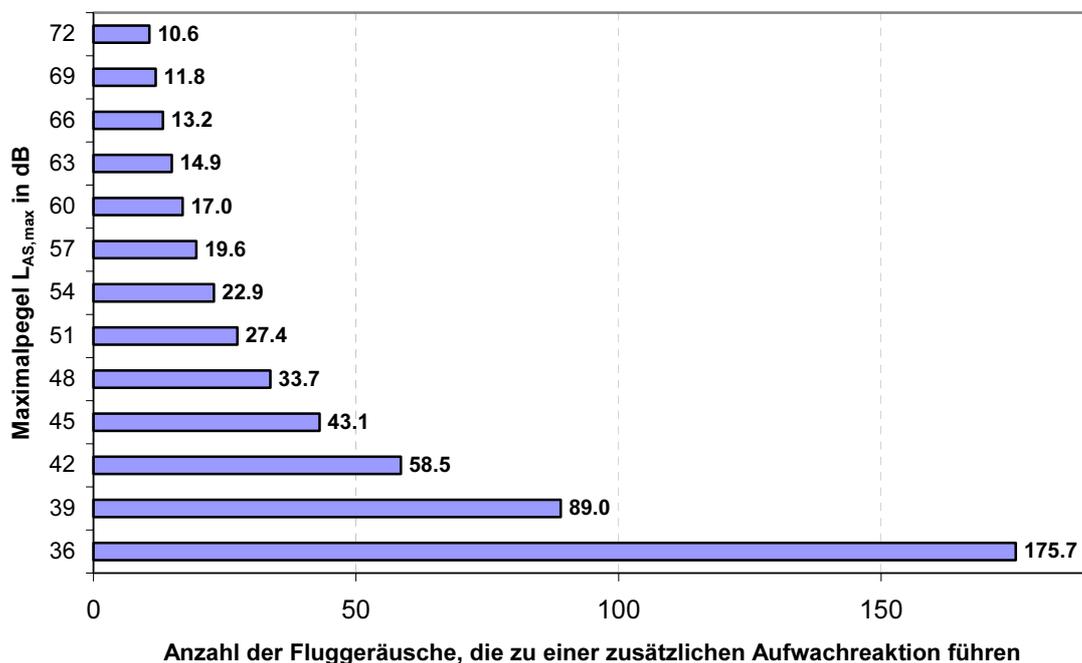


Abbildung 5.12: Anzahl Fluggeräusche, die zu einer zusätzlichen Aufwachreaktion führen, in Abhängigkeit vom Maximalpegel. Ergebnisse basieren auf der in der Feldstudie gefundenen Dosis-Wirkungsbeziehung.

Eine Reduzierung des Maximalpegels von 72 auf 69 dB(A) erlaubt, bei gleicher Wirkung, nicht eine Verdoppelung der Anzahl der Fluggeräusche, sondern lediglich eine Zunahme um 11% von im Mittel 10,6 auf 11,8 Bewegungen. Die prozentuale Zunahme der Anzahl der Bewegungen bei Reduktion des Maximalpegels um 3 dB(A) steigt von 11% bei einer Senkung des Maximalpegels von 72 auf 69 dB(A) kontinuierlich auf ca. 97% bei einer Senkung von 39 auf 36 dB(A), d.h. erst bei Werten sehr nahe der in dieser Studie gefundenen Schwelle kann eine Wirkungsäquivalenz hinsichtlich der durch Fluggeräusche induzierten Aufwachreaktionen beobachtet werden.

5.8 Anwendung der Ergebnisse auf einen deutschen Verkehrsflughafen

Für die Ausweisung von Schutzzonen nach dem derzeit noch gültigen Fluglärmsgesetz von 1971 werden für jeden Ort, der in der Umgebung eines Flughafens liegt, anhand der Flugbewegungszahlen und des Flugzeugmixes, ermittelt in den sechs verkehrsreichsten Monaten des Jahres, Immissionswerte berechnet. Die Gebiete werden ausschließlich anhand akustischer Parameter ausgewiesen, z.B. Bereiche, in denen der $L_{eq(4)}$ mehr als 75 dB(A) beträgt.

Die in dieser Studie ermittelte Dosis-Wirkungsbeziehung für fluglärmbedingte Aufwachreaktionen kann nun dazu verwendet werden, zusätzlich zu den akustischen Bezugsgrößen wirkungsspezifische Größen zu definieren. Daraus kann ab sofort für jeden Immissionsort der Bevölkerungsanteil bestimmt werden, der genau keinmal, genau einmal, genau zweimal usw. zusätzlich durch Fluggeräusche aufwacht, sofern für den Immissionsort die Bewegungszahlen bekannt sind. Die Wirkungsprognose kann damit eine große Hilfe darstellen, um das Schutzbedürfnis der betroffenen Bevölkerung besser definieren zu können. Sie beruht deshalb auf den im Feld ermittelten Daten, da nur diese dazu in der Lage sind, die in der Nähe eines Verkehrsflughafens vorliegenden Gegebenheiten realistisch abzubilden.

Um das Potential der Wirkungsprognose exemplarisch darzustellen, werden in Abbildung 5.13 am Frankfurter Flughafen auf $L_{eq(3)}$ -Kriterien basierende Bereiche mit drei Gebieten verglichen, außerhalb derer im Mittel weniger als eine, zwei oder drei zusätzliche Aufwachreaktion durch Fluggeräusche hervorgerufen werden. Die gewählten Werte von im Mittel einer, zwei oder drei zusätzlichen Aufwachreaktionen wurde beispielhaft gewählt und sind nicht als Vorschlag für gesetzgeberische Maßnahmen zu verstehen und zu bewerten.

