

# NORAH

Noise-related annoyance, cognition, and health

## Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld

---

Endbericht, Band 4:

Fluglärm und nächtlicher Schlaf

29.09.2015

## **AUTOREN, PROJEKTBEARBEITUNG DIESES TEILPROJEKTS**

Uwe Müller	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Daniel Aeschbach	Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
Eva-Maria Elmenhorst	Abteilung Flugphysiologie
Franco Mendolia	Linder Höhe
Julia Quehl	51147 Köln
Alex Hoff	
Iris Rieger	
Stefan Schmitt	
Wilma Littel	Universitätsklinikum Gießen-Marburg

## **HERAUSGEBER, AUFTRAGGEBER**

Gemeinnützige Umwelthaus GmbH  
Rüsselsheimer Str. 100  
65451 Kelsterbach

## **GESAMTKOORDINATION DER NORAH-STUDIE**

Rainer Guski	Ruhr-Universität Bochum
Dirk Schreckenberger	ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung, Hagen

## **KOOPERATIONSPARTNER DIESES TEILPROJEKTS**

Mathias Basner                      University of Pennsylvania, Perelman School of Medicine,  
Philadelphia, U.S.A.  
Sarah McGuire

## **WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT - EXTERNE QUALITÄTSSICHERUNG**

Mark Brink                          Eidgenössische Technische Hochschule ETH, Zürich  
Erland Erdmann                    Universität zu Köln  
Kerstin Giering                    Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld  
Barbara Griefahn                 Leibniz-Institut für Arbeitsforschung, TU Dortmund  
Jürgen Hellbrück                 Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt (ab Januar 2014)  
Wolfgang Hoffmann                Universitätsmedizin Greifswald  
Christian Maschke                 Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz  
Brandenburg, Potsdam (bis Dezember 2013)  
Lothar Ohse                         Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden  
Georg Thomann                    Amt für Natur und Umwelt, CH-Graubünden  
Irene van Kamp                    Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, NL-Bilthoven  
Joachim Vogt                        Technische Universität Darmstadt (ab April 2014)

September 2015

## ZUR STUDIE NORAH - VERKEHRSLÄRMWIRKUNGEN IM FLUGHAFENUMFELD - ERSCHIENENE BÄNDE

- Band 1 Kognitive Entwicklung und Lebensqualität von Kindern
- Band 2 Erfassung der Verkehrsgeräuschexpositionen
- Band 3 Belästigung und Lebensqualität
- Band 4 Fluglärm und nächtlicher Schlaf
- Band 5 Blutdruckmonitoring
- Band 6 Erkrankungsrisiken
- Band 7 Gesamtbetrachtung

Sämtliche in diesem Dokument enthaltenen wissenschaftlichen Texte, Grafiken, Tabellen und sonstigen Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. Sie dürfen ohne vorherige schriftliche Genehmigung des Urhebers oder des Herausgebers weder ganz, noch auszugsweise kopiert, verändert, vervielfältigt oder veröffentlicht werden. Eine - auch auszugsweise - Veröffentlichung oder Verwendung dieses Dokumentes ist auch mit Zustimmung von Urheber bzw. Herausgeber grundsätzlich nur unter Angabe der vollständigen Quelle zulässig.

# Inhalt

Inhalt	5
Glossar, Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung	10
<b>Summary</b>	14
<b>1 Einleitung</b>	18
1.1 Hintergrund .....	18
1.2 Lärm und Schlaf .....	19
1.3 Auswirkungen veränderter Lärmexposition auf das Schlafverhalten.....	21
1.4 Vegetativ-motorische Reaktionen .....	23
1.5 Subjektive Reaktionen.....	24
1.6 Hypothesen.....	28
1.6.1 Physiologische Reaktionen .....	28
1.6.2 Subjektive Reaktionen .....	29
<b>2 Material und Methoden</b>	32
2.1 Probandenauswahl .....	32
2.2 Untersuchungsablauf.....	39
2.3 Untersuchte Stichprobe .....	41
2.4 Akustik .....	56
2.4.1 Messaufbau .....	56
2.4.2 Akustische Probemessungen in 2011 und 2012.....	57
2.4.3 Auswertungsmethodik.....	59
2.4.4 Deskriptive Darstellung der akustischen Messwerte.....	61
2.5 Polysomnografie .....	71
2.5.1 Schlaf-EEG .....	71
2.5.2 Schlafkennwerte.....	74
2.5.3 Aktimetrie .....	75
2.6 Weiterentwicklung einer einfachen Methodik zur Messung vegetativ - motorischer Reaktionen im Schlaf .....	76
2.6.1 Algorithmus zur Bestimmung von vegetativ-motorischen Reaktionen im EKG- und Aktimetersignal .....	77
2.6.2 Übereinstimmungsmaß „Cohens Kappa“ .....	78

2.6.3	Validierung .....	79
2.7	Subjektive Reaktionen: verwendete Fragebögen und Skalen .....	80
2.8	Statistische Verfahren .....	83
2.8.1	Ermittlung von Aufwachreaktionen aus der Polysomnografie .....	83
2.8.1	Ereigniskorrelierte Auswertung .....	83
2.8.2	Univariate Analyse .....	84
2.8.3	Multivariable Regressionsanalyse .....	85
2.8.4	First Night Effect .....	88
3	Ergebnisse .....	89
3.1	Physiologische Untersuchungen des Schlafs .....	89
3.1.1	Ergebnisse: spontane Aufwachwahrscheinlichkeit .....	89
3.1.2	Auswirkungen der Kernruhezeit .....	91
3.1.3	Vergleich der Flughäfen Frankfurt und Köln-Bonn .....	103
3.1.4	Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung des Flugverkehrs und Störungen des Schlafs .....	111
3.1.5	Längsschnittvergleich der Jahre 2011, 2012 und 2013 mittels vegetativ-motorischer Methode .....	116
3.1.6	Explorative Analyse der Unterschiede in den Expositions-Wirkungsbeziehungen der Polysomnografie im Vergleich zur vegetativ-motorischen Methode .....	119
3.2	Subjektive Reaktionen .....	121
3.2.1	Deskriptive Statistik .....	121
3.2.2	Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2011 .....	125
3.2.3	Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2012 .....	128
3.2.4	Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2013 .....	130
3.2.5	Ergebnisse zur akuten Belästigung durch Fluglärm in der Nacht .....	133
3.2.6	Längsschnittanalysen von 2011 bis 2013 .....	141
4	Zusammenfassung und Diskussion .....	150
4.1	Physiologische Untersuchungen des Schlafs .....	150
4.1.1	Hypothese 1: Auswirkungen der Kernruhezeit .....	150
4.1.2	Hypothese 2: Übertragbarkeit von Expositions-Wirkungskurven zwischen Flughäfen mit unterschiedlichen Verkehrsmustern .....	151
4.1.3	Hypothese 3: Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung des Flugverkehrs und objektiv gemessenen Störungen des Schlafs .....	153
4.1.4	Hypothese 4: Gewöhnungsprozesse .....	154

4.2 Subjektive Reaktionen.....	156
4.3 Einschränkungen.....	158
5 Danksagung	160
Literatur	161
Tabellenverzeichnis	175
Abbildungsverzeichnis	178
Anhang 1: Technische Probleme mit der Polysomnografie in 2011 und daraus abgeleitete Konsequenzen für die Datenauswertung	185

## Glossar, Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	Bedeutung
AIC	Akaike Information Criterion
ARAS	aufsteigendes, retikuläres, aktivierendes System
dB	Dezibel, physikalische Einheit des Schalldruckpegels
dB(A)	physikalische Einheit des A-bewerteten Schalldruckpegels
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DNL	Day-night average sound level
EEG	Elektroenzephalogramm, Darstellung der elektrischen Aktivitätsschwankungen des Gehirns, hier: zur Bestimmung der Schlafstadien
EKG	Elektrokardiogramm, Darstellung der elektrischen Aktivitätsschwankungen aller Herzmuskelfasern
EMG	Elektromyografie, Messung der elektrischen Muskelaktivität
EOG	Elektrookulografie, Messung der Augenbewegung
FAA	Federal Aviation Administration, US-amerikanische Luftfahrtbehörde
FAT	Fatigue-Fragebogen nach Samn & Pirelli (1982)
FNI	Frankfurter Nachtindex
FRA	Flughafen Frankfurt am Main
GEE	Generalized Estimating Equations
ICBEN	International Commission on Biological Effects of Noise
KSS	Karolinska Sleepiness Scale nach Åkerstedt & Gillberg (1990)
$L_{ASeq}$	Energieäquivalenter Dauerschallldruckpegel, A-bewertet, Zeitkonstante Slow
$L_{ASmax}$	Maximalschallldruckpegel, A-bewertet, Zeitkonstante Slow
N	Stichprobenumfang, Anzahl
NORAH	Noise Related Annoyance, Cognition and Health
Matlab	Matrix Laboratory, Software der Firma The MathWorks
MCAR	Missing Completely at Random
p	p-Wert
PSG	Polysomnografie, Aufzeichnung schlafrelevanter Größen
$QIC_u$ / $QIC$	Quasi-AIC
R	Statistiksoftware, GNU-Projekt
REM	Rapid Eye Movement, Schlafphase, die durch schnelle Augenbewegungen charakterisiert ist
SAS	Statistiksoftware der Firma SAS-Institute
SEL	Einzelereignispegel
SPSS	Statistik- und Analysesoftware der Firma IBM
STD	Standardabweichung
UPenn	University of Pennsylvania
VAS	Visuelle Analogskalen
VMM	Vegetativ-motorische Methode

Formelzeichen und Abkürzungen	Bedeutung
VMR	Vegetativ-motorische Reaktion
WBQ	Wissenschaftlicher Beirat für Qualitätssicherung

## Zusammenfassung

Im NORAH-Teilmodul „Auswirkungen von Fluglärm auf den nächtlichen Schlaf“ untersuchte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in den Jahren 2011-2013 in drei Messperioden den Schlaf von Anwohnern des Frankfurter Flughafens vor und nach Eröffnung der Landebahn Nordwest im Oktober 2011 und der damit einhergehenden Kernruhezeit von 23-5 Uhr. In der Studie wurden von 2011 bis 2013 insgesamt 202 schlafgesunde erwachsene Probanden im Alter von 18 bis 78 Jahren untersucht. 49 Probanden im Jahr 2011 und 83 Probanden im Jahr 2012 wurden mittels der aufwendigen Methode der Polysomnografie (PSG) in jeweils drei Nächten untersucht. Die NORAH-Schlafstudie ist damit die von der Probandenanzahl her bisher weltweit größte Erhebung im Feld zu den akuten Auswirkungen von Fluglärm auf den mittels PSG gemessenen Schlaf von Anwohnern. Im Jahr 2013 wurden 187 Probanden ebenfalls jeweils 3 Nächte mit einer weniger aufwendigen Methode zur Detektion von vegetativ-motorischen Reaktionen im Schlaf vermessen. 39 Probanden nahmen in allen drei Erhebungsjahren, 36 in zwei Jahren teil. Im Jahr 2011 gingen die Probanden um 22-22:30 Uhr zu Bett und standen um 6-6:30 Uhr auf (Bettzeitgruppe 1), in den Jahren 2012 und 2013 wurde eine weitere Gruppe mit einer um eine Stunde späteren Bettzeit (Bettzeitgruppe 2) untersucht. In allen Jahren wurden der Schalldruckpegel und die Geräusche in der Nacht kontinuierlich am Ohr des Schlafenden aufgezeichnet.

Die Ergebnisse der Schlafstudie zeigen, dass sich mit der Einführung der Kernruhezeit und der damit einhergehenden Verringerung an Überflügen im betrachteten Nachtzeitraum die fluglärmassoziierte Aufwachhäufigkeit pro Nacht der Probanden in der Bettzeitgruppe 1 im Mittel von 2011 auf 2012 von 2,0 auf 0,8 vermindert hat und somit das Hauptziel der Einführung der Kernruhezeit erreicht wird. Mit zunehmender Anzahl an Fluggeräuschen treten auch mehr fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen auf, die zu einer Fragmentierung des Schlafs (verminderte Kontinuität) führen, ohne dass dabei die Gesamtschlafdauer verkürzt wird.

Die Bettzeitgruppe 2 hatte im Jahr 2012 eine mittlere fluglärmassoziierte Aufwachhäufigkeit von 1,9 pro Nacht. Der Unterschied gegenüber der Bettzeitgruppe 1 ist in der um eine Stunde längeren Fluglärmexposition in dieser Gruppe in den Morgenstunden bedingt. Frühes zu Bett gehen (d.h. das Ende der Nacht überlappt möglichst wenig mit den verkehrsreichen Zeiten am Morgen) wirkt sich also protektiv auf den Schlaf aus.

Es konnten Expositions-Wirkungskurven berechnet werden, die die Aufwachwahrscheinlichkeit bei einem Überflug in Abhängigkeit vom maximalen Schalldruckpegel darstellen. In das Modell gehen weiterhin die Geräuschdauer, die Anzahl der vorangegangenen Fluglärmereignisse, das Alter der Probanden, die verstrichene Schlafdauer und der Hintergrundpegel ein. Die Wahrscheinlichkeit, bei einem Überfluggeräusch mit einem bestimmten Maximalpegel aufzuwachen, unterschied sich in den Jahren 2011 und 2012 nicht signifikant. Bei einem Hintergrundpegel von 28,8 dB(A) erhöhte sich in beiden Jahren pro 10 dB(A)-Anstieg des Maximalpegels eines

Überflugeräusches die Chance aufzuwachen um 23 %. Gesamtschlafdauer, Einschlaf latenz, Schlaffeffizienz, Wachdauer nach dem Einschlafen und prozentualer Wachanteil ab 4:30 Uhr unterschieden sich in beiden Jahren statistisch nicht signifikant. Diese Werte waren auch im Vergleich der beiden Bettzeitgruppen des Jahres 2012 nicht statistisch signifikant voneinander verschieden.

Probanden, die den Flugverkehr eher positiv bewerteten, zeigten weniger objektiv gemessene Schlafstörungen. Die Kausalität des Zusammenhangs, ob also der gestörtere Schlaf eine negative Einstellung nach sich zieht oder umgekehrt, kann nicht aufgeklärt werden.

Die subjektiven Schläfrigkeits- und Müdigkeitsbewertungen lagen in allen drei Untersuchungsjahren auf einem mittleren Niveau. Die subjektive Gewöhnung an Fluglärm, das subjektive Lautstärkeempfinden in der Wohngegend, das Alter und der Chronotyp der Probanden beeinflussten die Schläfrigkeits- und Müdigkeitsbewertungen statistisch signifikant. Das subjektive Erleben guten Schlafs verschlechterte sich trotz Einführung der Kernruhezeit statistisch signifikant vom Jahr 2011 bis zum Jahr 2013 um 5 % bzw. 11 %, unabhängig von der Fluglärmbelastung. Dieser Effekt muss daher auf nicht erhobene Faktoren zurückgeführt werden. Dieses Ergebnis gilt auch für die Probanden, die in allen drei Jahren teilnahmen.

Eine zusätzliche Erhebung im Jahr 2013 während der vergangenen Nacht zeigte einen statistisch signifikanten Einfluss der Anzahl an Überflügen und des durch den Fluglärm bedingten energieäquivalenten Mittelungspegels der vergangenen Nacht auf die akute nächtliche Belästigung. Diese Reaktion war erheblich. Es gab keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Langzeitbelästigung durch Fluglärm einerseits und der subjektiven Schlafqualität bzw. der akuten nächtlichen Belästigung andererseits. Die Faktoren „Lautstärkeempfinden in der Wohngegend“ und „Gewöhnung an Fluglärm“ wiederum hatten einen statistisch signifikanten Einfluss auf die akute Belästigung.

Im Jahr 2001/2002 hat das DLR mit gleicher Polysomnografiemethodik eine Feldstudie mit 64 Probanden in je neun Nächten am Flughafen Köln/Bonn durchgeführt, einem Flughafen ohne Nachtflugbeschränkungen und mit Flugverkehr, der zu etwa zwei Dritteln mit älteren Frachtmaschinen abgewickelt wurde. Ergebnisse dieser Studie dienen bisher als Grundlage für die Berechnung des Frankfurter Nachtindexes FNI.