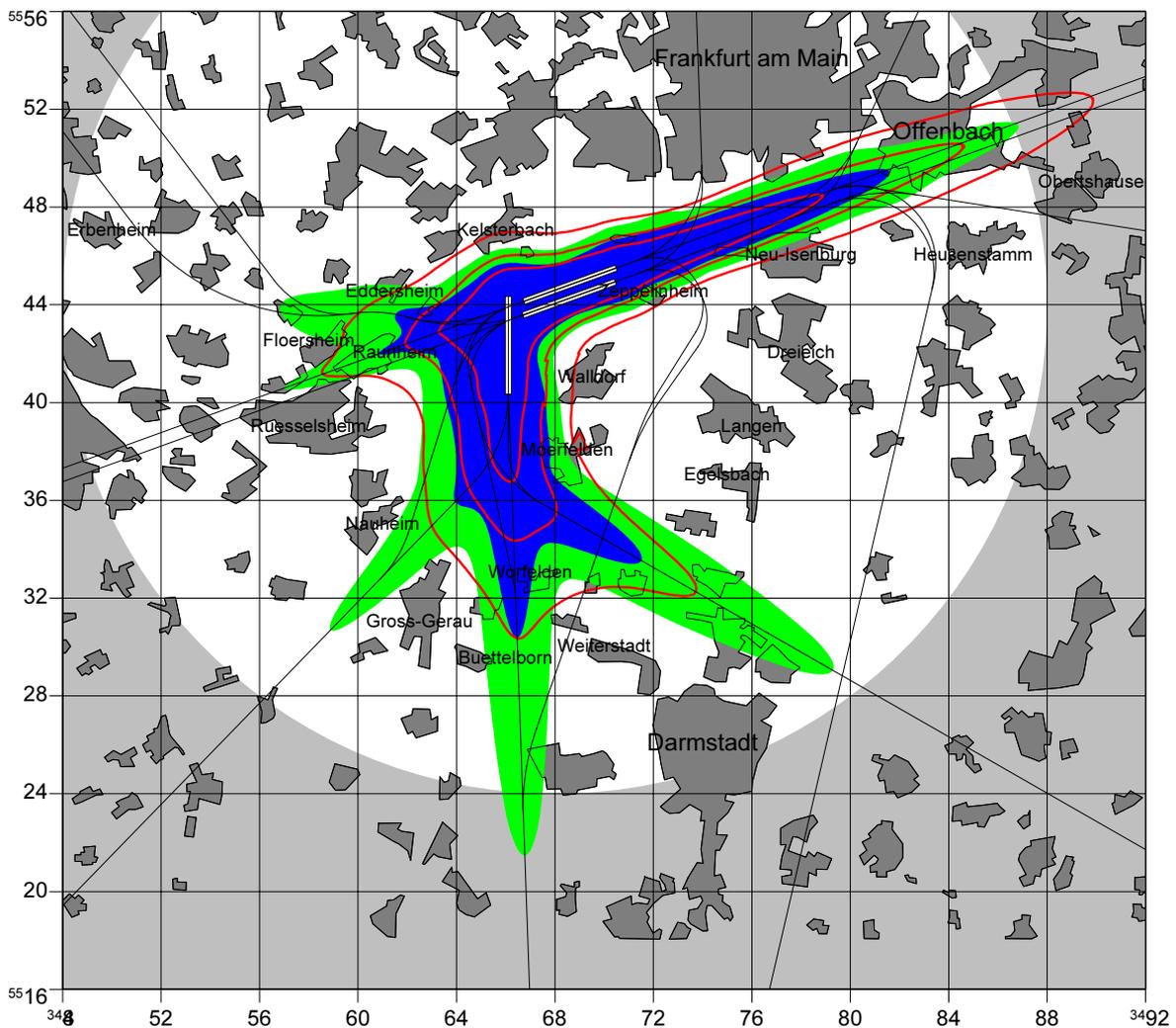


Abbildung 5.13: Wirkungsprognose für den Frankfurter Flughafen: im Mittel eine, zwei oder drei zusätzliche Aufwachreaktionen durch Fluggeräusche (rote Linien), $L_{eq(3)}$ 55 dB (blau), $L_{eq(3)}$ 50 dB (grün).

Man erkennt offensichtliche qualitative Unterschiede: Die durch die roten Linien ausgewiesene Gebiete sind insbesondere in den Bereichen, in denen

viele Überflüge mit vergleichsweise geringen Maximalpegeln beobachtet werden können, deutlich größer, dagegen in Bereichen, in denen relativ wenige Überflüge mit vergleichsweise hohen Maximalpegel stattfinden, deutlich geringer.

Anmerkung: Dieser Bericht wurde vor Drucklegung im Internet veröffentlicht. Wir wurden darauf hingewiesen, dass Hume und Whitehead in der auf Seite 59 zitierten Untersuchung [12] nur in der häuslichen Umgebung Fluglärm applizierten, also keine intraindividuellen Vergleiche zwischen Labor- und Feldbedingungen herstellten. Die Interpretation der Ergebnisse bleibt jedoch zunächst unverändert, auch wenn die Aussagekraft einer Untersuchung mit intraindividuellem Vergleich höher einzuschätzen ist.

6 Psychologie

Julia Quehl

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 Feldstudienenerhebungen 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 (Abbildung 6.1), erfolgte keine Betrachtung der Bewertungen auf den oberen 25-30% der Skala, die nach dem sogenannten Schultz-Kriterium [28] 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 Personen, deren Lärmbelästigung im mittleren Bereich der verwendeten Antwortskala liegt, ignoriert wird.

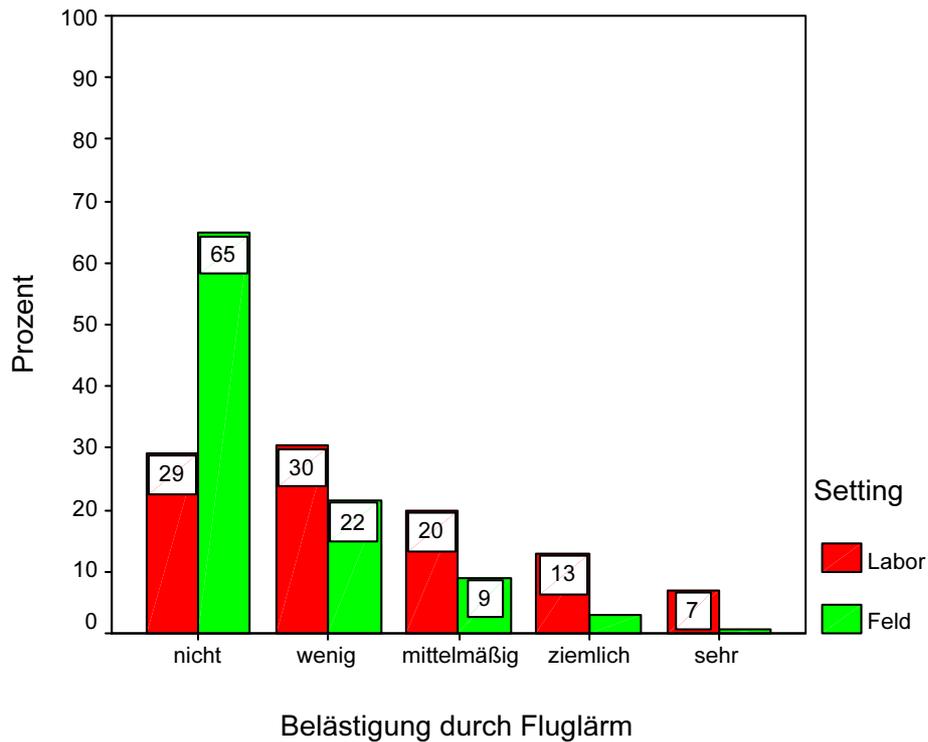


Abbildung 6.1: Prozentuale Verteilung der Belästigungsbeurteilung (Frage: „Wie stark wurden Sie durch den Fluglärm der vergangenen Nacht belästigt?“) für die Experimentalgruppen aus den Laborstudien (N = 112) und die Feldstudienteilnehmer (N = 64).