Die NORAH-Schlafstudie war nicht primär darauf ausgelegt, Vergleiche mit der Köln-Bonner-Studie vorzunehmen (so waren z.B. die Zubettgeh- und Aufstehzeiten in beiden Studien unterschiedlich; die Stichproben waren naturgemäß unterschiedlich trotz gleicher Kriterien bei der Probandenauswahl; Frachtflieger aus dem Jahr 2001/2002 unterscheiden sich unabhängig vom Maximalpegel auch im Frequenzspektrum deutlich von heutigen Passagiermaschinen; die polysomnografischen Aufzeichnungen wurden von unterschiedlichen Auswertern analysiert). Dennoch ergibt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse Sinn, um einen Flughafen mit Kernruhezeit (Frankfurt 2012) mit einem Flughafen ohne Kernruhezeit (Köln-Bonn 2001/2002) zu vergleichen. Aufgrund eines

Teildatenausfalls bei den NORAH-Messungen 2011 konnte nur die PSG aus dem Jahr 2012 zu diesem Vergleich herangezogen werden. Es zeigte sich, dass Schlafeffizienz, Gesamtschlafdauer und Tiefschlafdauer pro Gesamtschlafdauer am Flughafen Köln-Bonn statistisch signifikant verringert waren, die Einschlaf latenz hingegen statistisch signifikant erhöht gegenüber der Erhebung am Flughafen Frankfurt im Jahr 2012. Rapid-Eye-Movement-(REM)-Schlafdauer und Wachdauer nach dem Einschlafen unterschieden sich in den beiden Studien nicht signifikant.

Die Wahrscheinlichkeit, durch ein Überflugeräusch mit gleichem Maximalpegel zu erwachen, war in der Köln-Bonner-Studie höher als in NORAH im Jahr 2012 - z.B. bei einem Maximalpegel von 45 dB(A) um 5 % höher.

Die Ergebnisse zeigen die positiven Wirkungen der Einführung der Kernruhezeit für den Schlaf der Anwohner am Frankfurter Flughafen. Aus diesen Ergebnissen lässt sich aber auch schlussfolgern, dass die Expositions-Wirkungsbeziehung, die 2001/2002 am Flughafen Köln-Bonn erhoben wurde, nicht sicher auf den Flughafen Frankfurt mit Kernruhezeit übertragen werden kann. Unter der Annahme jedoch, dass die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit am Flughafen Frankfurt niedriger lag als die am Flughafen Köln-Bonn ist der Unterschied in der lärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen den Flughäfen gering. Bei dieser Aussage gilt es die oben gemachten Limitierungen zur Vergleichbarkeit der beiden Studien zu berücksichtigen.

Für beide Studien gilt, dass aus methodischen Gründen nur schlafgesunde erwachsene Probanden untersucht wurden, um die ermittelten Aufwachwahrscheinlichkeiten dem Fluglärm ursächlich zuordnen zu können. Damit ist aber auch eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der Studie auf vulnerable Gruppen nur eingeschränkt möglich.

Die PSG ist eine in der Durchführung und Auswertung sehr personal- und kostenintensive Untersuchungsmethode, was geringe untersuchte Fallzahlen mit sich bringt. Im internationalen Vergleich polysomnografischer Feldstudien hatte die NORAH-Studie jedoch die bisher höchste Anzahl an Probanden. Um darüber hinaus höhere Fallzahlen bei nicht weiter steigendem Aufwand und Budget realisieren zu können, muss notwendigerweise ein Informationsverlust bei der Messung des Schlafes in Kauf genommen werden. Deshalb hat das DLR zusammen mit der University of Pennsylvania (UPenn) mit den Polysomnografiedaten aus den Jahren 2011 und 2012 eine Methode weiterentwickelt, die mit ausschließlicher Messung des Elektrokardiogramms (EKG) und der Körperbewegungen versucht, fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen (die größtmögliche Störung des Schlafs) abzubilden. Diese vegetativ-motorische Methode (VMM) hat den Vorteil, dass im Gegensatz zur PSG, nicht jeden Abend und jeden Morgen ein Untersucher beim Probanden vor Ort sein muss, sondern der Proband das Equipment selbst anlegen kann. Zudem kann eine Auswertung der Daten vollautomatisch durchgeführt werden.

Das für die VMM optimierte Auswertungsmodell zeigt, dass ähnlich wie auch beim mit Hilfe der Polysomnografiedaten berechneten Modell für die Aufwachwahrscheinlichkeit, die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion in Abhängigkeit von

zunehmendem Maximalschalldruckpegel  $L_{ASmax}$  von Überfliegergeräuschen und der verstrichenen Schlafdauer nichtlinear ansteigt. Dennoch sind beide Expositions-Wirkungskurven nicht gleich, sondern die Wahrscheinlichkeiten für eine vegetativ-motorische Reaktion bei gleichem Maximalpegel eines Überfliegergeräusches liegen höher als die Aufwachwahrscheinlichkeiten. Es gibt mehrere plausible Erklärungen hierfür. So detektiert die Methode manchmal auch kürzere Aktivierungen im EEG, die nicht als Aufwachreaktionen klassifiziert werden, aber dennoch physiologische Bedeutung für die Schlaferholung haben können. Die Sensitivität der VMM ist somit höher als bei der Detektion von Aufwachreaktionen in der PSG. Des Weiteren werden fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen im Modell nur dann berücksichtigt, wenn der Proband sich vorher in einem Schlafstadium befand und nicht schon wach war. Diese Unterscheidung kann bei der VMM nicht mehr getroffen werden, womit auch Reaktionen in die Analyse eingehen, die in einer Wachphase aufgetreten sind. Zudem sind Herzfrequenzbeschleunigungen und kurzzeitige Aktivierungen der Muskulatur typisch für den REM-Schlaf, in dem weitgehend der Traumschlaf stattfindet. Auch diese Reaktionen gehen zusätzlich in die Analyse der VMM mit ein. Während hingegen die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion mit zunehmendem Alter abnahm, hatte das Alter keinen signifikanten Effekt auf die Aufwachwahrscheinlichkeit. Berücksichtigt man diese Effekte bei der Berechnung der Expositions-Wirkungskurven für das Jahr 2012, in dem sämtliche Informationen für beide Methoden vollständig vorliegen, so nähern sich die Expositions-Wirkungskurven stark an.

Die entwickelte VM-Methode ist somit geeignet, vegetativ-motorische Körperreaktionen im Schlaf aufgrund von Fluglärmexposition zu beschreiben. Sie erlaubt im Gegensatz zur PSG durch die mögliche automatisierte Auswertung eine auswerterunabhängige Analyse der Daten. Dadurch, dass die Methode Herzfrequenzbeschleunigungen misst, bildet sie möglicherweise einen Mechanismus ab, der für Herz-Kreislaufkrankungen ursächlich verantwortlich sein könnte, die nach langjähriger nächtlicher Lärmexposition entstehen können. Die VM-Methode kann allerdings keine Ergebnisse zur Änderung der Schlafstruktur (z.B. Schlafstadienverteilung) liefern und auch fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen nicht exakt nachbilden, so wie es mit der Polysomnografiemethode möglich ist. Grundsätzlich kann man erwarten, dass die Beteiligungsdaten von Anwohnern bei mit der VM-Methode durchgeführten Feldstudien aufgrund der geringeren Invasivität höher sind.

## Summary

As part of the NORAH study the German Aerospace Center (DLR) examined in three measurement periods in 2011-2013 the "Effects of aircraft noise on sleep" around Frankfurt airport before and after the opening of the new runway in October 2011 and the therewith associated ban of night flights between 23 p.m. and 5 a.m. In this study, a total of 202 healthy adult airport residents aged 18 to 78 years were investigated at their domiciles in these three study years. 49 subjects in 2011 and 83 subjects in 2012 were recorded by the elaborate method of polysomnography (PSG) for three nights each. Thus, regarding the number of subjects the NORAH sleep study is to date the world's largest collection of field data measuring the acute effects of aircraft noise on local residents by PSG. In 2013 187 volunteers were also surveyed every 3 nights with a less expensive method for the detection of vegetative-motoric reactions during sleep. 39 volunteers participated in all three years, 36 took part in two years. In 2011, the volunteers went to bed around 22-22.30 p.m. and got up at 6-6:30 a.m. (bed time group 1). In 2012 and 2013, in addition, another group with a one hour later bed time (bed time group 2) was investigated. In all years, the sound pressure level and the noise at night were recorded continuously at the sleeper's ear.

The results of the sleep study show that with the initiation of the night flight ban and the concomitant reduction of the number of overflights in the considered time period the incidence of aircraft noise associated awakenings per night has decreased in bed time group 1 from 2011 until 2012 from 2.0 to 0.8 on average. Thus, the main objective of the night flight ban has been reached. With an increasing number of overflights more aircraft noise associated awakenings occur which lead to a fragmentation of sleep (decreased continuity) without shortening the total sleep time.

In 2012 bed time group 2 had an average aircraft noise associated awakening incidence of 1.9 per night. The difference compared to bed time group 1 is due to the one hour more aircraft noise exposure within bed time group 2 during the morning hours. Hence, going to bed early (the end of the night overlaps as little as possible with the busy air traffic hours in the morning) has a protective impact.

Exposure-response curves were calculated, representing the awakening probability for an overflight depending on the maximum sound pressure level. The statistical model further includes the time length of the aircraft noise event, the number of preceding aircraft noise events, the age of the subjects, the elapsed sleep time and the background noise level. The probability for waking up due to an overflight with a certain maximum sound pressure level did not differ significantly between the years 2011 and 2012. Considering a background level of 28,8 dB (A) for both years the odds for an awakening increased by 23% per 10 dB (A) increase of the maximum sound pressure level of an overflight. Total sleep duration, sleep onset, sleep efficiency, wake time after sleep and percentage proportion of being awake from 4.30 a.m. did not differ statistically significant in both years. These

values do not differ statistically significant when comparing the two bed time groups in 2012 either.

Subjects who tend to assess the air traffic more positive showed less objectively measured sleep disturbances. The causality of the relationship, i.e. whether the disturbed sleep results in a negative attitude, or vice versa, cannot be clarified.

The subjective drowsiness and fatigue ratings were at an intermediate level in all three study years. The subjective habituation to aircraft noise, the subjective perception of the ambient noise in the residential area, age and chronotype of volunteers influenced the drowsiness and fatigue ratings statistically significant. The subjective experience of sleep worsened statistically significant from 2011 to 2013 by 5% respectively 11% despite the introduction of the night flight ban, regardless of the aircraft noise exposure. This effect must therefore be attributed to uncollected factors. This finding also applies to those subjects who participated in all three years.

An additional survey in 2013 showed a statistically significant effect of the number of overflights and the aircraft noise energy equivalent average sound level of the previous night on the acute nocturnal annoyance. This reaction was substantial. There was no statistically significant relation between the long-term annoyance of aircraft noise on the one hand and the subjective quality of sleep respectively the acute nightly aircraft noise annoyance on the other. The factors "ambient noise perception in the residential area" and "habituation to aircraft noise" in turn had a statistically significant effect on the acute annoyance.

In the years 2001/2002 DLR carried out a field study with 64 subjects with nine nights each at Cologne / Bonn airport using the same PSG methodology. At this airport there were no night flight restrictions at the time. The nightly air traffic was made up of about two-thirds of older cargo aircraft. Results of this study are so far a basis for the calculation of the Frankfurt Night Index FNI.

The NORAH sleep study was not primarily designed to make comparisons with the Cologne-Bonn study (as there were different bed times in both studies; the samples were inherently different despite the same selection criteria for the volunteers; cargo aircraft from 2001 / 2002 differ in frequency spectra compared to today's passenger airplanes independent from the maximum levels; the PSG recordings were analyzed by different evaluators). Nevertheless, it makes sense to compare an airport with night flight ban (Frankfurt 2012) with an airport without such a night flight ban period (Cologne-Bonn 2001/2002). Due to a partial data loss in the NORAH measurements in 2011, only the PSG data from 2012 were able to be used for this comparison. It was found that sleep efficiency, total sleep time and deep sleep time per total sleep time at Cologne-Bonn airport were decreased statistically significant, the sleep onset, however, increased statistically significant compared to the survey at Frankfurt Airport in 2012. Rapid-Eye-Movement (REM) period time and time awake after sleep were not significantly different in the two studies.

The probability of awakening by a flyover noise with the same maximum level was higher in the Cologne-Bonn study than in NORAH 2012 - e.g., at a maximum level of 45 dB (A) it is increased by 5.0%.

The results demonstrate positive consequences of the initiation of a night flight ban for the residents' sleep at Frankfurt airport. It can also be concluded that the exposure-response relationship that was surveyed 2001/2002 at Cologne-Bonn Airport, might not be straightly transferable to Frankfurt Airport with a night flight ban period. Assuming, however, that the spontaneous awakening probability at Frankfurt Airport was lower than that at Cologne-Bonn Airport, the difference in noise-induced awakening probabilities between the two airports is low. For this statement above mentioned limitations on the comparability of the two studies have to be taken into account.

It applies for both studies that due to methodological reasons only adult subjects were studied who did not have any disease that caused side effects on sleep. This had to be ensured in order to be able to assign the awakening probability unambiguously to the aircraft noise event. This restricts, however, the transferability of the results to vulnerable groups.

The PSG is a very labor- and cost-intensive method of investigation in terms of realization and evaluation. This accounts for the small number of subjects examined. However, compared to other international field studies using PSG the NORAH study had the highest number of volunteers so far. In order to realize higher number of cases with no further increase in effort and budget though, a loss of information concerning the measurement of sleep parameters has to be necessarily accepted. For this, DLR together with the University of Pennsylvania (UPenn) has enhanced the development of a method that proves to predict aircraft noise associated awakenings (the maximum disruption of sleep) by means of the electrocardiogram (ECG) and body movements. NORAH 2011 and 2012 data have been used for this enhancement. In contrast to PSG, this vegetative-motoric method (VMM) has the advantage that an examiner does not have to be present at the subject's home every evening and every morning. Instead the subject can mount the equipment itself. In addition, an analysis of the data can be carried out fully automatically.

The for the VMM optimized evaluation model shows that the probability of a vegetative-motoric response as a function of increasing maximum sound pressure levels of overflights and elapsed sleep times increases nonlinearly. This is quite similar to the exposure-response curve for the awakening probability using the PSG data. Nevertheless, both exposure-response curves are not the same. The probability of a vegetative-motoric response at the same maximum level of a flyover noise is higher than the corresponding awakening probability. There are several plausible explanations for this. Thus, the method detects sometimes shorter activations in the EEG that are not classified as awakenings, but nevertheless may have physiological significance for sleep recovery. The sensitivity of the VMM is therefore higher than the detection of awakenings in the PSG. Furthermore, in the model aircraft noise associated awakenings are only considered when the subject was previously in a sleep stage and not awake. This distinction cannot be made in the VMM,

which also considers reactions that have occurred in a period of wakefulness. In addition, also heart rate accelerations and short term activation of muscles, which are typical for the REM sleep, are taken into account. On the other hand, the probability of vegetative-motoric response decreases with increasing age, whereas the age has no significant effect on the awakening probability. Taking into account these effects when calculating the exposure-response curves for 2012, where the complete information for both methods is available, the curves highly converge.

The developed VMM is an appropriate method to describe vegetative-motoric body reactions during sleep due to aircraft noise exposure. It allows, in contrast to PSG, an automated and evaluator-independent analysis of the data. With the same budget a significantly higher number of subjects can be studied than with the PSG method. Taking into account that the VMM measures heart rate accelerations, this method possibly reflects a mechanism which could be causally responsible for cardiovascular diseases, potentially occurring after many years of nocturnal noise exposure. The VM method, however, cannot replicate well results about sleep structure (e.g. sleep stage distribution) or aircraft noise associated awakenings as the PSG method does. In principal, one can expect a higher participation rate of local residents for field studies when measuring with the VM method due to the reduced invasiveness.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Schlaf ist von essentieller Bedeutung für den menschlichen Organismus (Krueger et al. 2008), was schon dadurch hervorgehoben wird, dass der Mensch ungefähr ein Drittel seiner Lebensdauer in diesem Zustand scheinbarer Bewusstlosigkeit verbringt (Koella 1988). Die Funktion und Regulation des Schlafs sind komplex und bis heute noch nicht abschließend verstanden. Die bestehenden Theorien beschreiben den Schlaf als Verhalten, das sich zur Sicherung des Überlebens evolutionär entwickelte (Dobzhansky 2015), als notwendigen Zustand für den Abtransport von Stoffwechselprodukten aus dem Gehirn (Xie et al. 2013) und als Phase, in der die neuronale Plastizität des tagsüber Erfahrenen erhöht wird (Tononi & Cirelli 2014).

Konsolidierter Schlaf in der Nacht und optimale Wachheit am Tag werden durch zwei Prozesse gewährleistet, die 1982 von Borbély im Zwei-Prozess-Modell der Schlafregulation beschrieben wurden. Das Modell beinhaltet den Aufbau von sogenanntem Schlafdruck über den Tag hinweg, dem zunächst ein zunehmendes Wachheitssignal der inneren Uhr im Nucleus Suprachiasmaticus des Gehirns entgegenwirkt. Das Wachheitssignal durchläuft eine zirkadian sinusförmige Rhythmik und wird insbesondere durch das Licht am Tag auf 24 Stunden synchronisiert. Durch Rückgang des Wachheitssignals bei weiter steigendem Schlafdruck kommt es schließlich zum Einschlafen. Während des Schlafens wird der Schlafdruck durch Tiefschlaf in exponentieller Weise abgebaut und das Wachheitssignal nimmt ab der zweiten Schlafhälfte wieder zu, so dass ein Aufwachen erleichtert wird.

Von großer Wichtigkeit für die Leistungsfähigkeit und Gesundheit sind Schlafperioden von ausreichender Dauer (idealerweise 7 oder mehr Stunden (Consensus Conference Panel 2015)) und guter Qualität. In der westlichen Welt hat sich dem entgegenstehend ein Trend zur stetigen Reduktion der Schlafdauer und ein Schlafen und Arbeiten zu jeder Tages- und Nachtzeit durchgesetzt. In Deutschland sind es etwa 40 % (Schlack et al. 2013), in den USA etwa 28 % der Bevölkerung (Krueger & Friedman 2009), die berichten, weniger als sieben Stunden in einem 24-stündigen Zeitraum zu schlafen. Die langjährige Verkürzung des Schlafs auf unter sechs Stunden zeigte sich in epidemiologischen Studien assoziiert mit einem gehäuften Auftreten von metabolischen Erkrankungen wie Adipositas (Knutson & Van Cauter 2008), Diabetes (Buxton & Marcelli 2010) und kardiovaskulären Erkrankungen (Cappuccio et al. 2011) sowie einer insgesamt erhöhten Mortalität (Cappuccio et al. 2010). Auch die Funktion des Immunsystems verschlechterte sich unter chronischem Schlafentzug (Irwin et al. 1996), was sich beispielsweise in einer erhöhten Infektanfälligkeit äußern kann (Bryant et al. 2004). Verkürzte Schlafzeiten vermindern zudem die emotionale Kontrolle (Schwarz et al. 2013; Zohar et al. 2005). Außerdem führt die chronische Verkürzung des Schlafs zu einem erhöhten Risiko für Fehlverhalten und Unfälle, die auf Müdigkeit zurückzuführen sind (Barger et al. 2005; Williamson et al. 2011). Studien zu den Auswirkungen von Schlafentzug ergaben, dass dem Tiefschlaf eine besondere Bedeutung

zukommt, da es diese Schlafphase ist, die in den ersten Nächten nach Schlafentzug zuerst nachgeholt wird (Dijk et al. 1993). Viel Tiefschlaf ist somit eines der Merkmale von guter Schlafqualität. Es wurde zudem gezeigt, dass Tiefschlaf und REM-Schlaf (Rapid Eye Movement - Schnelle Augenbewegungen) die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten fördern (Aeschbach et al. 2008; Landsness et al. 2009; Plihal & Born 1997). Die Schlafqualität leidet zudem unter gestörten und fragmentierten Schlafperioden, wie sie durch unterschiedliche Erkrankungen (z.B. das Schlaf-Apnoe-Syndrom) und durch äußere Stimulation (z.B. durch Lärm) verursacht werden können (Martin et al. 1996; Martin et al. 1997). Zu kurze Schlafperioden sowie gestörter Schlaf können Einschränkungen der kognitiven Leistung wie die Konsolidierung des Langzeitgedächtnisses (Stickgold 2005), der Aufmerksamkeit (Lim & Dinges 2008) und der Entscheidungsfindung (Killgore et al. 2006) sowie des Lernens (Drummond et al. 2008) bedingen.

## 1.2 Lärm und Schlaf

Auch beim schlafenden Menschen findet eine Wahrnehmung und kognitive Verarbeitung von außen einwirkender Stimuli statt. Das menschliche Gehör ist als allzeit funktionsfähiges Alarmsystem angelegt und kann auch während des Schlafs unterschiedliche Reize wahrnehmen, ihrer Bedeutung entsprechend einordnen und auf sie reagieren. Das aufsteigende, retikuläre, aktivierende System (ascending reticular activating system, ARAS) leitet über das Gehör eingehende Informationen zu den kardiorespiratorischen Netzwerken des Hirnstamms und auch über den Thalamus zum Kortex weiter. Wie weit die Information auf ihrem Weg zum Kortex gelangt, ist dabei vom augenblicklichen Zustand des Gehirns, u.a. vom aktuellen Schlafstadium, abhängig, in dem sich der Schlafende befindet (Dang-Vu et al. 2010) und begründet die Art der physiologischen Reaktionsweise auf den Stimulus. Ein Stimulus, der allein am Anfang der Signalkette verarbeitet wird, wird eine nur geringe Aktivierung des Organismus bedingen, die sich beispielsweise in Form von Herzfrequenzbeschleunigungen äußert. Ein Stimulus, der eine Aktivierung des Kortex nach sich zieht, kann ein Erwachen aus dem Schlaf zur Folge haben. Störungen durch Fluglärm während des Schlafs können somit unterschiedliche Reaktionen des Körpers verursachen, die in ihrer Art nicht spezifisch für die Lärmquelle sind. Wird eine Aufwachreaktion aus dem Schlaf jedoch in unmittelbarem, zeitlichem Zusammenhang mit einem Lärmereignis beobachtet, so ist eine ursächliche Verbindung wahrscheinlich. Eine kontinuierliche Geräuschbelastung zeigt sich in der Regel weniger störend, als das intermittierende Auftreten von Lärmereignissen (Öhrstrom & Rylander 1982).

In der Lärmwirkungsforschung werden folgende extra-aurale (nicht direkt das Gehör betreffende) Reaktionen auf Lärm unterschieden (Griefahn et al. 2003):

- **Primärreaktionen** wie Störungen des Schlafs und autonomer Funktionen während einer aktuellen Lärmexposition als unmittelbare akute Reaktion (z.B.

Verzögerungen des Einschlafens, Aufwachen, im EEG registrierbare Schlaftiefenänderungen).

- **Sekundärreaktionen** wie Beeinträchtigung des Schlaferlebens sowie eine erhöhte Müdigkeit bzw. Schläfrigkeit am Morgen, im Folgenden auch als subjektive Schlafstörungen bezeichnet, sowie die damit einhergehende Belästigung durch Lärm.
- **Tertiärreaktionen** im Sinne von in der Regel multifaktoriellen chronischen Erkrankungen wie etwa Herz-Kreislauf-Krankheiten. Es wird angenommen, dass Primär- und Sekundärreaktionen über Jahre hinweg zur Manifestation derartiger Erkrankungen beitragen können (Griefahn 1985a,b; Griefahn & Muzet 1978). Die prognostische Bedeutung der Primär- und der Sekundärreaktionen ist im Hinblick auf mögliche Gesundheitsschäden jedoch unklar.

Im Allgemeinen umfassen Schlafstörungen sowohl objektiv messbare als auch subjektiv empfundene Abweichungen vom üblichen Schlafrhythmus (Griefahn 1985a). Unter dem Begriff der akuten Schlafstörungen werden Veränderungen der Schlafphasen, der Körperbewegungen und autonomer Funktionen sowie des subjektiven Schlaferlebens zusammengefasst. Extrinsisch-akute Schlafstörungen werden vor allem durch Lärm verursacht. Der Verkehrslärm ist neben dem Nachbarschaftslärm die häufigste Ursache lärmbedingter Schlafstörungen, zumal das Verkehrsaufkommen in den letzten Jahrzehnten erheblich angestiegen ist. Die WHO (World Health Organization 2009) bewertet die Störung des physiologischen Schlafprozesses als eine der schwerwiegendsten direkten Reaktionen auf Lärm. In der Vergangenheit wurden nur geringgradige Auswirkungen von Verkehrslärm auf die Makrostruktur des Schlafs beobachtet; d.h. auf die Menge des Schlafs und der einzelnen Schlafstadien sowie die Einschlafzeit (Basner & Samel 2005), (Griefahn et al. 2008b). Es konnte jedoch in mehreren Studien nachgewiesen werden, dass sich die Wahrscheinlichkeit, aus dem Schlaf zu erwachen, durch Verkehrslärm erhöht (Basner et al. 2006), (Elmenhorst et al. 2012). Das Erwachen aus dem Schlaf wird als stärkste mögliche Störung des physiologischen Schlafprozesses erachtet, da hier der Schlaf fragmentiert und in seiner zyklischen Abfolge unterbrochen wird. Aufwachreaktionen sind Teil der physiologischen Schlafstruktur (Bonnet & Arand 2007). Physiologische Akutreaktionen des Körpers, die in direktem Zusammenhang mit einem Lärmereignis stehen, können eindeutig dem Lärm zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu kann angenommen werden, dass die Reaktionen auf die Einzelereignisse der gesamten Nacht zu langfristigen, physiologischen Veränderungen des Organismus führen. Die Einzelbeiträge zu dieser Gesamtreaktion, die sich aus der Einwirkung qualitativ unterschiedlicher Stressoren ergeben, sind nicht quantifizierbar. So ist etwa der vermutete Anteil des Lärms an der Entwicklung klinisch relevanter Gesundheitsstörungen nach wie vor unklar (Babisch 2009; HCN 1999) und wird daher detailliert in der NORAH-Teilstudie „Sekundärdatenbasierte Fallkontrollstudie mit vertiefender Befragung“ untersucht. So lange wie diese Beziehungen nicht spezifiziert wurden, bleibt aber auch die prognostische Relevanz der Primärreaktionen bezüglich möglicher Gesundheitsschäden rein spekulativ. Unter Berücksichtigung der WHO-Definition der Gesundheit als einen Zustand vollständigen physischen, psychischen und sozialen Wohlbefindens (WHO 1968) und des Zusammenhangs zwischen der Wachdauer und der

subjektiv bewerteten Schlafqualität sind wenigstens vermehrte Aufwachreaktionen als gesundheitlich bedenklich einzustufen. In einer sehr gut kontrollierten Laborstudie konnte jedoch gezeigt werden, dass der Organismus bestrebt ist, Störungen in der Schlafperiode zu kompensieren, indem beispielsweise physiologisch normale Aufwachreaktionen in der Nacht durch lärmbedingte Aufwachreaktionen ersetzt wurden (Basner, Mueller & Elmenhorst 2011). Eine Habituation der kortikalen Aktivierungen konnte sowohl innerhalb einer lärmgestörten Nacht als auch über mehrere lärmgestörte Nächte hinweg beobachtet werden. Eine ähnliche Anpassung der kardialen Aktivierungen fand jedoch nur innerhalb einer Nacht statt (Basner et al. 2011). Eine Verringerung der Sensitivität der Probanden auf wiederkehrende Wecksignale konnte ebenfalls durch das Einspielen von Tönen während des Schlafs gezeigt werden, die durch bewusstes Handeln quittiert werden mussten und eine stark fragmentierte Schlafstruktur bewirkten. Die Lautstärke der Stimuli musste schließlich während der Untersuchung stetig erhöht werden, bis eine Reaktion auslösbar war (Bonnet 1985, 1986, 1987). Langfristige Folgen für die Gesundheit der Betroffenen sind durch die wiederholten Aktivierungen des vegetativen Nervensystems während des Schlafs denkbar. So zeigt sich Verkehrslärm assoziiert mit dem vermehrten Auftreten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Babisch 2006; Jarup et al. 2008; Selander et al. 2009; Schmidt et al. 2013). Für Flughafenanwohner stellen Schlafstörungen die wesentlichste Folge des nächtlichen Fluglärms dar, wobei die Änderungen des Schlafrhythmus (Primärreaktionen), die subjektiv empfundene Schlafqualität und resultierende Belästigung sowie im weiteren Verlauf die kognitive Leistung (Sekundärreaktionen) beeinträchtigt werden können (Elmenhorst et al. 2010; Basner et al. 2011; Griefahn 1985a; Samel & Basner 2005). Bei permanenter Lärmexposition ist nicht auszuschließen, dass diese Störungen zur Entwicklung chronischer Krankheiten beitragen (Griefahn & Muzet 1978). Durch die autonomen Reaktionen des Körpers auf ein Lärmereignis (wie Erhöhung der Herzfrequenz) ist die Entwicklung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen hier als eine der wahrscheinlichsten Folgen von dauerhafter Lärmbelastung zu nennen (Babisch 2006; Jarup et al. 2008).

Um Auswirkungen des Lärms auf den Schlaf zu minimieren und eine konsolidierte Schlafperiode zu ermöglichen, ist es naheliegend, als Schutzmaßnahme für Anwohner eine Kernruhezeit ohne Lärm einzurichten. Welchen Nutzen diese Maßnahme hat und welche Auswirkungen die Zunahme der Verkehrsdichte in den Randzeiten um die Kernruhezeit nach sich zieht, ist jedoch nicht untersucht.

### 1.3 Auswirkungen veränderter Lärmexposition auf das Schlafverhalten

Die abrupte Zu- oder Abnahme oder Umverteilung der nächtlichen Lärmbelastung z. B. durch Eröffnung neuer Autostraßen, Bahnlinien oder Flughäfen oder die Veränderung deren Verkehrsmanagements ist für die betroffenen Anwohner in der Regel mit einer anfänglich überproportionalen Zunahme lärminduzierter Schlafstörungen verbunden, die sich nicht aus den bekannten Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen Lärmbelastung und Aufwachwahrscheinlichkeit vorhersagen lässt. Dieser Überschussreaktion schließt sich eine

Gewöhnungsphase an, deren Dauer nicht bekannt ist. Laborstudien zeigen, dass sich meist schnelle Gewöhnungen bei veränderter Verkehrslärmexposition einstellen, die aber meist über die kurz angelegte Studiendauer nicht abgeschlossen sind (Fidell et al. 1995a; Pearson et al. 1995). Vermehrte Schlafragmentierungen werden für eine über die Nacht kontinuierliche Lärmbelastung selbst nach längerer Expositionsdauer im Vergleich zur Ausgangssituation beobachtet (Pearson et al. 1995b; Basner et al. 2011). Bei dauerhaft Exponierten sind weiterreichende Gewöhnungseffekte anzunehmen, die auch die autonomen Reaktionen des Schlafenden auf den Lärmreiz mit einschließen (Tassi et al. 2010). Für die Einführung einer begrenzten Nachtruhezeit mit einer zu erwartenden erhöhten Exposition in den Randstunden liegen in der Literatur keine Schlafdaten vor.

Einige Fluglärmbelästigungsstudien (z.B. Breugelmans 2005; Brink et al. 2008; Kastka 1995; Schreckenber & Meis 2006) zeigen im Vergleich zur derzeitigen „EU-Referenzkurve“ (European Commission 2002; Miedema & Vos 1998) nicht nur auf, dass die Belästigung der Anwohner aufgrund von Fluglärm bei gleichbleibendem energieäquivalenten Dauerschallpegel ( $L_{ASeq}$ ) gestiegen ist, sondern auch, dass sich die Expositions-Wirkungskurven für verschiedene Flughäfen signifikant voneinander unterscheiden. Dies ist damit zu erklären, dass nur ein Teil der Varianz in den Belästigungsurteilen durch die Lärmexposition aufgeklärt wird (es wird von ca. einem Drittel ausgegangen (Guski 1987, 1999), weitere sog. flughafenspezifische Moderatoren (z.B. negative Erwartungen bzgl. der zukünftigen Lärmentwicklung, wahrgenommene Fairness und Berücksichtigung von Anwohnerinteressen bei Entscheidungsprozessen bzgl. des Flughafens, Angst vor Flugzeugabstürzen, aktuelle Medienberichterstattung in Bezug auf Flugverkehr etc.) sind aber für die Bildung des Belästigungsurteils von mindestens ebenso großer Wichtigkeit (Guski 1999, Bartels 2014).