Da in der Literatur sowohl der $L_{AS,eq}$ [2] als auch der $L_{AS,max}$ zusammen mit der Anzahl an Fluglärmereignissen [6,27] als valide physikalische Indikatoren zur Beschreibung der Fluglärmbelästigung 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 (Vorbelästigung durch Fluglärm, Lärmempfindlichkeit, Gewöhnung an Fluglärm, Alter, Geschlecht) Moderatoren integriert und auf Signifikanz geprüft.

In den laborspezifischen Regressionsmodellen L1 (Anzahl und $L_{AS,max}$) und L2 ($L_{AS,eq}$) erweisen sich das Geschlecht (vorhergesagter Anteil durch Flug-

lärm belastigter Personen bei Frauen höher), die Vorbelastung durch Fluglärm (je vorbelastigter, desto höher der Anteil Fluglärm-belastigter) und die eingestufte Notwendigkeit des Flugverkehrs (je geringer die Notwendigkeit, desto höher der Anteil Belastigter) 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 Fluglärm-belastigung (Abbildung 6.2). Das Ausmaß an Belastigung wächst linear sowohl mit Ansteigen des $L_{AS,max}$ als auch der Häufigkeit von Ereignissen, was mit Befunden aus bisherigen Feldstudien zur Fluglärmwirkung übereinstimmt [10,23-25]. 128 mal 55 dB(A) führen zum höchsten Anteil prognostizierter Lärm-belastigter von über 80%. Im Gegensatz zu vorangegangenen Felduntersuchungen steigt der Teil der Belastigten auch bei wenigen Flugbewegungen (< 16 Überflüge pro Nacht) mit zunehmendem $L_{AS,max}$ signifikant an. L2 prognostiziert einen signifikanten Zuwachs an Belastigten mit steigendem $L_{AS,eq}$ (15% bei 30,6 dB(A) bis 70% bei 46,6 dB(A)) (ohne Abbildung).

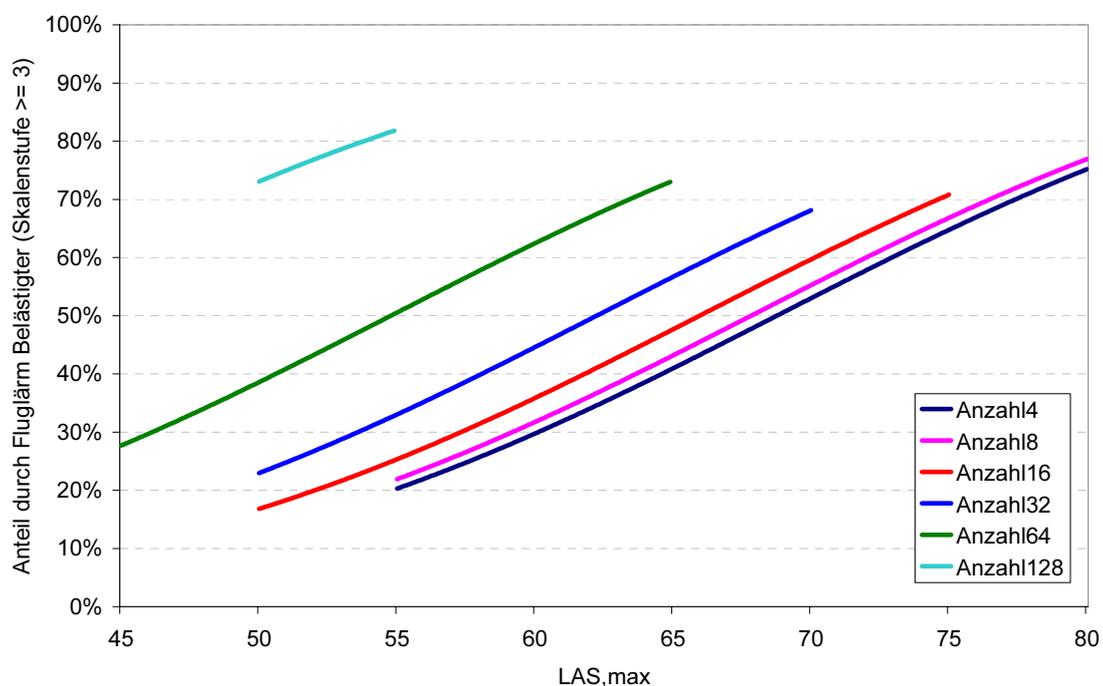


Abbildung 6.2: Durch Regressionsmodell L1 vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belastigter (Skalenstufe 3 bis 5) in Abhängigkeit vom Maximalpegel $L_{AS,max}$ und der Anzahl an Flugereignissen.

In die feldspezifischen Regressionsmodellen F1 (Anzahl) und F2 ($L_{AS,eq}$) fließen die Gewöhnung an Fluglärm (je geringer die Gewöhnung, desto höher der Anteil Fluglärmbelästigter) 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 Fluglärmbelästigung (ohne Abbildung). Der Anteil an belästigten Personen nimmt mit dem Anstieg der Häufigkeit von Ereignissen zu. 138 Fluglärmsituationen pro Nacht bedingen das höchste Ausmaß an Lärmbelästigten (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 6.3).

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 6.3). Bei einem $L_{AS,eq}$ von 30,6 dB(A) ist der prognostizierte Teil Fluglärmbelästigter 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, Vorbelastung durch Fluglärm, eingestufte Notwendigkeit des Flugverkehrs; Feld: Gewöhnung an Fluglärm).

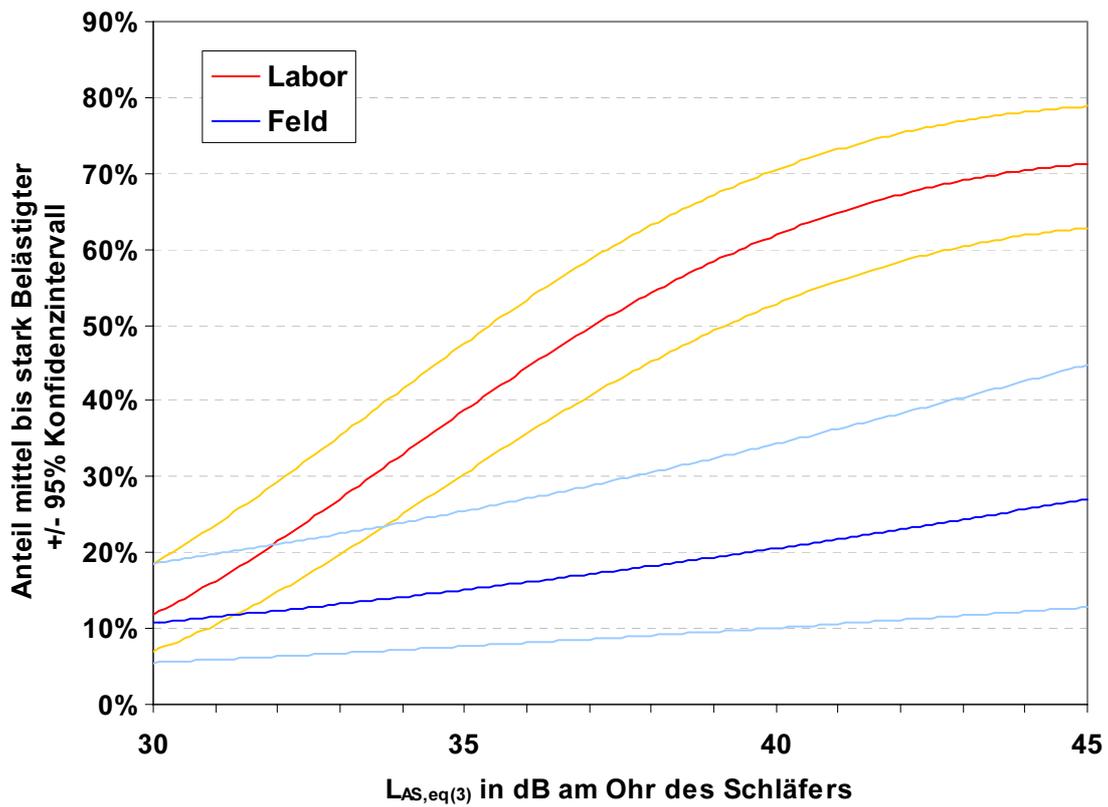


Abbildung 6.3: Durch labor- und feldspezifische Regressionsmodelle L2 und F2 vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter (Skalenstufe 3 bis 5) in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{AS,eq(3)}$.

7 Stresshormone

Hartmut Maaß

Das allgemein akzeptierte Stressmodell nimmt eine Reaktionskette an. Der Stressor Lärm wird perzipiert und zentralnervös verarbeitet. Er kann dann zur Sekretion von Hormonen wie z.B. Katecholaminen (Adrenalin, Noradrenalin) und Cortisol führen. Diese Hormone können dann im Weiteren auf subzellulärer Ebene Elektrolytflüsse bewirken, die sich insbesondere in Veränderungen der Magnesium- und Calciumkonzentrationen zeigen. In der jüngeren Vergangenheit wurden oft Urinproben aus dem nächtlichen Sammelurin zur Analyse der Stresshormone herangezogen, wie es auch für die vorliegende Studie übernommen wurde.

Elektrolyte: Untersucht wurden die nächtlichen Exkretionsraten von Kalium, Natrium, Magnesium und Calcium. Eine bilanzierte Nahrungskontrolle wurde abends nicht durchgeführt. Ein statistischer Zusammenhang mit dem nächtlichen Fluglärm ließ sich nicht herstellen. Es gab jedoch einen Unterschied zwischen den Exkretionsraten von Proben, die im Labor und Feld gewonnen wurden. Alle mittleren Elektrolytexkretionsraten waren unter Laborbedingungen höher.

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

Noradrenalin: Die Noradrenalinexkretion im Nachturin war statistisch betrachtet konstant und wurde durch Lärm nicht beeinflusst. Es gab keine Veränderungen in Abhängigkeit von L_{eq} , Maximalpegel und Anzahl der Er-

eignisse. Es gab keinen Unterschied zwischen den Ergebnissen unter Laborbedingungen und im Feldversuch (siehe Abbildung 7.1). Auch war die Anzahl der untersuchten Nächte ohne Bedeutung hinsichtlich eines möglichen Lärmeinflusses auf die Exkretion von Noradrenalin. So wurde kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Exkretionsrate und dem Fortgang der Studienächte gefunden.

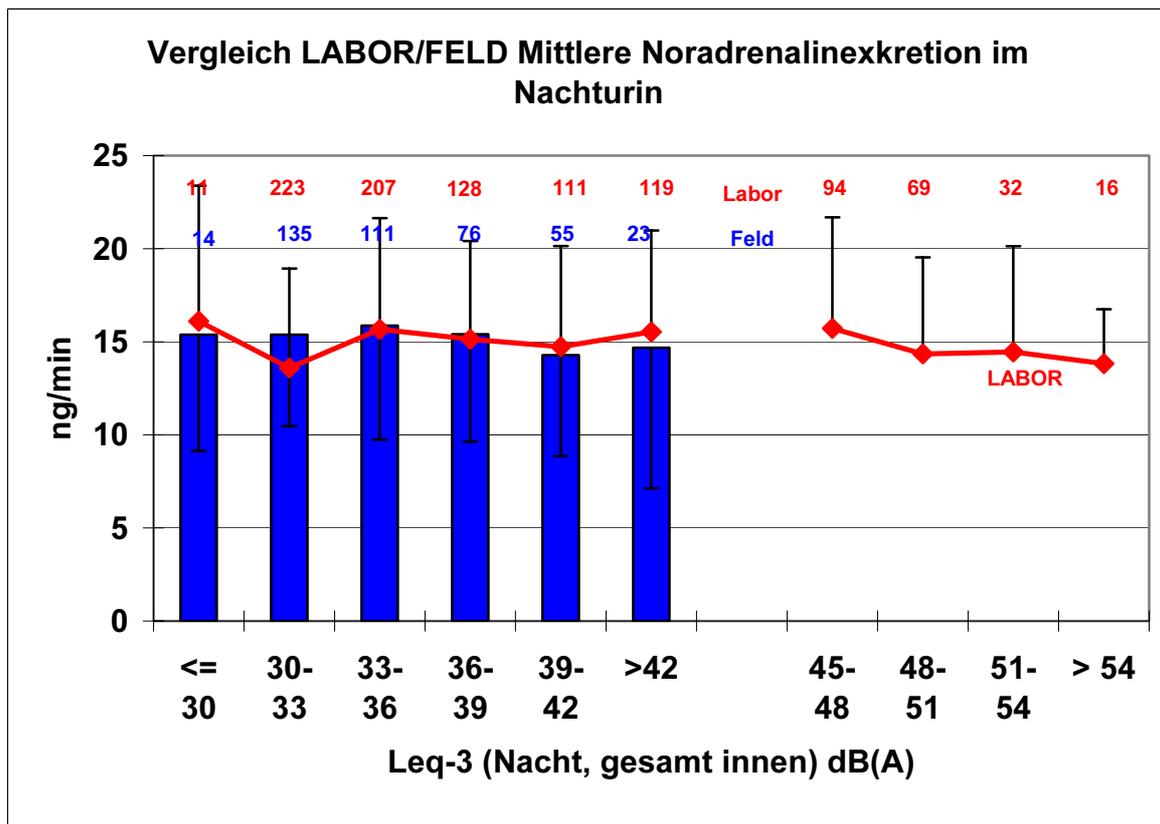


Abbildung 7.1: Mittlere Noradrenalinausscheidung (\pm Standardabweichung) im nächtlichen Sammelurin unter Laborbedingungen ($n = 112$, nur Experimentalgruppen, Linie) und im Feld ($n = 64$, Balken) bei Einteilung des mittleren äquivalenten Dauerschallpegels in 3-dB(A) breite Klassen.