Es gibt bisher keine Studien zur Frage, ob Expositions-Wirkungsbeziehungen für die Aufwachwahrscheinlichkeit im Schlaf auch flughafenspezifisch sind. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine an einem Flughafen mit durchgehendem Nachtfluglärm erhaltene Expositions-Wirkungsbeziehung nicht auf einen Flughafen mit einer Kernruhezeit von 23-5 Uhr übertragen werden kann.

Zudem fokussierte die Schlafforschung bisher auf die Untersuchung von altersentsprechend schlafgesunden Verkehrslärmbetroffenen. Damit wurde ausgeschlossen, dass eine Versuchsperson gleichzeitig unter einer intrinsischen, d.h. nicht durch Umwelteinflüsse verursachten Schlafstörung litt. Es hätte sonst nicht differenziert werden können, ob die beobachteten Aufwachreaktionen oder die am nächsten Tag beobachteten Sekundärreaktionen (Müdigkeitsgefühl, eingeschränkte Leistungsfähigkeit, etc.) durch den Fluglärm oder durch die intrinsische Schlafstörung selbst verursacht wurden, zumal das Ausmaß der intrinsischen Schlafstörungen in verschiedenen Nächten unsystematisch fluktuieren kann. Für die Setzung von Grenzwerten ist es aber unerlässlich, dass gerade auch vulnerable Gruppen wie Kranke, Kinder und Alte berücksichtigt werden.

Die Lärmwirkungsforschung in Bezug auf das Schlafverhalten konzentrierte sich bisher auf das Verhalten langfristig nächtlich exponierter Personen.

## 1.4 Vegetativ-motorische Reaktionen

Der Schlaf ist charakterisiert durch die zyklische Abfolge unterschiedlicher Schlafstadien. In ca. 90-minütigen Intervallen werden die leichten Schlafstadien S1 und S2, die Tiefschlafstadien S3 und S4 und das Stadium REM durchlaufen. Ein kurzes Erwachen oder ein Übergang in das sehr leichte Schlafstadium S1 sind gegen Ende eines Zyklus vermehrt zu beobachten. Generell wird der Non-REM-Schlaf (S1 bis S4) vom REM-Schlaf abgegrenzt (Rechtschaffen et al. 1968). Nach einer Nomenklatur aus jüngerer Zeit (Iber et al. 2007) werden die Tiefschlafstadien zu N3 vereint und die leichten Schlafstadien als N1 und N2 benannt. In jedem der 4-5 aufeinanderfolgenden Zyklen pro Nacht ändert sich die Verteilung der Zeitdauer, die in den verschiedenen Stadien verbracht wird; d.h. zu Beginn dominieren lange Tiefschlafphasen, während in der zweiten Hälfte der Nacht das REM-Schlafstadium überwiegt. Eine Vielzahl der den Schlaf charakterisierenden Phänomene wie die unterschiedlichen Schlafstadien, Schlafstadienwechsel, Arousal und Aufwachreaktionen können in ihrer Gesamtheit nur mit Hilfe der Polysomnografie aufgezeichnet und ausgewertet werden (Steinberg et al. 2010), weshalb diese auch als „Goldstandard“ bezeichnet wird. Die polysomnografischen Messungen erfordern die Applikation von Elektroden an genau definierten Positionen, wodurch der Einsatz dieser Methode nur durch geschultes Personal durchführbar und mit teurer Messapparatur und einem nicht unerheblichen Zeitaufwand verbunden ist (siehe auch Kapitel 2.5). Dies limitiert die Anzahl der zu untersuchenden Probanden. Allein die Polysomnografie oder eine mit Hilfe der Polysomnografie validierte Methode ermöglicht Aussagen über das Auftreten von Aufwachreaktionen. Die Berechnung der „Aufwachwahrscheinlichkeit“ in Abhängigkeit vom Maximalpegel des Lärm-Einzelereignisses bildet die Expositions-Wirkungsbeziehung, die bisher für die Fluglärmindexberechnungen in Frankfurt/Main und Zürich verwendet wurde (Brink et al. 2010).

In Deutschland untersuchte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. DLR von September 2001 - November 2002 das Schlafverhalten von 64 schlafgesunden Anwohnern am Flughafen Köln-Bonn in jeweils neun aufeinander folgenden Nächten in ihrer häuslichen Umgebung polysomnografisch (Basner et al. 2006). Mit derselben Methodik analysierte das DLR von Februar 2008 - Juli 2009 das Schlafverhalten von 33 Anrainern in neun aufeinander folgenden Nächten an zwei stark befahrenen Güterzugstrecken zwischen Köln und südlich von Bonn (Müller et al. 2010; Elmenhorst et al. 2012). Beide Feldstudien erlaubten eine valide Bestimmung der Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel des Einzelereignisses mit Hilfe der polysomnografischen Messungen. In beiden Studien konnte gezeigt werden, dass im Gegensatz zum Aufwachverhalten der Probanden die Gesamtschlafparameter (Gesamtschlafdauer, Einschlaf latenz, Tiefschlaf latenz, Traumschlaf latenz, Tiefschlafanteil) in Abhängigkeit von der Anzahl und dem Maximalpegel der Einzelereignisse nur geringfügig variierten. Allerdings wurden aufgrund des hohen messtechnischen Aufwands sowohl in der DLR-Fluglärm- als auch in der DLR-Bahnlärmstudie nur eine relativ kleine Anzahl an Probandennächten untersucht.

Um in zukünftigen Fluglärmfeldstudien größere Stichproben und auch größere Gebiete erfassen zu können, ist es wünschenswert, das Aufwachverhalten von Flughafenanrainern unter Lärm mit weniger Aufwand, aber annähernd gleicher Sensitivität und Spezifität wie mit polysomnografischen Messungen untersuchen zu können. Basner et al. (Basner et al. 2007; Basner et al. 2008a; Basner et al. 2012) schlagen hierfür einen EKG-basierten automatischen Algorithmus vor, der den Anfang und das Ende einer mit Aufwachreaktionen assoziierten Herzfrequenzbeschleunigung bestimmt. Im Vergleich zu kürzeren Aktivierungen im EEG sind Aufwachreaktionen, die eine mindestens 15 Sekunden andauernde Aktivierung im EEG darstellen, mit ausgeprägten Herzfrequenzbeschleunigungen assoziiert. Wenn es mit dieser Methode (in Kombination mit der Messung der Motilität mit Hilfe der Aktimetrie) möglich ist, zuverlässig lärmbedingte EEG-Aufwachreaktionen auch ohne das EEG zu bestimmen, so stellt dies eine wesentlich kostengünstigere, weniger invasive und weniger arbeitsintensive Methode dar, um größere Stichproben in Feldstudien zu untersuchen. Dabei ist es nicht mehr notwendig, dass vor dem Zubettgehen Personal vor Ort ist, sondern das benötigte Einkanal-EKG kann vom Probanden angelegt und die Messung selbstständig gestartet werden. Die Auswertungen der EKG- und Aktimetrie-Daten erfolgen automatisch. Erste Validierungen des Algorithmus mit Hilfe von Feld- und Schlaflaboraten (ohne Aktimetrie) zeigen gute Übereinstimmungen zwischen EEG-Aufwachwahrscheinlichkeiten und der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Herzfrequenzbeschleunigungen (Basner et al. 2007; Basner et al. 2008a; Griefahn et al. 2008a). Da der Schlaf im Labor qualitativ und quantitativ anders als zu Hause ausfällt, da die Probanden in der ungewohnten Laborumgebung deutlich häufiger aufwachen (Basner et al. 2004a), und nur 56 Nächte aus Felddaten bei der Erstvalidierung des Algorithmus genutzt wurden, waren im Rahmen von NORAH weitere Untersuchungen im Feld notwendig, um den Algorithmus zu validieren und herauszufinden, wie groß der Einfluss inter-individueller Unterschiede auf die Vorhersagbarkeit von EEG-Aufwachreaktionen ist. Es wurde auch überprüft, ob die Integration des Aktometersignals die Sensitivität der Methode erhöht.

Zur Entwicklung einer Methode basierend auf vegetativ-motorischen Reaktionen hat das DLR einen Kooperationsvertrag mit der amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA und der University of Pennsylvania (UPenn, Prof. Dr. med. Basner) geschlossen.

## 1.5 Subjektive Reaktionen

In der NORAH-Schlafstudie wurden neben den schlafphysiologischen auch die subjektiven Wirkungen von Nachtfluglärm auf das Schlaferleben und die Belästigung<sup>1</sup> der fluglärm betroffenen Anwohner untersucht. Beeinträchtigungen des Schlaferlebens sowie eine als erhöht empfundene Müdigkeit bzw. Schläfrigkeit am Morgen, im Folgenden auch als subjektive Schlafstörungen bezeichnet, und die damit einhergehende Belästigung,

---

<sup>1</sup>Für die Belästigungsuntersuchungen an einer weit größeren Stichprobe, unter Hinzunahme der Tag-/Nachtpegel mehrerer Jahre aller drei Verkehrsträger Luft-, Schienen- und Straßenverkehr wird auf den NORAH-Ergebnisbericht „Wirkungen von Verkehrslärm auf die Lärmbelastigung und Lebensqualität“ verwiesen.

zählen zu den sogenannten Sekundärreaktionen, die den primären physiologischen Schlafstörungen zeitlich nachgeordnet sind. Sie setzen während der Lärmexposition ein, können diese auch zeitlich überdauern oder erst danach beginnen, dies gilt insbesondere für die Belästigung.

Die Belästigung durch Lärm ist eine der zentralen psychologischen Größen in der Lärmwirkungsforschung (Höger et al. 2002; Kroesen & Schreckenberg 2011). Sie ist definiert als die bewusste Wahrnehmung und Bewertung der Behinderung einer Aktivität durch unerwünschten Schall (Lärm) (Schick 1997). Eine Lärmbelästigung geht stets mit dem Gefühl einher, durch Geräusche gestört zu werden, ohne diese wirksam bewältigen zu können. Der Begriff der Lärmbelästigung beinhaltet daher sowohl die lärmbedingte Störung bzw. Behinderung einer Aktivität als auch ihre emotionale Bewertung (Guski et al. 1999; Schick 1997). Belästigungen durch Lärm resultieren primär aus Störungen der Kommunikation, der Konzentration, der Ruhe, der Entspannung und des Schlafs (Guski 1987, 1999; Guski et al. 1999). Störungen des Nachtschlafs zählen zu den häufigsten Ursachen von Lärmbeschwerden (Guski 1991; Muzet 2002). Für die Belästigung wurden in der Vergangenheit zahlreiche empirische Studien durchgeführt und valide Expositions-Wirkungskurven für die Belastung durch unterschiedliche Verkehrslärmarten errechnet (Babisch et al. 2009; Fidell et al. 1991; Héritier et al. 2014; Janssen et al. 2011; Miedema & Oudshoorn 2001; Miedema & Vos 1998; Schreckenberg et al. 2010; Schultz 1978).<sup>2</sup>

Da individuelle Reaktionen auf Lärm außer durch die akustischen Eigenschaften der Lärmexposition von verschiedenen personalen, sozialen und situativen Faktoren abhängen, ist üblicherweise der Zusammenhang zwischen akustischer Belastung und Störwirkung nicht so hoch, als dass individuelle Lärmreaktionen sicher aus physikalischen Parametern prognostiziert werden könnten. Diese nicht-akustischen Einflussgrößen werden in der Lärmwirkungsforschung als Moderatoren bezeichnet. Moderatorvariablen sind stets unabhängig vom physikalischen Reiz und kovariieren mit der untersuchten Wirkgröße. Die Mitwirkung von Moderatoren ist für die Varianzaufklärung mindestens ebenso wichtig wie die akustische Belastung selbst. Eine Faustregel besagt, dass in etwa ein Drittel der Belästigung durch akustische Faktoren bestimmt wird, ein weiteres Drittel durch nicht-akustische Moderatoren, während das letzte Drittel der Belästigung noch nicht erklärt werden kann (Bartels 2014; Brink 2014; Fields 1993; Guski 1987, 1999, 2001; Höger 1999; Janssen et al. 2011; Job 1988; Miedema & Vos 1999; Oliva 1998; Schick 1997; Schuemer &

---

<sup>2</sup> Der energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{A\text{Seq}}$  gilt in der Lärmwirkungsforschung als bestes (objektives) Messverfahren zur Prognose von Belästigungen (Aasvang & Engdahl 1999; Hellbrück 1993; Muzet 2002; Schick 1997). Untersuchungen zur Belästigungswirkung von Fluglärm auf die Anwohner an Flughäfen haben allerdings ergeben, dass die fluglärmbedingte Störwirkung oberhalb von 55 dB(A) durch mittelungspegelorientierte Messverfahren tendenziell unterschätzt wird (Guski 2001; Kastka 2001a,b). Nach der Einschätzung von Björkman et al. (1992) sowie Quehl & Basner (2005a,b, 2006) lässt sich die Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen akustischer Fluglärmbelastung und Belästigung am besten durch die Parameter Maximalpegel und Anzahl an Flugereignissen charakterisieren, da diese am ehesten dem intermittierenden Charakter von Fluglärm gerecht werden. Feldstudien zeigen, dass die Lärmbelästigung mit dem Ansteigen des Schallpegels zunimmt und zwar je nach zugrunde gelegtem Pegelmaß unterschiedlich stark (Björkman et al. 1992; Fields 1984, 1993; Rylander et al. 1972, 1980, 1986).

Schuemer-Kohrs 1984; Stallen 1999). Die individuelle Lärmempfindlichkeit ist eine wichtige personenbezogene Moderatorvariable (Job 1999; Miedema & Vos 2003; Stansfeld 1992; Weinstein 1978; Zimmer & Ellermeier 1998, 1999). Soziodemografische Merkmale wie Alter und Geschlecht haben meistens einen geringeren Einfluss. Es gibt Moderatoren, die speziell fluglärmspezifische Inhalte betreffen (Kastka 2001a,b; Oliva 1998; Ortscheid & Wende 2000; Rohrman et al. 1978). Dazu gehören beispielsweise die eingeschätzte Gesundheitsgefährdung durch Fluglärm, die allgemeine Einstellung zum Flugverkehr und seine empfundene Gesundheitsschädlichkeit, Notwendigkeit und Vermeidbarkeit, alles in allem das gesellschaftliche „Image“ des Flugverkehrs. Ein fluglärmspezifischer personenbezogener Moderator ist die subjektive Gewöhnung an Fluglärm oder der Grad an Vorbelastung durch Fluglärm zu Beginn einer Studie im Sinne einer Langzeitbelastung.

Die subjektive Einschätzung des Schlafs ist ein komplexer Prozess, da ein bereits abgeschlossener und nicht bewusst erlebter Zustand bewertet werden muss. Sie ist nur indirekt auf der Basis erinnerter und bewusst erlebter Wachzeiten und Einschlafschwierigkeiten möglich (Öhrström 1995). Die Ergebnisse von Feldstudien zum subjektiven Schlaferleben fluglärm betroffener Anwohner sind uneinheitlich. Einige Studien sprechen dafür, dass subjektiv eine vollständige Gewöhnung an Fluglärm möglich ist, d.h., dass selbst deutliche Veränderungen der akustischen Exposition sich kaum auf das individuelle Schlaferleben auswirken (Fidell et al. 1995b; Hume & Thomas 1993; Ollerhead et al. 1992). Im Gegensatz dazu deuten ältere Untersuchungen an Flughäfen auf eine nur unvollständige Gewöhnung hin (Friedman & Globus 1974; Globus et al. 1974).

Sowohl für das Schlaferleben als auch die Belästigung gilt, dass intermittierende Geräusche wie Fluglärm bei gleichem energieäquivalenten Dauerschallpegel stärker beeinträchtigend und störend wirken als kontinuierliche Schallereignisse (Quehl 2005; Quehl & Basner 2005a,b, 2006). Studien zur Wirkung von Straßenverkehrslärm berichten über gegenteilige Effekte. Laut Miedema (1993) ist etwa kontinuierlicher Autobahnlärm bei gleichem Mittelungspegel lästiger als der intermittierende Lärm von Hauptverkehrsstraßen. Lercher (2008) konnte dieses Ergebnis jedoch nicht bestätigen. Die Reduktion der Schlafqualität ist von der Anzahl und dem Maximalpegel der einwirkenden Geräusche abhängig und beginnt bei Maximalpegeln zwischen 55 und 60 dB(A) (Öhrström 1995; Öhrström & Rylander 1982, 1990). Nach lärmbedingten Schlafstörungen fühlen sich die Befragten häufiger müde, wobei das Ausmaß der Müdigkeit mit der Anzahl der Schallereignisse ebenso wie mit dem Mittelungspegel ansteigt (Griefahn 1986; Öhrström & Björkman 1988; Öhrström 1995; Quehl 2005).

Das Bedürfnis nach Ruhe und Entspannung und damit die Reaktionen auf Lärm verändern sich üblicherweise in Abhängigkeit von tagesperiodisch variierenden Aktivitäten. Einige Studien haben gezeigt, dass es deutliche Unterschiede in den auf verschiedene Tageszeiten bezogenen Lärmbelastungsurteilen gibt (Babisch et al. 2009; Felscher-Suhr et al. 1995, 1996; Schreckenberg et al. 1999; Schreckenberg & Guski 2005). Es konnte nachgewiesen werden, dass die auf den Abend oder die Nacht bezogene Fluglärmbelastung bei vergleichbaren Pegeln (im jeweiligen Referenzzeitraum) über der auf den Tag bezogenen Belastung liegt (Fields 1986; Höger et al. 2002; Wirth et al.

2002; Wirth 2004). In der Schweizer Lärmstudie 2000 (Brink et al. 2010; Wirth et al. 2002; Wirth 2004) sowie in einer aktuellen Studie zur Fluglärmbelastung am Flughafen Köln-Bonn (Bartels 2014) wurden von den Befragten vor allem die Nachtrandstunden (5:00-6:00 Uhr; 22:00-0:30 Uhr) als Zeiten genannt, zu denen der Fluglärm als nicht zumutbar erlebt wird (siehe auch Brink et al. 2010).

Die in den meisten Lärmwirkungsstudien beschriebenen Effekte betreffen quasi-stationäre Belastungen im Feld, d.h. Lärmexpositionen, die sich in den vor einer Feldstudie liegenden Monaten nicht abrupt geändert haben und denen auch keine abrupte Änderung in naher Zukunft bevorsteht. Die unter diesen Bedingungen gewonnenen Expositions-Wirkungskurven sind relativ stabil und lassen sich bei derselben Schallquelle zwischen verschiedenen Studien weitgehend miteinander vergleichen. Diese stabile Situation ändert sich, wenn der Betrieb einer Schallquelle abrupt geändert wird, beispielsweise bei einer Eröffnung oder einer Umverteilung der (nächtlichen) Lärmbelastung infolge eines neuen Verkehrsmanagements. Eine derart plötzliche Veränderung der Lärmexposition ist häufig für die betroffenen Anwohner mit einer anfänglich überproportionalen Zunahme primärer und sekundärer Reaktionen verbunden, die sich aus Expositions-Wirkungskurven für quasi-stationäre Belastungen nicht vorhersagen lässt. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer sogenannten „Überschussreaktion“. Bei einer deutlichen Zunahme der Lärmbelastung kann eine „Überreaktion“ folgen, d.h. die Betroffenen reagieren stärker belästigt als unter stationären Bedingungen zu erwarten gewesen wäre (Brink et al. 2008; Fields et al. 2000; Job & Hatfield 2003; Schuemer & Schreckenber 2000; Van Kamp & Brown 2003). Aus einer deutlichen Lärmreduktion kann eine „Unterreaktion“ resultieren, d.h. die Betroffenen reagieren weniger belästigt als in einer stationären Situation zu erwarten gewesen wäre. Der Überschussreaktion schließt sich eine Gewöhnungsphase an, deren Dauer nicht bekannt ist. Laborstudien zeigen aber, dass sich für den Schlaf meist schnelle Gewöhnungen bei veränderter Verkehrslärmexposition einstellen (Fidell et al. 1995a; Pearsons et al. 1995). Bei dauerhaft exponierten Personen sind weitreichendere Gewöhnungseffekte anzunehmen.

Es ist nach wie vor unklar, ob und in welchem Umfang bei Eröffnung eines neuen Flughafens bzw. bei einer erheblichen Umverteilung der Fluglärmbelastung mit einem Überschusseffekt zu rechnen ist. Allerdings weisen Studien zur Wirkung von Straßen- und Schienenverkehrslärm auf eine Überschussreaktion bei Eröffnung der Schallquelle hin, so dass ein Ausbleiben dieses Effekts bei Eröffnung eines Flughafens eher unwahrscheinlich ist. Eine frühe Untersuchung zu den Auswirkungen eines Flughafenneubaus auf die Belästigung der Wohnbevölkerung wurde von Francois (1979) durchgeführt. Der Flughafen Paris-Roissy wurde 1974 eröffnet, etwa 700 Anwohner wurden vor der Eröffnung befragt, ein Teil davon ein Jahr nach Eröffnung, und davon wiederum ein Teil dreieinhalb Jahre nach Eröffnung. Der Anteil der hoch belästigten Anwohner ist zu den drei Zeitpunkten bei fast allen Pegelstufen des Tageslärms vergleichbar, ein Effekt des Neubaus wurde für die Lärmbelastung am Tag also nicht gefunden. Im Hinblick auf die Belästigung durch nächtlichen Fluglärm zeigte sich im Verlauf der Jahre ein allmählicher Rückgang der Belästigung. Ob es sich dabei um das Nachlassen einer Überschussreaktion handelt, lässt

sich nach Guski und Schönplüg (2004) nicht beurteilen, da hierfür sowohl ein Vergleich mit einem gar nicht geänderten Flugbetrieb als auch ein Vergleich der Belästigung zwischen den verschiedenen Zeitpunkten und Flughäfen erforderlich gewesen wäre (siehe auch Guski 2004). Miyahara (1990) untersuchte die Lärmwirkung von drei neu eröffneten japanischen Flughäfen zwischen 1971 und 1975 auf Kyushu (Oita, Kagoshima und Nagasaki) mittels wiederholter Befragungen zu verschiedenen Messzeitpunkten und in unregelmäßigen Abständen. Es wurde kein allgemeines Belästigungsurteil erhoben, sondern nur die Störungen verschiedener Tätigkeiten erfragt. Diese Störungen zeigen eine im Verlauf der Zeit abnehmend starke Korrelation mit dem Maximalpegel der Überflüge. Aus den Daten leitet Miyahara (1990) eine Überschussreaktion im ersten Jahr nach der Eröffnung ab, die im Verlauf des zweiten Jahres verschwindet. Allerdings fehlt auch hier ein Vergleich mit einem nicht geänderten Flugbetrieb. Eine Studie zur Wirkung der erheblichen Umverteilung von Fluglärm durch die Inbetriebnahme einer zusätzlichen Start- und Landebahn im Jahr 1996 am Flughafen Vancouver, die insgesamt 17 % mehr Flugbewegungen ermöglichte, gleichzeitig aber mit einem Nachtflugverbot verbunden war, wurde von Fidell und Silvati (1998) durchgeführt. Ein Jahr vor der Eröffnung der neuen Start- und Landebahn fand eine erste telefonische Befragung von 1.000 Anwohnern statt, die zweite erfolgte zwei Jahre nach Eröffnung in denselben Wohngebieten. Es gab keine Kontrollgruppe ohne Belastungsänderung an einem anderen Flughafen, jedoch fand in drei der sieben Untersuchungsgebiete keine Lärmbelastungsänderung statt. Im Interview wurde u.a. auch die allgemeine Belästigung durch Fluglärm erfragt. Es zeigt sich, dass der Prozentsatz der hoch belästigten Personen (die oberen zwei von insgesamt 4 Skalenstufen) in der ersten Befragung etwas niedriger ist als nach den Expositions-Wirkungskurven unter quasi-stationären Bedingungen zu erwarten gewesen wäre. Nach Eröffnung der zusätzlichen Startbahn steigt der Prozentsatz der hoch belästigten Personen besonders in den Wohngebieten stark an. Die durchschnittliche Zunahme der Belästigung entspricht etwa 6 dB DNL gegenüber dem quasi-stationären Zustand. Aussagen über die Dauer des Überschusseffekts werden nicht gemacht.

Für die Einführung einer nächtlichen Kernruhezeit mit einer veränderten Lärmbelastung in den Nachtrandstunden gibt es bisher keine Untersuchungen zu schlafbezogenen Sekundärreaktionen und möglichen Überschusseffekten.

## 1.6 Hypothesen

### 1.6.1 Physiologische Reaktionen

Für den Flughafen Leipzig-Halle, der im Jahr 2007 zu einem nächtlichen Frachtdrehkreuz ausgebaut wurde, wurde erstmals ein Schutzkonzept entwickelt, das abgesehen von den akustischen Kriterien der Lärmbelastung auch physiologische Reaktionen im Schlaf berücksichtigte (Basner et al. 2006). Die Expositions-Wirkungskurve zwischen Fluglärm und der Wahrscheinlichkeit, durch diesen zu erwachen, die diesem Schutzkonzept zugrunde liegt, basiert auf den Ergebnissen umfangreicher Studien am Flughafen Köln-Bonn aus den

Jahren 2001/2002. Sie fand seither Eingang in den Frankfurter Nachtindex und in den Zürcher Fluglärm-Index. Unklar ist jedoch, inwieweit eine Übertragbarkeit einer Expositions-Wirkungskurve von einem Flughafen auf einen anderen möglich ist oder ob die Reaktionsweisen im Schlaf durch flughafen- bzw. flugbetriebsspezifische Faktoren beeinflusst werden.

In der Realsituation (im Feld) führt dieselbe Lärmexposition in der Regel zu geringeren Störungen als in einer Laboruntersuchung (Horne et al. 1994; Fidell et al. 1995a; Pearsons et al. 1995). Erkenntnisse aus Laboruntersuchungen können somit nur eingeschränkt auf die Realsituation übertragen werden. Um obige Fragestellung zu bearbeiten, ist notwendig, in der Realsituation zu messen, wie sich die Einführung einer Kernruhezeit von 23 Uhr bis 5 Uhr am Flughafen Frankfurt mit vermehrtem Flugaufkommen in den Stunden kurz vor 23 Uhr und kurz nach 5 Uhr auf das Schlafverhalten der Anwohner auswirkt und ob die Expositions-Wirkungsbeziehung des Flughafens Köln-Bonn auf diese Situation übertragbar ist.

Es ist zudem nicht bekannt, in welchem Ausmaß eine Anpassung an die neue Lärmsituation möglich ist und ob sich diese im Lauf der Jahre verändert.

In Bezug auf die primären Schlafstörungen wurde in der NORAH-Schlafstudie von folgenden Hypothesen ausgegangen:

- (1) Die Bündelung der Flugbewegungen in den Randstunden infolge der Einführung der Kernruhezeit bewirkt einen Anstieg akuter Schlafstörungen, d.h. eine Beeinträchtigung des Einschlafens vor Beginn der Kernruhezeit und ein häufiges und verfrühtes Aufwachen nach ihrer Beendigung. Über die gesamte Schlafdauer gesehen tritt aber eine Verbesserung des Schlafs im Vergleich zum Jahr 2011 ein.
- (2) Die Expositions-Wirkungskurven des Flughafens Köln-Bonn sind eher auf den Flughafen Frankfurt mit Nachtflugverkehr übertragbar als auf den Flughafen Frankfurt mit Kernruhezeit.
- (3) Bei Anwohnern, die die Eröffnung der neuen Landebahn und den damit einhergehenden Wandel eher positiv bewerten (z.B. Flughafenmitarbeiter), sind auf Fluglärm zurückführbare Schlafstörungen signifikant weniger ausgeprägt als bei denjenigen, die diese Veränderungen eher negativ bewerten.
- (4) Mit einer zeitlichen Verzögerung setzen Gewöhnungsprozesse ein, die bewirken, dass ein Lärmereignis als bekannt und damit ungefährlich eingestuft wird. Es ist zu erwarten, dass sich die Frequenz der Aufwachreaktionen in den Randstunden an die Expositions-Wirkungsbeziehung aus der Basiserhebung angleicht.

### 1.6.2 Subjektive Reaktionen

In der NORAH-Schlafstudie wurde neben der Messung fluglärmbedingter primärer Schlafstörungen der Zusammenhang zwischen der Fluglärmbelastung und subjektiven Sekundärreaktionen untersucht. Diese beinhalteten subjektive Schlafstörungen sowie die Belästigung durch Fluglärm. Zur Messung fluglärmbedingter sekundärer Störungen wurden

Bewertungen des Schlafs sowie der empfundenen Müdigkeit und Schläfrigkeit am Morgen nach dem Aufstehen vorgenommen. Müdigkeits- und Schläfrigkeitsbewertungen wurden als zusätzliche Indikatoren für eine schlafgestörte Nacht herangezogen, da diese morgens unmittelbar nach dem Aufstehen erfasst wurden. Zur Ermittlung von Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen der Fluglärmbelastung und den genannten subjektiven Reaktionen wurde von der grundlegenden Hypothese ausgegangen, dass mit:

- (A) wachsender nächtlicher Fluglärmexposition subjektive Schlafstörungen (z.B. Abnahme der Schlaferholung, zunehmende subjektive Aufwachhäufigkeit nachts sowie eine erhöhte Müdigkeit und Schläfrigkeit am Morgen) und die damit verbundene Belästigung durch Fluglärm statistisch signifikant zunehmen.

Fokussiert auf die veränderte Verteilung des Fluglärms im betrachteten Messzeitraum 2011 bis 2013 waren folgende Hypothesen zu überprüfen:

- (B) Die Veränderung des Flugbetriebs aufgrund der Einführung der Kernruhezeit (23:00-5:00 Uhr) bewirkt über die gesamte Schlafdauer gesehen eine Verbesserung des Schlaferlebens im Vergleich zur Basiserhebung im Jahr 2011.
- (C) Die Einführung der Kernruhezeit mit verändertem Flugbetrieb in den Randstunden (d.h. 22:00-23:00 Uhr bzw. 5:00-6:00 Uhr) führt zu einer Überschussreaktion im Hinblick auf die genannten subjektiven Sekundärreaktionen.

Zur Prüfung der Hypothesen in Bezug auf die subjektiven Reaktionen auf Fluglärm wurden anhand von Längsschnittanalysen, bei denen methodisch entsprechende Untersuchungen zu mehreren Zeitpunkten durchgeführt und die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen miteinander verglichen werden, folgende Auswertungen mittels der dargestellten statistischen Verfahren vorgenommen:

- Für die Untersuchungsjahre 2011 bis 2013 wurden jeweils deskriptive Analysen zu den Bewertungen mittels FAT, KSS und VAS, die während der Schlafstudien erhoben wurden, durchgeführt.
- Für ausgewählte schlafbezogene Sekundärvariablen (d.h. die visuellen Analogskalen „Wachheit/Müdigkeit“, „Schlaferholung“ und „Schlauftiefe“, die „subjektive Aufwachhäufigkeit“ sowie die aktuelle „Müdigkeit (FAT)“ und „Schläfrigkeit (KSS)“) wurden jeweils einzelne Expositions-Wirkungskurven anhand von Regressionsanalysen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel (bezogen auf die nächtliche Fluglärmbelastung) und der Anzahl nächtlicher Fluglärmereignisse berechnet. Nicht-akustische Einflussgrößen wurden bei der Modellierung berücksichtigt.
- Die Expositions-Wirkungskurven aus der Basiserhebung mit durchgängigem Nachtflugbetrieb in 2011 wurden für die subjektiven Variablen „Müdigkeit“ (FAT) und „Schläfrigkeit“ (KSS) mit der nach Einführung der Kernruhezeit erhobenen Kurven aus 2012 und 2013 verglichen.
- Die akute Belästigung in der NORAH-Schlafstudie 2013 durch die vorausgegangene nächtliche Fluglärmbelastung wurde mit der quasi-stationären

Belästigungssituation bei Anwohnern des Flughafens Köln-Bonn verglichen (Quehl & Basner 2006). Es wurde davon ausgegangen, dass im Jahr 2013 die Belastungssituation mutmaßlich einer von den Frankfurter Flughafenanwohnern als stabil wahrgenommenen statischen Situation nach Einführung der neuen Kernruhezeit entspricht.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Probandenauswahl

In der NORAH-Schlafstudie wurden von 2011 bis 2013 insgesamt 202 Probanden im Alter von 18 bis 78 Jahren untersucht. 115 Personen waren weiblich, 87 männlich. 39 Probanden wurden dreimal in den Untersuchungsjahren 2011 bis 2013 untersucht, 36 Personen nahmen zweimal an der Schlafstudie in den Jahren 2012 und 2013 teil, drei Probanden nahmen wiederholt in den ersten beiden Jahren teil. Alle Untersuchungsteilnehmer waren gesund, litten an keinerlei intrinsischen Schlafstörungen<sup>3</sup> und hörten altersgemäß normal.