Cortisol: Es gab einen Bestimmungsmethodenwechsel innerhalb der Laborversuche, so dass die absoluten Werte dieser einen Phase nicht unmittelbar vergleichbar sind. Die Exkretionsrate von Cortisol im nächtlichen Sammelurin war unter Laborbedingungen durch Lärm beeinflusst. Mit signifikantem Trend (nach Jonckheere) war sie vom Maximalpegel $L_{A5,max}$ und der Anzahl der Fluggeräusche abhängig. Auch mit zunehmendem Dauerschallpegel

Leq ergab sich ein signifikanter Trend. Zugleich ergab sich jedoch auch ein signifikanter Trend zunehmender Cortisolausscheidung mit der Anzahl der im Labor gemessenen Tage bei Versuchspersonen ohne jeglichen Fluglärm (Kontrollgruppe mit 16 Probanden). Derartige Trends waren jedoch im Feld nicht zu beobachten (weder ein Trend hinsichtlich der Lärmexposition noch bzgl. der Dauer der mehrtägigen Untersuchung). Die Cortisolsekretion unterliegt einer ausgeprägten zirkadianen Rhythmik. Diese musste besonders im Feld berücksichtigt werden, da dort unterschiedliche Aufwachzeiten auftraten. An Wochenenden waren die Cortisolwerte im Urin besonders hoch: Das lag aber nicht in vermehrtem Stress durch Fluglärm (da in dieser Zeit eher weniger Flugbewegungen stattfanden), sondern an der viel späteren Aufstehzeit (mittleren Aufstehzeit am Samstag/Sonntag: 07:48 Uhr; an den übrigen Tagen: 06:11 Uhr). Für den Vergleich der Cortisolausscheidungsrate im Labor und im Feld wurden daher nur solche Versuchsnächte berücksichtigt, in denen spätestens um 7:00 Uhr aufgestanden wurde; was dem Studiendesign für das Labor entspricht. Allerdings lag die mittlere Aufstehzeit im Feld rund 50 Minuten vor der im Labor. Allein daher resultiert bereits ein Unterschied zwischen Labor- und Feldergebnissen; Ursache war die zirkadiane Rhythmik der Cortisolsekretion, die einen ausgeprägten morgendlichen Anstieg aufweist. Abbildung 7.2 zeigt den Vergleich der mittleren Ausscheidungsrate von Cortisol aus Labor- und Feldversuchen bei identischer Bestimmungsmethodik und unter Ausschluss von Nächten, in denen länger als bis 7:00 Uhr geschlafen wurde. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen Labor und Feld, wobei die Cortisolausscheidungen unter Laborbedingungen höher waren.

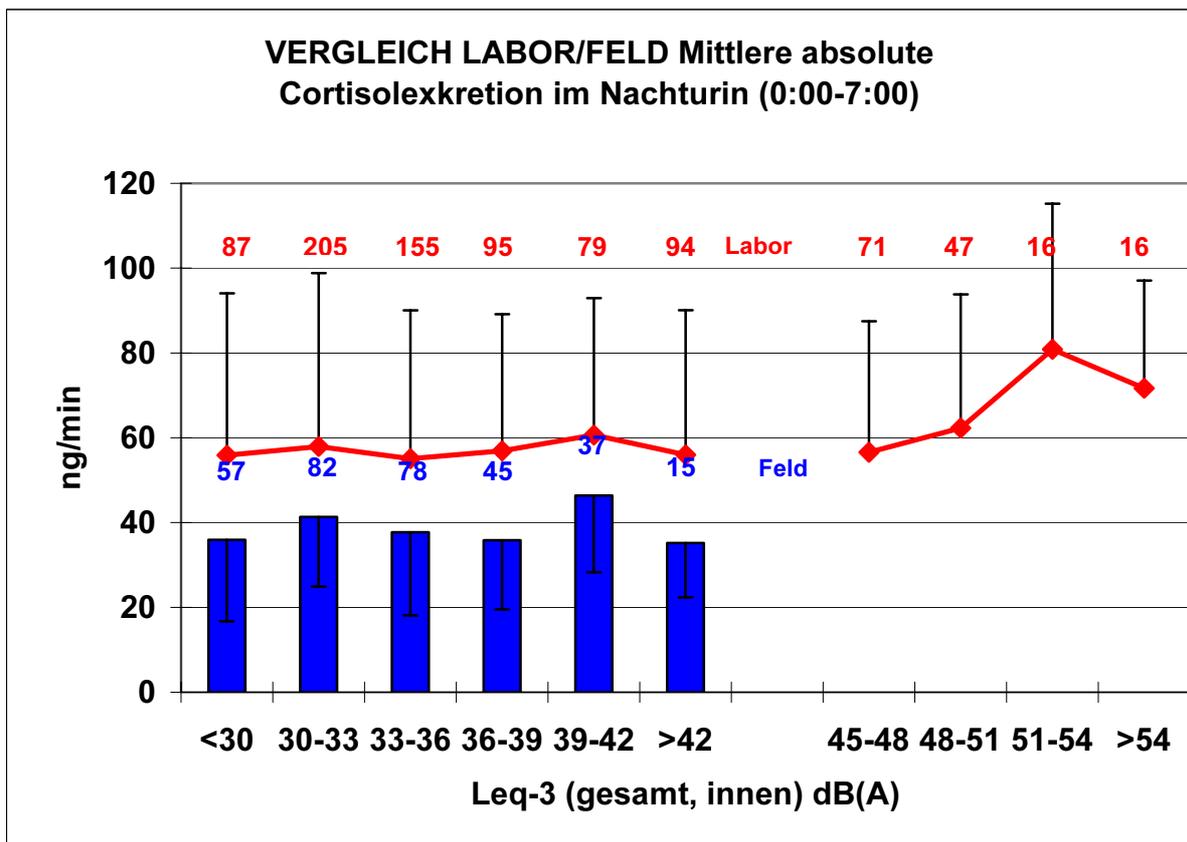


Abbildung 7.2: Mittlere Cortisolausscheidung (\pm Standardabweichung) im nächtlichen Sammelurin unter Laborbedingungen (n = 88, nur Experimentalgruppen mit identischer Bestimmungsmethode, Linie) und im Feld (n = 64, Balken) bei Einteilung des mittleren äquivalenten Dauerschallpegels in 3-dB(A) breite Klassen.