Alle Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil und wurden entsprechend den Richtlinien der Deklaration von Helsinki vor Studienbeginn aufgeklärt. Das Studienprotokoll wurde durch die Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein genehmigt. Die Probanden konnten ihre Teilnahme jederzeit beenden.

Alle Personen erhielten für ihre Studienteilnahme eine Aufwandsentschädigung in Höhe von € 70 pro Nacht.

Um mögliche Aufwachreaktionen der untersuchten Anwohner eindeutig auf Fluglärmereignisse zurückführen zu können, erfolgte die Auswahl ihrer Wohngebiete dergestalt, dass Fluglärm dort als dominantes Geräusch vorherrschte und möglichst wenig andere (Verkehrs-) Geräusche im Schlafräum auftraten. Primäres Kriterium für die Auswahl der Untersuchungsgebiete war es, dass dort voraussichtlich von 2011 bis 2013 das höchste Aufkommen an nächtlichen Flugbewegungen zwischen 22:00-06:30 Uhr bzw. 23:00-07:30 Uhr ausgehend vom Flughafen Frankfurt am Main vorlag. Eine Verteilung von Fluglärmmaximalpegeln am Ohr des Schlafenden im Bereich von ca. 35-70 dB(A) wurde angestrebt. Die Auswahl der Messgebiete erfolgte in Übereinkunft mit dem Wissenschaftlichen Beirat Qualitätssicherung (WBQ) des Projektes NORAH und dem Ökoinstitut Darmstadt.

Abbildung 2-1 stellt die Untersuchungsgebiete der NORAH-Schlafstudie im Umkreis des Frankfurter Flughafens dar.

---

<sup>3</sup>Ein wesentliches Auswahlkriterium zur Teilnahme an der NORAH-Schlafstudie bestand darin, zu gewährleisten, dass die Probanden keine chronischen mit dem Schlafverhalten interferierenden Erkrankungen aufwiesen. Damit wurde ausgeschlossen, dass ein Proband gleichzeitig unter einer intrinsischen, d.h. nicht durch Umwelteinflüsse ausgelösten Schlafstörung litt. Es hätte sonst nicht unterschieden werden können, ob die beobachteten Aufwachreaktionen und die am nächsten Tag resultierenden Sekundärreaktionen wie etwa eine erhöhte Müdigkeit durch den Fluglärm an sich oder durch die intrinsische Schlafstörung selbst verursacht worden sind.

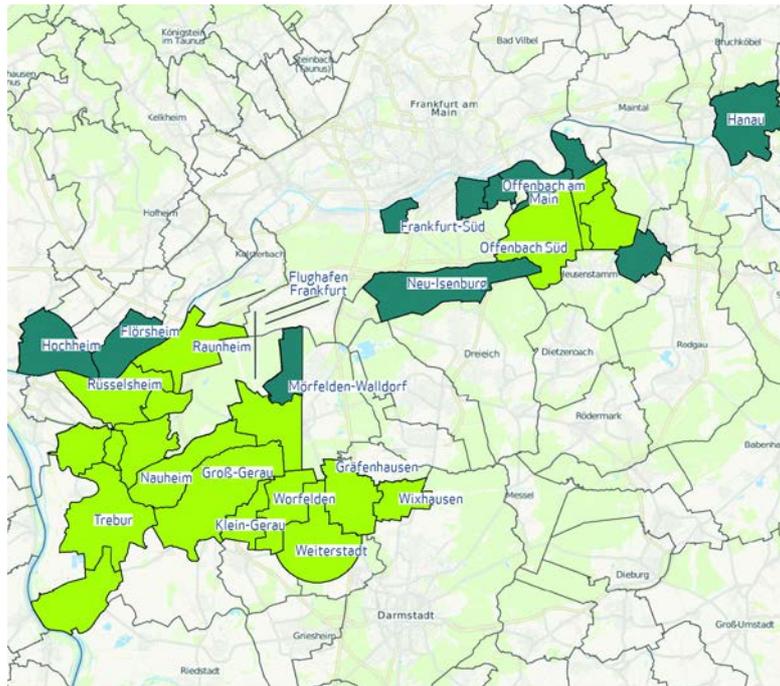


Abbildung 2-1: Untersuchungsgebiete der NORAH-Schlafstudie im Rhein-Main Gebiet um den Frankfurter Flughafen, hellgrüne Flächen: Gebiete 2011-2013, blaue Flächen: neu hinzugekommene Gebiete in 2013.

Die Probanden für die NORAH-Schlafstudie wurden in allen Messjahren in einem mehrstufigen Verfahren ausgewählt. Die Auswahl der Teilnehmer oblag stets dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Folgende Auswahlkriterien wurden dabei zugrunde gelegt:

- Probanden sollten ihrem Alter gemäß normal hören. Das Benutzen lärmmindernder Hilfsmittel zum Schlafen wie etwa Ohrstöpsel führte zum Ausschluss.
- Starke Schnarcher wurden ausgeschlossen. Schnarchen gilt als eines der Hauptsymptome für obstruktive Apnoen und ist ein Indikator für intrinsische Schlafstörungen. Auch stark schnarchende Partner mussten während der Studienphase die Möglichkeit haben gesondert zu schlafen, um den Probanden nicht zu stören.
- Probanden mit Herzrhythmusstörungen wurden ausgeschlossen. Die Interpretation einer Wirkung von Fluglärm auf kardiale Aktivierung wäre erschwert.
- Periodic limb movements in sleep: Probanden mit derartigen Symptomen wurden ausgeschlossen, weil die Krankheit den Schlaf und die Aktimetrie stört.
- Probanden mit chronischen Kopfschmerzen wie etwa Migräne wurden ausgeschlossen, weil eine Auswirkung auf die Schlafqualität nicht auszuschließen ist.
- Probanden mit ansteckenden Krankheiten wurden u.a. zum Schutz der Versuchsleiter ausgeschlossen.
- Probanden sollten nicht drogen-, alkohol- oder nikotinsüchtig sein, da ein Einfluss auf die Schlafqualität nicht auszuschließen ist.

- Probanden sollten keine Antidepressiva, zentral dämpfende Medikamente oder regelmäßig Schlafmittel einnehmen, da diese zu einer Anhebung der Weckschwelle im Schlaf führen können.
- Probanden sollten keine Pflasterallergie haben, weil die Elektroden auf der Haut mit Pflaster fixiert werden.
- Um die inter- und intraindividuelle Vergleichbarkeit der Daten zu erhöhen, sollten die Probanden eine in der Dauer weitgehend standardisierte Nachtruhe einhalten. Die Bettzeit entsprach der in Mitteleuropa üblichen Schlafdauer zwischen 7,5 und 8,5 Stunden. Um die Einflüsse der im Oktober 2011 eingeführten Kernruhezeit zwischen 23:00-5:00 Uhr und die Konzentrierung der Flüge auf die Nachtrandstunden (22:00-23:00 Uhr, 05:00-06:00 Uhr) bewerten zu können, wurden ab 2012 zwei Versuchsgruppen mit unterschiedlichen Zubettgeh- und Aufstehzeiten gebildet. Die Zubettgehzeit der Bettzeitgruppe 1 wurde auf 22:00-22:30 Uhr und die Aufstehzeit entsprechend auf 06:00-06:30 Uhr festgelegt. Die Probanden der Bettzeitgruppe 2 gingen in der Zeit zwischen 23:00-23:30 Uhr zu Bett, in der sie keinem Fluglärm mehr ausgesetzt waren, standen zwischen 07:00-07:30 Uhr auf und waren somit in der letzten Phase des Schlafs eine Stunde länger vom Fluglärm betroffen als die Probanden der Bettzeitgruppe 1. Es wurden explizit Probanden ausgewählt, deren Schlafgewohnheiten annähernd mit diesen Zeiten übereinstimmten, um mögliche Anpassungseffekte während der Untersuchungen an ungewohnte Schlafzeiten auszuschließen.
- Probanden sollten nicht regelmäßig Schichtdienst leisten, damit ein korrekter Studienablauf gewährleistet werden konnte und um eine Mindestruhezeit von 6 Stunden sicherzustellen. Außerdem wurden somit Effekte durch Verschiebungen der zirkadianen Phase, wie sie bei Schichtarbeitern wahrscheinlich sind, vermieden.
- Probanden sollten ca. 2 Stunden vor dem Zubettgehen und ca. 1 Stunde nach dem Aufstehen Zeit für den Studienablauf haben (dies gilt nur für die Studienjahre 2011 und 2012 aufgrund des hohen methodischen Aufwands der polysomnografischen Messungen).
- Probanden sollten ausreichende Deutschkenntnisse zum Verständnis der Fragebögen haben.
- Probanden, die weniger als 1 Jahr in ihrer Wohngegend wohnen, wurden ausgeschlossen, um mögliche Gewöhnungseffekte auszuschließen.
- Probanden, die jünger als 18 Jahre alt waren, wurden ausgeschlossen.
- Probanden, die mit kleinen Kindern (< 6 Jahre) im Haushalt zusammen wohnten, die den Schlaf eventuell unterbrechen, wurden ausgeschlossen.

In den Untersuchungsgebieten Gräfenhausen, Gravenbruch, Klein-Gerau, Nauheim, Offenbach Süd, Raunheim, Rüsselsheim, Wixhausen und Worfelden wurden vom 03. bis 08. Juni 2011 insgesamt 12500 Infoblätter zur Probandenwerbung durch die Post verteilt. Nach dem Teilnahmeaufruf zur Studie durch diese Infoblätter sowie weiteren Werbekampagnen über Zeitungsanzeigen, die NORAH-Homepage und offizielle Internetseiten von Kommunen im Untersuchungsgebiet meldeten sich Interessenten per Email, Fax, Brief oder Telefon.

Den Interessenten wurde eine Antwort mit detaillierten Informationen zur Studie, ein Eingangsfragebogen und ein Anamnesebogen zugeschickt. Die Fragebögen lieferten erste wichtige Informationen über die Probanden wie etwa Alter, Geschlecht, allgemeiner Gesundheitszustand, gewöhnliche Zubettgehzeiten, Arbeitsbeginn, Schlafstörungen, Schnarchen, Pflasterallergien, Alkohol-, Koffein- und Tabakkonsum sowie Lärmempfindlichkeit. Mit den Fragebögen wurde sichergestellt, dass die Interessenten die zur Teilnahme an der Studie erforderlichen Auswahlkriterien erfüllten.

In den Jahren 2011 und 2012 schlossen sich der Vorauswahl durch die zugesandten Fragebögen eine nächtliche Probemessung (Akustikmessung und Pulsoxymetrie) im Schlafzimmer der Probanden und eine etwa halbstündige persönliche Studieninformation in Form einer Präsentation vor Ort an. Die Personen wurden intensiv und detailliert über die Studie, ihre Ziele und die einzusetzenden Messinstrumente aufgeklärt. Durch die Probemessung konnte zum einen die Lokalität in Augenschein genommen werden hinsichtlich Fluglärmbelastung, Größe, Schalldämmung und örtlicher sowie familiärer Gegebenheiten. Dazu gehörte auch die akustische Aufzeichnung aller Geräusche am Ohr des Schläfers für eine Nacht, um die akustische Situation der Messstelle genau einschätzen und mögliche Schnarcher identifizieren zu können. Das Pulsoxymeter diente der Überprüfung der nächtlichen Sauerstoffsättigung im Blut, die bei starkem Schnarchen bzw. Apnoen charakteristischerweise absinkt.

Im **Untersuchungsjahr 2011** wurden insgesamt 66 der beschriebenen Probemessungen durchgeführt, anhand derer schließlich 49 Probanden für die Schlafstudie ausgewählt wurden. Die Probanden wurden im Zeitraum vom 25. Juli bis zum 08. Oktober 2011 an 42 unterschiedlichen Messstellen untersucht. Die Aufteilung der Teilnehmer auf die ausgewählten Untersuchungsgebiete war folgendermaßen: 8 x Gräfenhausen, 5 x Nauheim, 1 x Klein-Gerau, 10 x Offenbach Süd, 6 x Raunheim, 6 x Rüsselsheim, 4 x Wixhausen, 9 x Worfelden.

Ein wichtiges Ziel der Schlafstudie bestand darin, die im Jahr 2011 gewonnenen bzw. die in 2012 hinzugekommenen Probanden im Längsschnitt auch in den Folgejahren zu untersuchen. Im **Untersuchungsjahr 2012** wurden daher alle Teilnehmer aus 2011 erneut kontaktiert. Von den ursprünglich 49 Teilnehmern erklärten sich 42 Personen (23 weiblich, 19 männlich) bereit, auch an den Messungen in 2012 teilzunehmen. Die Probanden stammten aus folgenden Untersuchungsgebieten: Gräfenhausen (8x), Klein-Gerau (1x), Nauheim (5x), Offenbach Süd (10x), Raunheim (2x), Rüsselsheim (5x), Worfelden (7x), Wixhausen (4x). Von den sieben Personen, die im Jahr 2012 nicht mehr teilnahmen, waren drei fortgezogen, ein Proband hatte kein Interesse mehr, zwei waren zeitlich im gesamten Messzeitraum Mai bis November 2012 verhindert, eine Person konnte nicht mehr erreicht werden. Um zusätzliche, den Schlaf beeinflussende Gebietseffekte (z.B. Neubelastung Flörsheim) auszuschließen, wurde zusammen mit dem Ökoinstitut und dem WBQ entschieden, sämtliche zusätzlichen Teilnehmer in 2012 ausschließlich aus den Untersuchungsgebieten des Jahres 2011 zu rekrutieren (Raunheim, Offenbach).

Die neuen Probanden wurden 2012 durch Zeitungsanzeigen beworben. Zusätzlich hatte die Stadt Raunheim auf ihrer Facebook-Seite auf die NORAH-Schlafstudie aufmerksam gemacht. Insgesamt bewarben sich 166 Personen auf die Anzeigen. Hinzu kamen 17 Bewerber, die in 2011 Interesse gezeigt hatten, aber aus zeitlichen Gründen nicht mehr untersucht werden konnten, und 15 Personen, die bei den Telefoninterviews im NORAH-Modul 1 Interesse an der Teilnahme der Schlafstudie bekundet hatten. Schließlich wurden in 2012 41 neue Probanden ausgewählt. Davon waren 14 männlich, 27 weiblich. Der Untersuchungszeitraum im Jahr 2012 erstreckte sich für alle (alten und neuen) Probanden vom 21. Mai bis 09. November.

Ein 2011 und 2012 entwickeltes vereinfachtes Verfahren zur Identifizierung von vegetativ-motorischen Funktionen im Schlaf erlaubte es im letzten **Untersuchungsjahr 2013**, eine deutlich höhere Anzahl an Personen zu untersuchen. Zunächst wurden alle Teilnehmer aus 2011 und 2012 mit der Bitte um eine erneute Beteiligung kontaktiert. Von den ursprünglichen Teilnehmern aus 2011 waren 39 Personen (21 weiblich, 18 männlich) bereit, auch an den Messungen in 2013 teilzunehmen. Die verbleibenden drei, bei denen 2012 noch gemessen wurde, nahmen nicht mehr an der Studie teil, weil zwei umgezogen waren und ein Proband kein Interesse mehr hatte. Von den 41 Personen, die 2012 hinzugekommen waren, nahmen 36 im Jahr 2013 erneut teil (23 weiblich, 13 männlich). Fünf der in 2012 angeworbenen Probanden konnten für eine erneute Teilnahme nicht mehr gewonnen werden. Eine Person konnte aus gesundheitlichen Gründen nicht mehr an der Studie teilnehmen, vier meldeten sich trotz mehrmaliger Kontaktaufnahme nicht zurück.