Die Untersuchung der Stresshormone und Elektrolyte zeigt keine einheitlichen Ergebnisse. Insbesondere die Messung der Ausscheidungsraten der Katecholamine und der Elektrolyte ergaben keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Exkretion und den akustischen Parametern äquivalenter Dauerschallpegel, Maximalpegel und Anzahl der Flugereignisse. Dagegen zeigte die Ausscheidung von Cortisol einen signifikanten Trend, der sich allerdings nur unter Laborbedingungen manifestierte, dagegen in den Felduntersuchungen nicht nachweisbar war. Möglicherweise war eine Einzelmessung für die gesamte Nacht zu wenig sensitiv, um Aussagen über kurzfristige Stresshormonsekretionen als Reaktion auf ein Lärmereignis innerhalb einer kompletten Nacht zu treffen. Aus der Literatur sind widersprüchliche Aussagen bekannt hinsichtlich eines Zusammenhangs von Stresshormonexkretion und nächtlichem Lärm.

Elektrolyte aus dem Sammelurin zu messen ist nicht sinnvoll, wenn nicht gleichzeitig eine kontrollierte und bilanzierte Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme gewährleistet ist. Eine eventuell vorhandene Mobilisierung von Elektrolyten durch Stresshormonausschüttung unter Lärm wird durch die Regulation der Elektrolyte nach Nahrungs- oder Flüssigkeitsaufnahme durch die Niere völlig überdeckt.

Cortisol ist ein Stressparameter, der trendmäßig mit Lärm korreliert. Gezeigt worden ist das aber nur im Labor. Der Einfluss der endogenen zirkadianen Rhythmik der Cortisolsekretion erschwert eine Bewertung. Stehen Versuchspersonen, wie im Feldversuch, wochentags viel früher auf, finden sich hier dann niedrigere Exkretionswerte und kein Zusammenhang mit dem nächtlichen Lärm. Der signifikante Unterschied zwischen Labor und Feld liegt zum einen in dieser Tatsache begründet. Zum anderen sind die hohen, zum Basiswert signifikant unterschiedlichen Werte bei hohen Lärmbelastungen im Labor im Feld nicht beobachtet worden, da derart hohe Lärmbelastungen im Feld nicht auftraten. Zudem muss berücksichtigt werden, dass die Cortisolwerte im Labor auch in der Kontrollgruppe ohne jeglichen Lärmeinfluss trendmäßig mit dem Versuchsverlauf zunahmten. Erklärung dafür könnte eine wesentlich längere Schlafzeit als zuhause sein, die zu höheren Werten der endogenen Sekretion morgens im Labor führte. Auch bei diesem Parameter ist zu überlegen, ob Mehrpunktmessungen während der Nacht vorgenommen werden müssten, um differenzierende Daten zu erhalten. In der vorliegenden Studie wurde jedoch besonderes Gewicht auf einen durch Untersucher nicht gestörten Schlaf gelegt, um ausschließlich den Einfluss durch Lärmereignisse zu untersuchen.

8 Leistung

Ernst-Wilhelm Müller und Jürgen Wenzel

Alle erfassten Leistungsparameter zeigen aufgrund der ausgeprägten zirkadianen Rhythmik einen deutlichen Unterschied zwischen Morgen- und Abend-Sitzungen; die Leistung in den einzelnen Aufgaben fiel abends grundsätzlich besser aus als morgens, jeweils dem individuellen Leistungsniveau der einzelnen Probanden entsprechend. Diese tageszeit-abhängige Leistungscharakteristik macht es erforderlich, die beiden Sitzungsgruppen getrennt zu betrachten. Im Folgenden wird nur auf die Morgen-Ergebnisse eingegangen, da hier die größere Variationen vorhanden waren und auch ein Einfluss der vergangenen Nacht am ehesten zu erwarten war. Zusätzlich war es erforderlich, bei den Feldmessungen die Morgen-Sitzungen am Wochenende herauszunehmen, da aufgrund der längeren Schlafzeiten und späteren Aufwachzeiten ebenfalls ein starker zirkadianer Einfluss bestand.

Die Einzel-Reaktions-Aufgabe (*SRT, Single Reaction Task*) ermöglicht eine basale Abschätzung der Leistungsbereitstellung. Hierbei wird auf dem Bildschirm in zufälligen Intervallen ein Reiz dargeboten, auf den so schnell wie möglich reagiert werden soll; die Reaktionszeit wird gemessen. In der hier eingesetzten speziellen Variante nach Dingus [8] besteht der Reiz aus einer hochlaufenden digitalen Stoppuhr, die nach erfolgter Reaktion die erreichte Zeit für 3 Sekunden anzeigt; nach dem Zufallsintervall bei dunklem Bildschirm erscheint dann der nächste Stoppuhrlauf. Durch das Feedback auf jede einzelne Reaktion wird es möglich, auch für die im hier vorliegenden Studiendesign erforderlichen häufigen Wiederholungen eine genügende Motivation der Teilnehmer zu erhalten. Die sehr einfache Testaufgabe fordert primär Aufmerksamkeit und Vigilanz, eine Verarbeitung in höheren Zentren ist nicht erforderlich.

Abbildung 8.1 zeigt den Median der Reaktionszeit in Millisekunden über alle Morgen-Sitzungen und Probanden geordnet nach Lärmbelastung; zusätzlich wurde zwischen Labor- und Felduntersuchungen differenziert. Der erreichte Global-Wert von ca. 240 ± 5 ms weist erhebliche interindividuelle Unterschiede auf, zurückzuführen auf die alters- und geschlechtsabhängige sehr inhomogene Zusammensetzung der Probandenpopulation; daraus resultiert die abgebildete Streubreite. Eine Abhängigkeit von der nächtlichen Lärmbelastung ist nicht erkennbar und statistisch nicht nachweisbar, alle Mittelwerte liegen im wesentlichen innerhalb des kollektiven Streubereichs.