*Tabelle 2-1: Messzeiträume der NORAH-Schlafstudie in den Jahren 2011 - 2013*

Jahr	Messzeitraum
2011	25. Juli - 08. Oktober
2012	21. Mai - 09. November
2013	17. Juni - 28. November

Die neuen Untersuchungsteilnehmer in 2013 wurden mit Unterstützung des Umwelthauses in Zeitungen, dem Hörfunk, Internetseiten von Anliegerkommunen und der NORAH-Homepage angeworben. Wenn die eingegangenen Bewerbungen den für die Studie notwendigen Auswahlkriterien entsprachen (keine Änderungen gegenüber 2011 und 2012), wurde der Eingangs- und Anamnesebogen wie in den Jahren zuvor versandt. Insgesamt wurden 2013 484 Fragebögen versandt, 125 Bewerbern konnte schließlich eine Studienteilnahme zugesagt werden. Mit 13 dieser 125 Bewerber konnte jedoch kein Studientermin vereinbart werden, da ihrerseits keine Rückmeldung erfolgte. Es wurden in 2013 schließlich 112 neue Probanden ausgewählt. Davon waren 49 Männer und 63 Frauen. Alle (alten und neuen) 187 Teilnehmer wurden jeweils 3 Nächte untersucht. Der Messzeitraum im Jahr 2013 erstreckte sich vom 17. Juni bis 28. November. Die Studiengebiete in 2013 umfassten neben den schon in 2011 und 2012 untersuchten Städten Gräfenhausen, Klein-Gerau, Nauheim, Offenbach Süd, Raunheim, Rüsselsheim, Worfelden

und Wixhausen auch Flörsheim, Frankfurt-Süd, Hochheim und Mörfelden (siehe Tabelle 2-1).

Die Baumdiagramme in der Abbildung 2-2 bis Abbildung 2-4 zeigen schematisch die Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlprozesses bzw. in der Datenanalyse in den Jahren 2011-2013.

2011

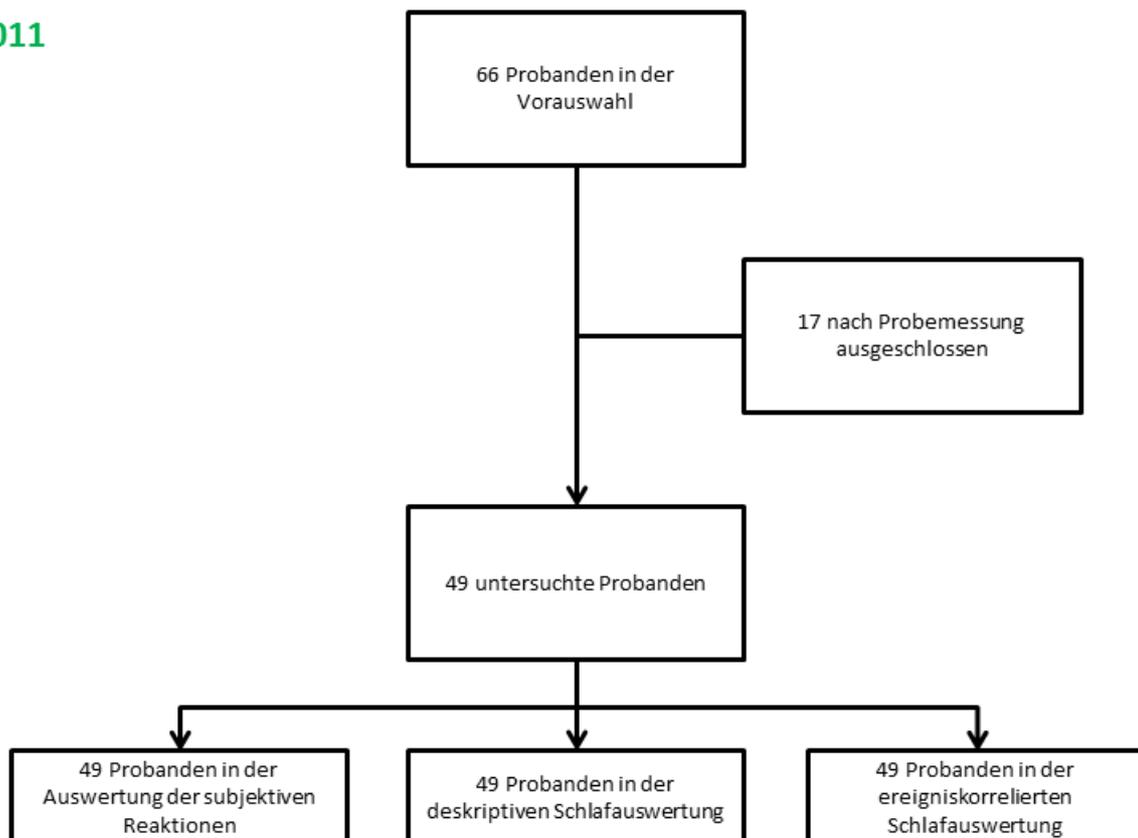


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlverfahrens und der Datenanalyse für das Messjahr 2011.

2012

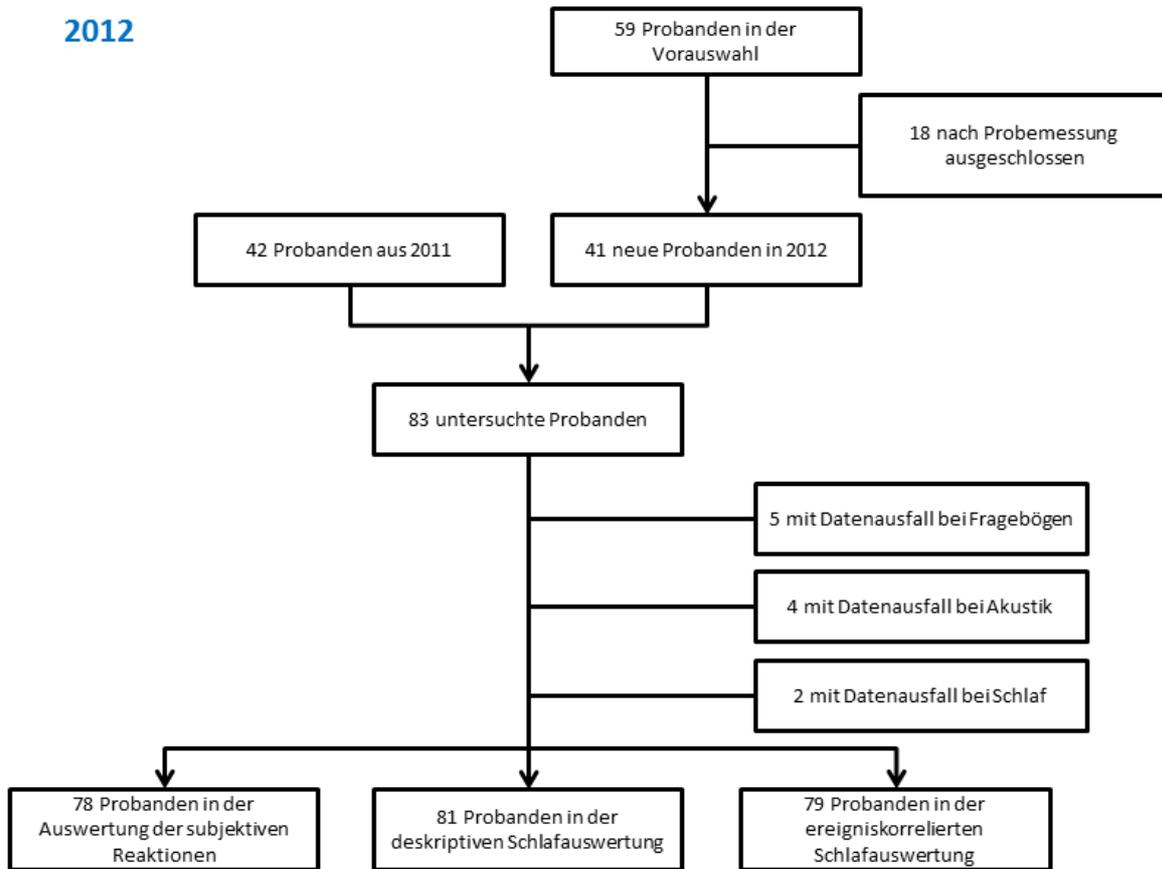


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlverfahrens und der Datenanalyse für das Messjahr 2012. Von den fünf Datenausfällen bei den Fragebögen gingen zwei mit gleichzeitigem Akustikausfall und zwei zusätzliche mit Akustikausfall und Schlafausfall einher.

2013

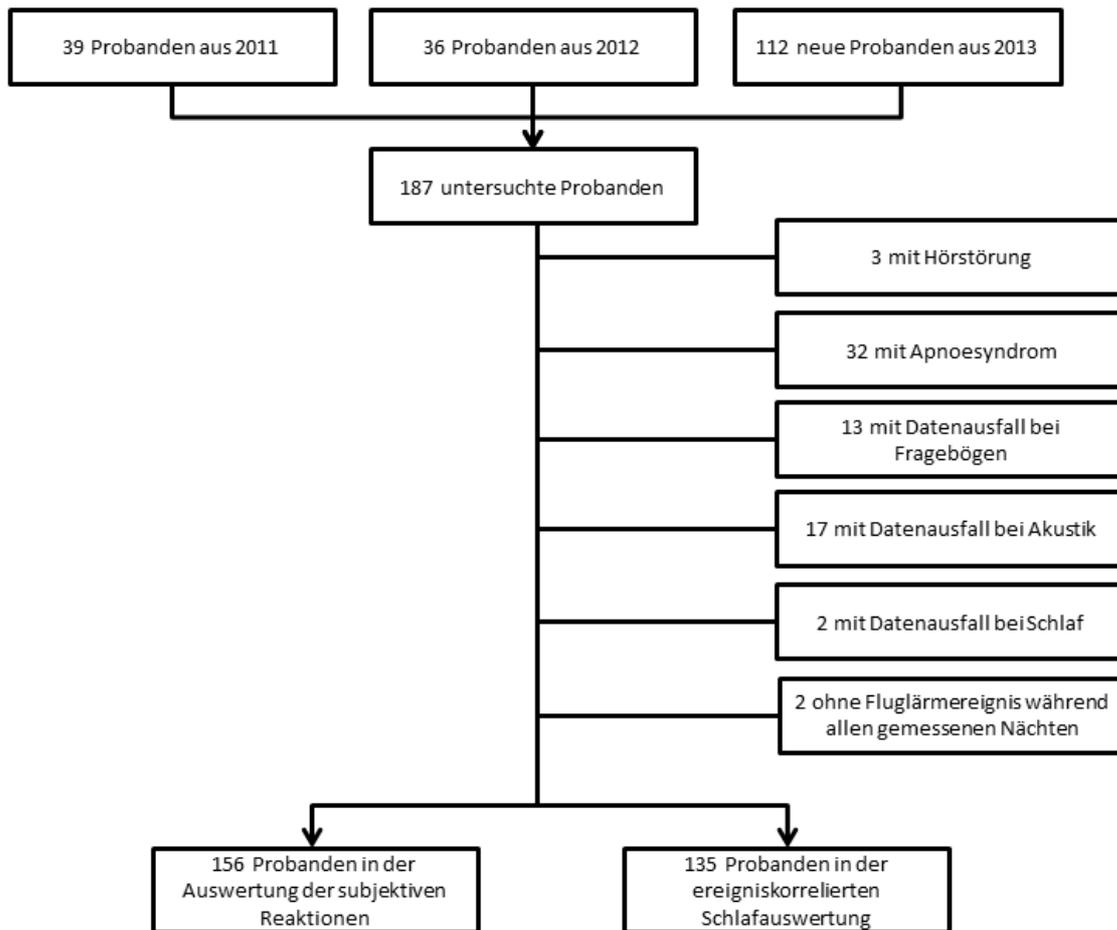


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlverfahrens und der Datenanalyse für das Messjahr 2013. Alle drei Probanden mit Hörstörung litten auch am Apnoesyndrom. Von den 13 Fragebögenausfällen gingen zwei mit gleichzeitigem Akustikausfall einher. Von den 17 Akustikausfällen gingen zusätzlich einer mit Schlafausfall einher. Probanden mit Apnoesyndrom wurden bei der Auswertung der subjektiven Reaktionen nicht ausgeschlossen.

## 2.2 Untersuchungsablauf

In den Untersuchungsjahren 2011 und 2012 war es erforderlich, dass jeden Abend und jeden Morgen Untersucher beim Probanden vor Ort waren, die die für die Polysomnografie notwendigen Elektroden anlegten bzw. beim Entfernen halfen, die Daten sicherten und zur Sichtung ins Studienbüro ins Umwelthaus nach Kelsterbach brachten. Der zeitliche Aufwand am Abend beim Probanden vor Ort betrug ca. 50 min, morgens ca. 25 min. Diese Aufgaben wurden von den geschulten Studierenden des Fachbereichs Medizin der Justus-

Liebig-Universität Gießen vorgenommen. Die tägliche Datensichtung und -sicherung im Umwelthaus zum frühzeitigen Erkennen von möglichen Messgeräteaussfällen wurde von Mitarbeitern des DLR durchgeführt.

Der tägliche Untersuchungsablauf an einer Messstelle ist Abbildung 2-5 zu entnehmen.

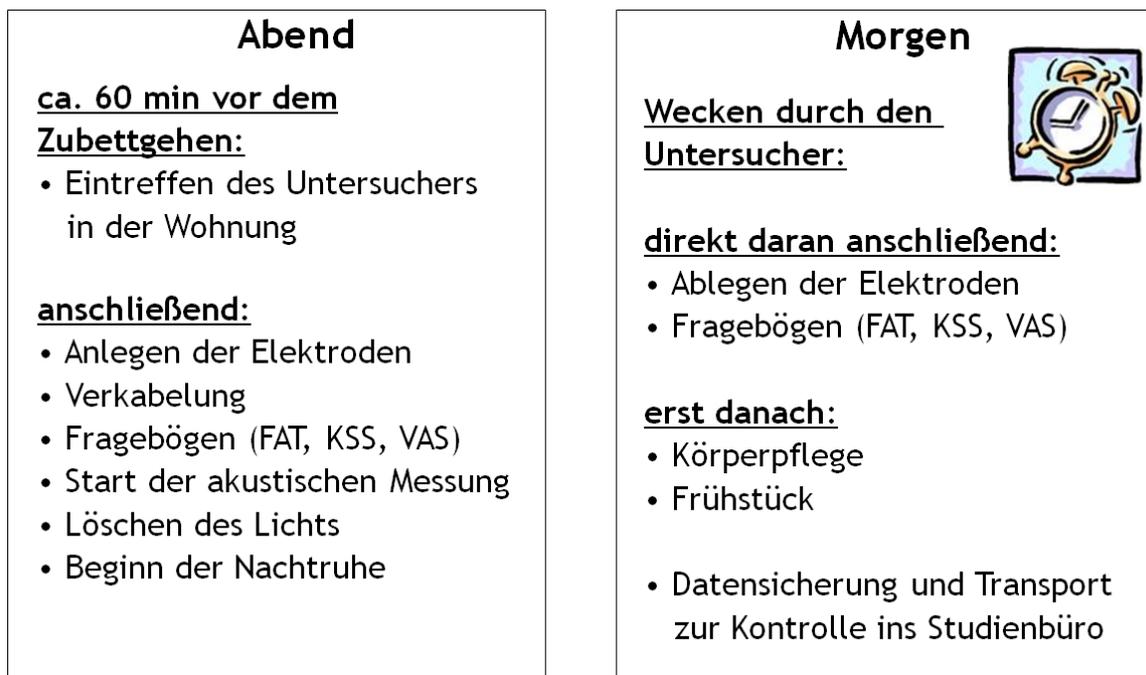


Abbildung 2-5: Täglicher Untersuchungsablauf der Schlafstudie in den Jahren 2011 und 2012

2013 wurden mit der neuen Methodik zur Messung von vegetativ-motorischen Reaktionen dann noch einmal deutlich mehr Probanden als in 2011 und 2012 untersucht. Dabei war es nicht mehr notwendig, dass jeden Abend und jeden Morgen ein Untersucher vor Ort war, da nur noch zwei EKG-Elektroden geklebt und ein Pulsoxymeter zur kontinuierlichen Messung der nächtlichen Sauerstoffsättigung angelegt werden musste, was von den Probanden jeden Abend eigenständig durchgeführt werden konnte. Zu diesem Zweck wurden die Probanden beim Geräteaufbau intensiv geschult. Die akustischen Aufzeichnungen wurden jeden Abend automatisiert gestartet.

Sämtliche Studienphasen in den Jahren 2011 bis 2013 wurden in den Sommer- und frühen Herbstmonaten durchgeführt, in denen das Bedürfnis in der Nacht die Schlafzimmerfenster zu öffnen oder zu kippen besonders groß ist (Tabelle 2-1).

## 2.3 Untersuchte Stichprobe

Die Beschreibung der Stichproben aus der NORAH-Schlafstudie erfolgt jeweils getrennt für die Untersuchungsjahre 2011, 2012 und 2013.