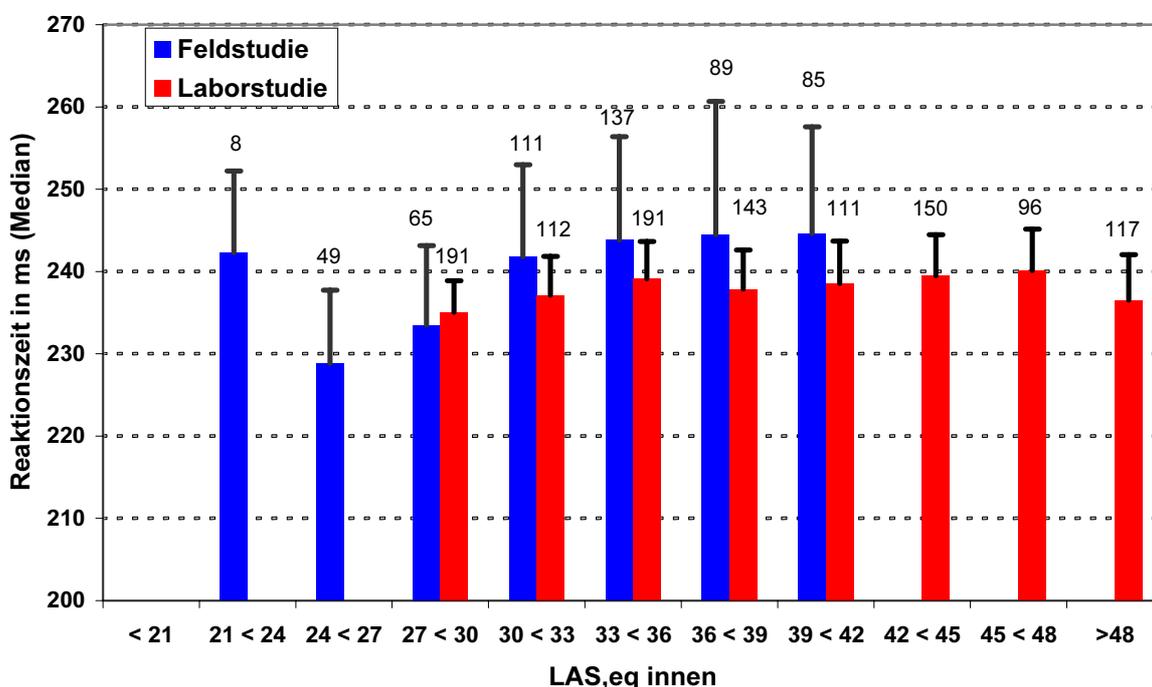


Abbildung 8.1: Reaktionszeit in der Einzel-Reaktions-Aufgabe (Median und 95% Konfidenzintervall), differenziert nach Leq3 in 3 dB(A)-Klassen: Labor 112 Probanden (jeweils 9 Fluglärnächte), Feld 64 Probanden (jeweils 8 Fluglärnächte).

Eine weitere Variante zur Untersuchung elementarer Fähigkeiten stellt die eingesetzte Nachführungsaufgabe dar (*UTT, Unstable Tracking Task*). In der Mitte des Bildschirms erscheint ein Cursor-Balken, der vom Programm zur Seite ausgelenkt wird, und zwar umso schneller, je weiter der Balken bereits von der Mittelposition entfernt ist. Der Proband soll den Balken mittels eines Joysticks so gut wie möglich in der markierten Mittelposition halten;

protokolliert wird der jeweilige Abstand von der Mittelposition sowie die Zahl der Kontrollverluste, wenn der Balken den seitlichen Bildschirmrand erreicht. Die Aufgabe untersucht die Hand-Auge-Koordination sowie die Feinmotorik und ist typisch für Operatortätigkeiten in technischen Systemen.

Das Ergebnis dieses Tests ist in Abbildung 8.2 in analoger Weise wie beim SRT wiedergegeben; statt der Reaktionszeit ist hier die mittlere Abweichung von der Mittelposition des Cursors in Form des RMS-Wertes abgebildet (= Root Mean Square, zur Zusammenfassung der Rechts-Links-Abweichung). Wie beim SRT ist auch hier keine Lärmabhängigkeit erkennbar, die Mittelwerte um 8 mm Zielabweichung liegen im Wesentlichen innerhalb des gemeinsamen Streubereichs von etwa ± 0.5 mm.

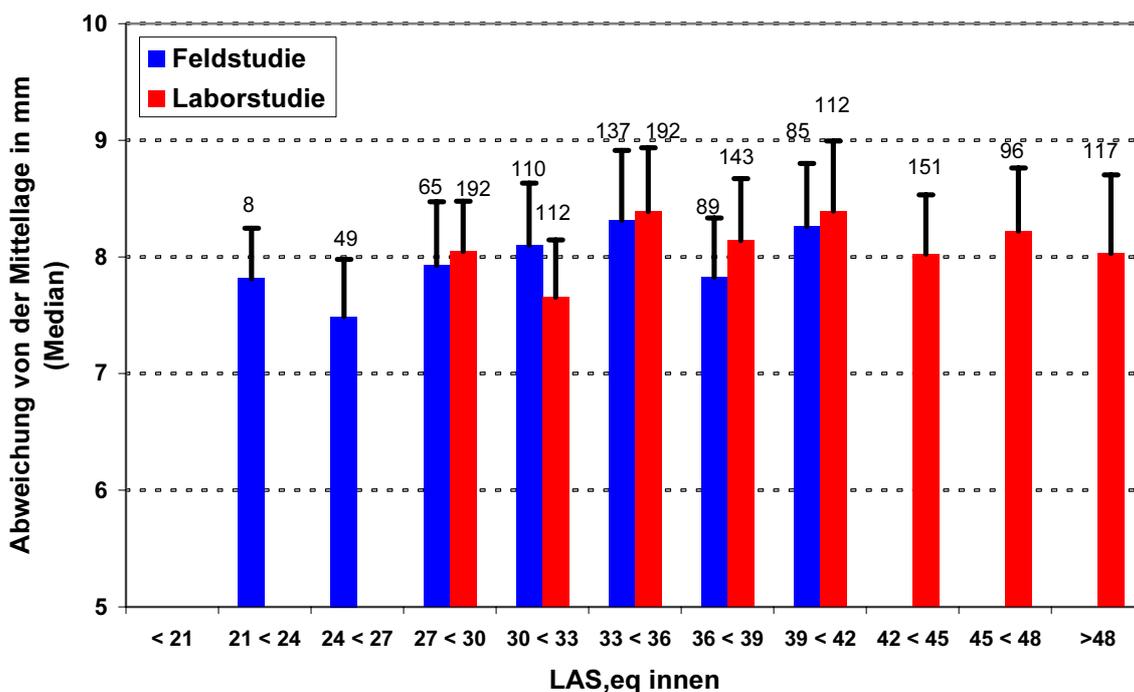


Abbildung 8.2: Abweichung (RMS-Wert) in der Nachführungsaufgabe (Median und 95% Konfidenzintervall), differenziert nach Leq3 in 3 dB(A)-Klassen: Labor 112 Probanden (jeweils 9 Fluglärmnächte), Feld 64 Probanden (jeweils 8 Fluglärmnächte).

Die Gedächtnissuche (MST, *Memory Search Task*) beurteilt über einen Symbolvergleich eine höhere mentale Funktion, und zwar in Form einer Wahl-

reaktionsaufgabe; im Gegensatz zur Einfachreaktion muss hier vor Betätigen der alternativen Reaktionstasten eine Entscheidung über die gestellte Aufgabe erfolgen. Nach dem Sternberg-Paradigma wird in der Vorbereitungsphase der Aufgabe eine Gruppe von Buchstaben variabler Anzahl gezeigt, die der Proband sich einprägen soll; in der hier benutzten Zusammenstellung von Aufgaben kamen vier (MS4) und sechs (MS6) Buchstaben zur Anwendung. Nach dem Start der Aufgabe wird jeweils ein Buchstabe auf dem Schirm dargeboten, der Proband soll mittels zweier Antworttasten entscheiden, ob der aktuelle Buchstabe zur erlernten Gruppe gehört oder nicht. Nach der Antwort erscheint unmittelbar der nächste Buchstabe. Die Aufgabe beinhaltet also wie bei der Einfachreaktion das Erfassen des Reizes sowie die motorische Antwort, zusätzlich ist der Gedächtnisvergleich und die Entscheidung Richtig-Falsch erforderlich. Mit steigender Gruppengröße wird die Reaktionszeit länger; nach Sternberg ist dabei diese Zunahme proportional zur Zahl der eingesetzten Buchstaben. Die Aufgabe erfasst die Funktion des Arbeits- und Kurzzeitgedächtnisses. Als Ergebnis kann wiederum die Reaktionszeit verwendet werden, die aufgrund der zusätzlich erforderlichen mentalen Prozesse deutlich länger ausfällt als beim SRT, außerdem ist die Erfassung der Fehlerhäufigkeit möglich, differenziert in falsch-negative und falsch-positive Reaktionen.

Wie bei SRT und UTT ist auch hier keine Verlängerung der Reaktionszeiten nach nächtlichem Lärmeinfluss zu erkennen, die mittleren Reaktionszeiten bei MS4 liegen bei ca. 500 ms, im MS6 etwa 60 ms länger, entsprechend der aufwändigeren Gedächtnissuche. Die Streuung liegt bei etwa 20 - 30 ms.

Die beschriebenen Ergebnisse der Leistungsmessungen zeigen keine relevante Beeinträchtigung unter nächtlichem Lärmeinfluss. Die in Kapitel 5 beschriebenen Ergebnisse zum Schlaf zeigen eine Verminderung der Gesamtschlafzeit 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 Leistungspara-

metern in einer vergleichenden Studie zum partiellen Schlafentzug erst bei einem Schlafentzug von jeweils drei Stunden in mehreren aufeinanderfolgenden Nächten gefunden.

Da die hier präsentierten Mittelwerte der Leistung alle 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.

9 Zusammenfassung

Alexander Samel und Mathias Basner

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 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.

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 fühlten. 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.

Aufwachreaktionen wurden im Feld oberhalb einer Schwelle von etwa 33 dB(A), gemessen am Ohr des Schlafers, beobachtet. Im Labor wurde bis zu Werten von 45 dB(A) keine Reaktionsschwelle ermittelt. 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 durch im Labor 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 keinmal, 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.

10 Literatur

- [1] DIN 45643 Messung und Beurteilung von Flugzeuggeräuschen (Teil 3: Ermittlung des Beurteilungspegels für Fluglärmimmissionen). (1984): 1-3
- [2] 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] American Sleep Disorders Association (ASDA) (1992): EEG arousals: scoring rules and examples: a preliminary report from the Sleep Disorders Atlas Task Force of the American Sleep Disorders Association. *Sleep* 15(2): 173-184
- [4] Baekeland, F., Hoy, P. (1971): Reported vs recorded sleep characteristics. *Archives of General Psychiatry* 24(6): 548-551
- [5] Basner, M., Buess, H., Luks, N., Maaß, H. et al. (2001): Nachtfluglärmwirkungen - eine Teilauswertung von 64 Versuchspersonen in 832 Schlaflabornächten. DLR FB 2001-26, Köln, Germany
- [6] Bjorkman, M., Ahrlin, U., Rylander, R. (1992): Aircraft noise annoyance and average versus maximum noise levels. *Archives of Environmental Health* 47(5): 326-329
- [7] Bonnet, M.H. (1986): Performance and sleepiness following moderate sleep disruption and slow wave sleep deprivation. *Physiol Behav.* 37(6): 915-918
- [8] Dinges, D.F., Powell, J.W. (1985): Microcomputer analysis of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers* 17: 652-655
- [9] Fahrenberg, J., Hampel, R., Selg, H. (1994): Das Freiburger Persönlichkeitsinventar FPI. Handanweisung. 6. Auflage
- [10] Fields, J.M. (1984): The effect of numbers of noise events on people's reactions to noise: an analysis of existing survey data. *Journal of the Acoustical Society of America* 75(2): 447-467
- [11] Griefahn, B. (1990): Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37: 7-14

- [12] 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
- [13] Kallus, K.W. (1995): Erholungs-Belastungs-Fragebogen. Handanweisung.
- [14] Kötz, W.-D. (2004): Zur Frage der effektiven Schalldämmung von geöffneten Fenstern. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 51(1): 21-26
- [15] Maschke, C., Hecht, K. (2001): Stresshormone und Schlafstörungen - elektrophysiologische und hormonelle Aspekte., in: Bartels, K.H. und Ising, H. (Herausgeber): Nachtfluglärmproblematik, Eigenverlag Verein WaBoLu, Berlin, 91-97
- [16] Maschke, C., Hecht, K., Wolf, U. (2001): Nächtliches Erwachen durch Fluglärm. Bundesgesundheitsblatt 44(10): 1001-1010
- [17] Mathur, R., Douglas, N.J. (1995): Frequency of EEG arousals from nocturnal sleep in normal subjects. Sleep 18(5): 330-333
- [18] Ortscheid, J., Wende, H. (2002): Lärmbelästigung in Deutschland - Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 49(2): 41-45
- [19] Passchier-Vermeer, W., Vos, H., Steenbekkers, J.H.M., Van der Ploeg, F.D., Groothuis-Oudshoorn, K. (2002): Sleep disturbance and aircraft noise exposure - exposure effect relationships. Report Number 2002.027, Netherlands
- [20] 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
- [21] Rechtschaffen, A., Kales, A., Berger, R.J., Dement, W.C. et al. (1968): A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects. Washington, D.C.
- [22] Riemann, D. (1997): Schlaf und Gedächtnis, in: Schulz, H. (Herausgeber): Kompendium Schlafmedizin für Ausbildung, Klinik und Praxis, ecomed, Landsberg/Lech, 1-2
- [23] Rylander, R., Bjorkman, M., Ahrlin, U., Arntzen, E., Solberg, S. (1986): Dose-response relationships for traffic noise and annoyance. Archives of Environmental Health 41(1): 7-10

- [24] Rylander, R., Björkman, M., Ahrlin, U., Sörensen, S., Kajland, A. (1980): Aircraft noise contours: importance of overflight frequency and noise level. *Journal of Sound and Vibration* 69: 583-595
- [25] Rylander, R., Sörensen, S., Kajland, A. (1972): Annoyance reactions from aircraft noise exposure. *Journal of Sound and Vibration* 24: 419-444
- [26] Samel, A., Diedrich, A., Drescher, J., Lorenz, B. et al. (1997): [Long-term monitoring of psychophysiologic values in flight physiology]. *Internist (Berl)* 38(8): 755-769
- [27] 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
- [28] Schultz, T.J. (1978): Synthesis of social surveys on noise annoyance. *Journal of the Acoustical Society of America* 64(2): 377-405
- [29] Steyer, R., Schwenkmezger, P., Notz, P., Eid, M. (1997): Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF). Handanweisung.
- [30] Wesensten, N.J., Balkin, T.J., Belenky, G. (1999): Does sleep fragmentation impact recuperation? A review and reanalysis. *Journal of Sleep Research* 8(4): 237-245