Zur Stichprobenbeschreibung werden klassische soziodemografische Merkmale verwendet, es erfolgt eine Charakterisierung des sozioökonomischen Status der Probanden mit Hilfe des Scheuch-Winkler-Index (Winkler 1998; Winkler & Stolzenberg 1999, 2009). Des Weiteren wird eine Beschreibung der Stichproben mit Hilfe schlafbezogener und fluglärmspezifischer Variablen vorgenommen, deren Erhebung (mit Ausnahme der Fluglärmbelastigung vor Studienbeginn) anhand von Fragebögen nach Abschluss der Studien in den jeweiligen Untersuchungsjahren erfolgte.<sup>4</sup>

### Stichprobengröße und Geschlecht

Insgesamt nahmen von 2011 bis 2013 202 Personen an der Studie teil. 2011 waren es 49 (24 männlich, 25 weiblich), 2012 83 (34 männlich, 49 weiblich) und 2013 187 Probanden (80 männlich, 107 weiblich) (Abbildung 2-6). 39 Probanden wurden dreimal von 2011 bis 2013, 36 Probanden zweimal in den Jahren 2012 und 2013 untersucht, drei Probanden nahmen 2011 und 2012 zweimal teil.

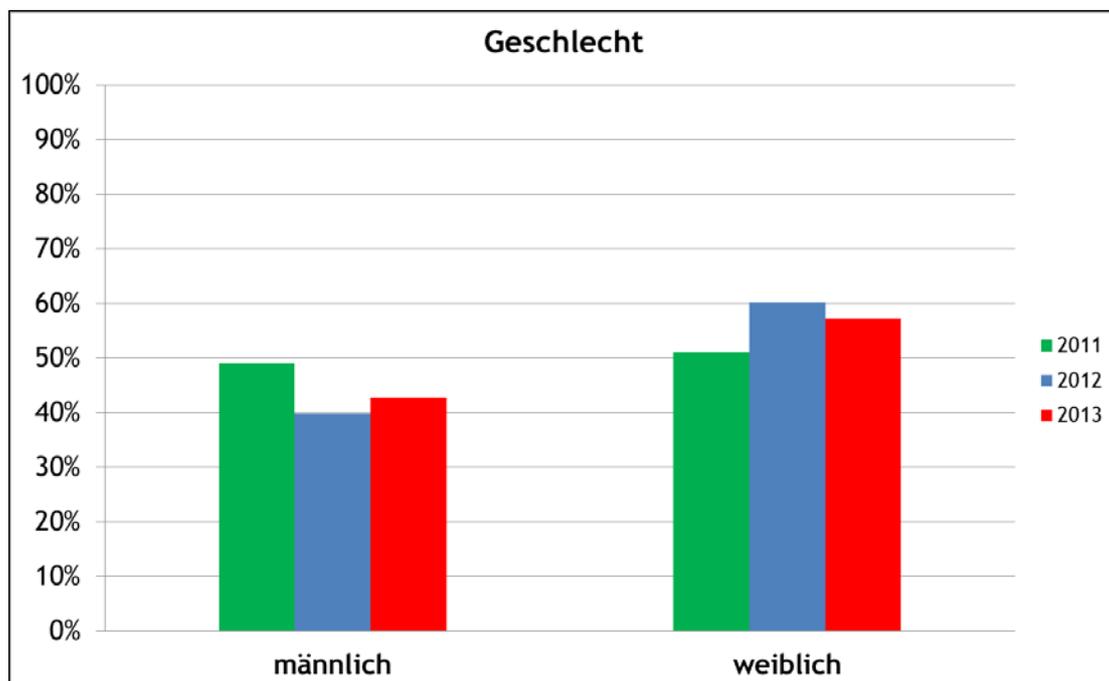


Abbildung 2-6: Verteilung der Geschlechtszugehörigkeit in den Stichproben 2011 (N=49), 2012 (N=83), 2013 (N=187).

<sup>4</sup> Da die Variablen zur Stichprobenbeschreibung fragebogenbasiert erhoben wurden, gibt es teilweise fehlende Werte. Bei fehlenden Werten weicht die Anzahl (N) der Befragten von der Größe der Gesamtstichprobe in den jeweiligen Untersuchungsjahren ab.

## Altersverteilung

Die jüngsten Teilnehmer waren in allen 3 Jahren jeweils 18 Jahre, die ältesten in 2011 76 Jahre, in 2012 77 Jahre und in 2013 78 Jahre. Abbildung 2-7 ist die Verteilung des Alters in Kategorien von 10 Jahren zu entnehmen. Am häufigsten nahmen Personen der Kategorien 20-30 Jahre und 40-50 Jahre teil. Der Mittelwert für 2011 beträgt 44,1 Jahre (Standardabweichung: 16,1), für 2012 ist der Mittelwert 43,0 Jahre (Standardabweichung: 15,1) und für 2013 39,8 Jahre (Standardabweichung: 15,4).

## Anzahl der Personen im Haushalt

In Abbildung 2-8 ist zu erkennen, dass in allen drei Studienjahren etwa ein Drittel der Probanden in Haushalten mit zwei Personen leben. Für 2011 gibt es eine weitere Häufung mit 30 % für Haushalte mit 4 Personen.

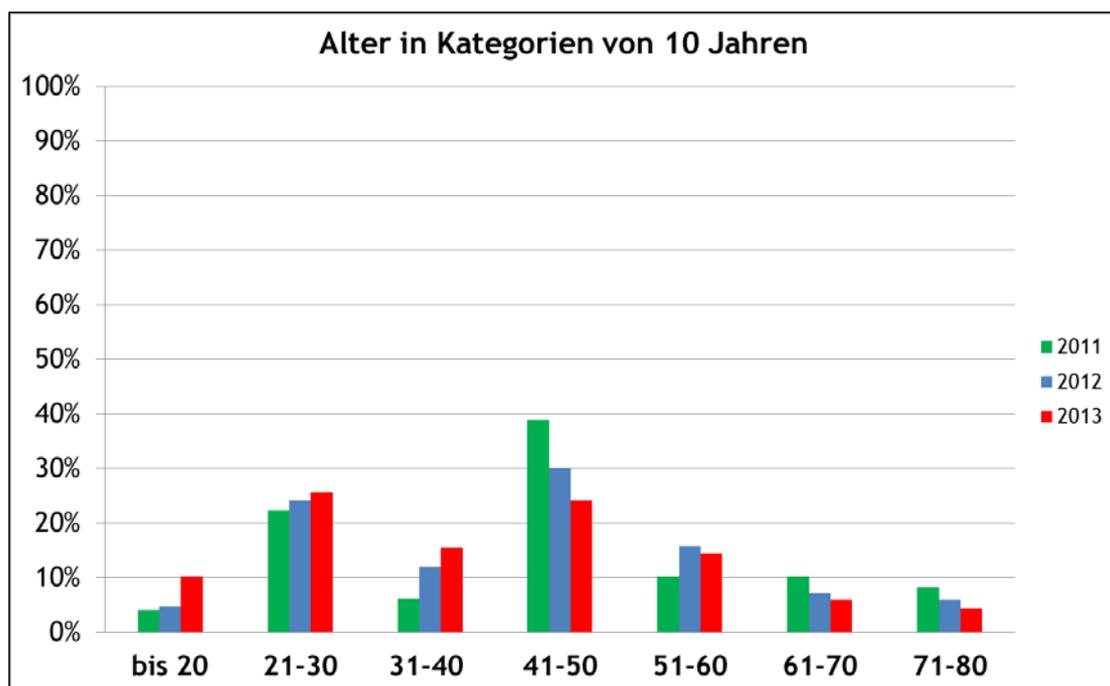


Abbildung 2-7: Verteilung des Alters in Kategorien von 10 Jahren in den Stichproben 2011 (N=49), 2012 (N=83), 2013 (N=187).

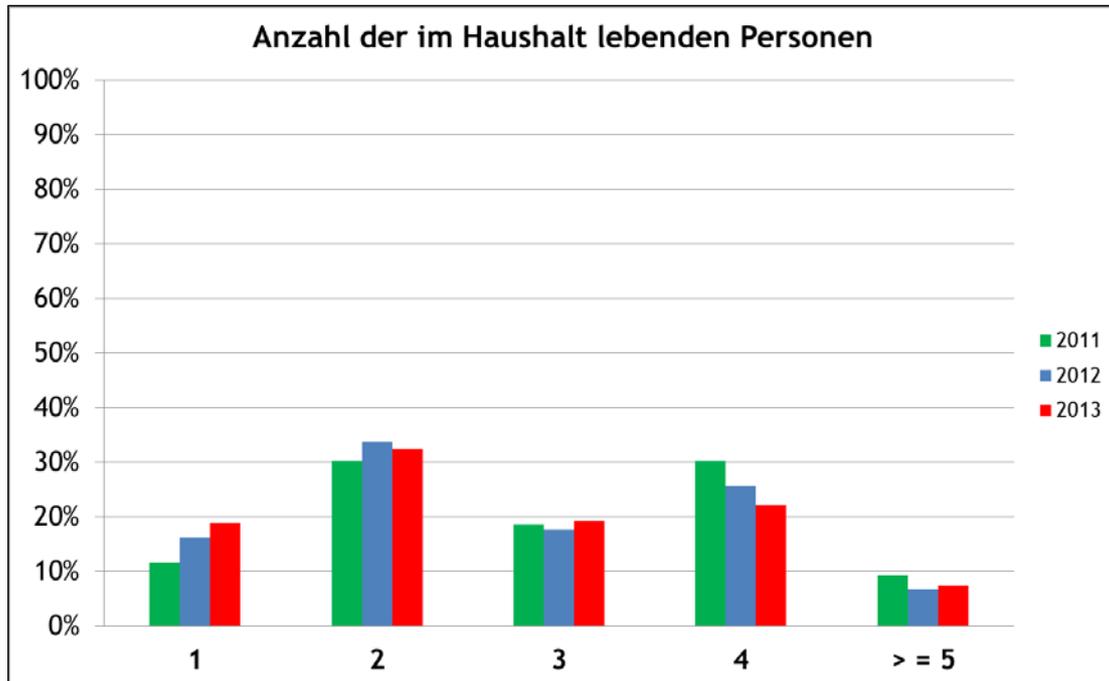


Abbildung 2-8: Anzahl der Personen im Haushalt in den Stichproben 2011 (N=43), 2012 (N=74), 2013 (N=176).

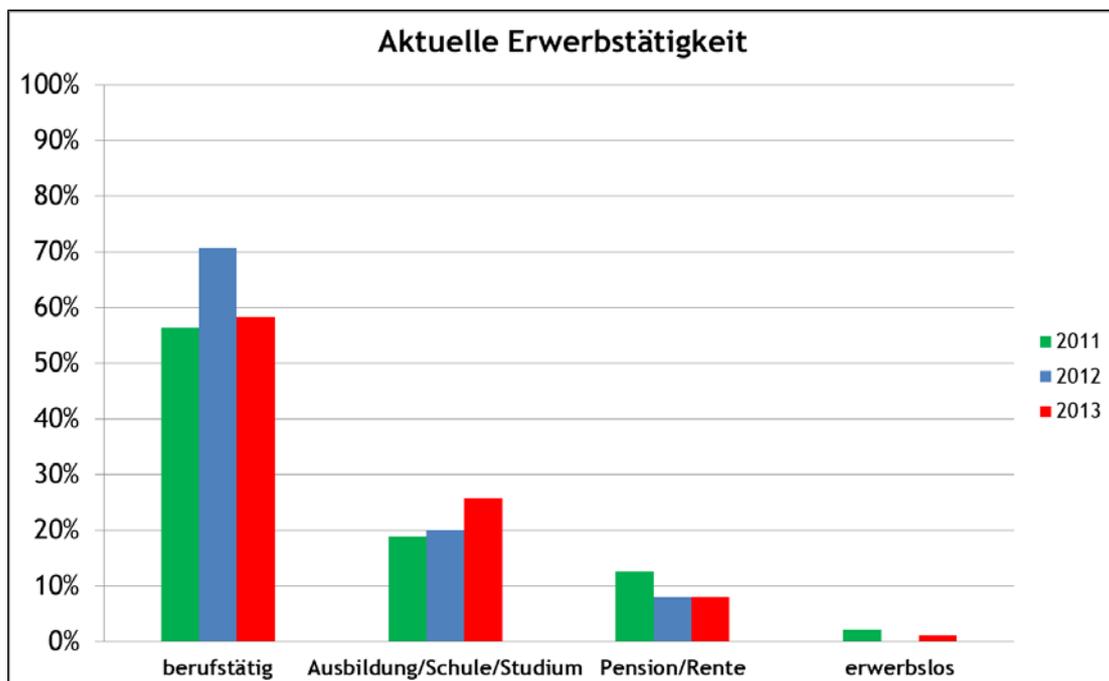


Abbildung 2-9: Erwerbstätigkeit in den Stichproben 2011 (N=48), 2012 (N=75), 2013 (N=187).

## Aktuelle Erwerbstätigkeit

Abbildung 2-9 illustriert, dass in allen drei Jahren weit über die Hälfte der Probanden im Zeitraum der Schlafstudien erwerbstätig sind, ungefähr 19 % bis 26 % befinden sich in einer Ausbildung oder im Studium bzw. besuchen noch die Schule, etwa 10 % sind in Rente oder pensioniert.

## Höchster erreichter Schul- und Ausbildungsabschluss

Die Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 zeigen den höchsten erreichten Schul- und Ausbildungsabschluss der Untersuchungsteilnehmer. In allen drei Jahren hat mehr als die Hälfte der Befragten einen gymnasialen Schulabschluss. Einen Realschul- oder einen Hauptschulabschluss haben um die 40 % erreicht, 2011 liegt der Anteil bei knapp 60 %. Wie Abbildung 2-11 zu entnehmen ist, haben etwa 32 % bis 40 % eine beruflich-betriebliche Lehre absolviert, etwa die Hälfte der Probanden besitzt einen Hochschul- bzw. Fachhochschulabschluss.

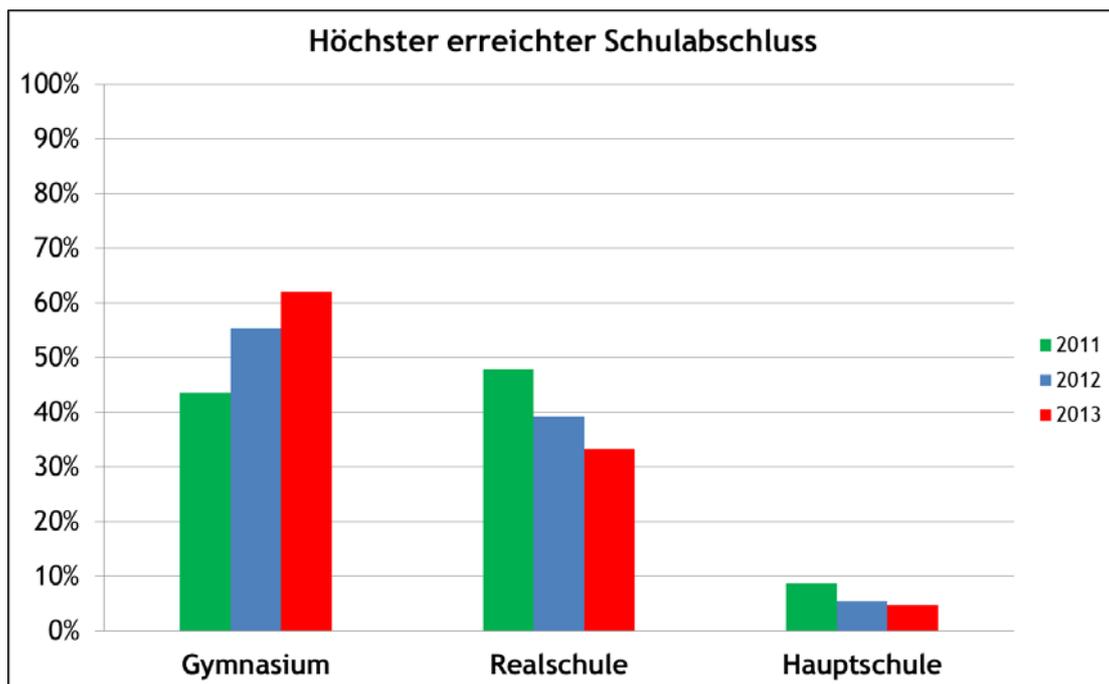


Abbildung 2-10: Höchster erreichter Schulabschluss in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=74), 2013 (N=187).

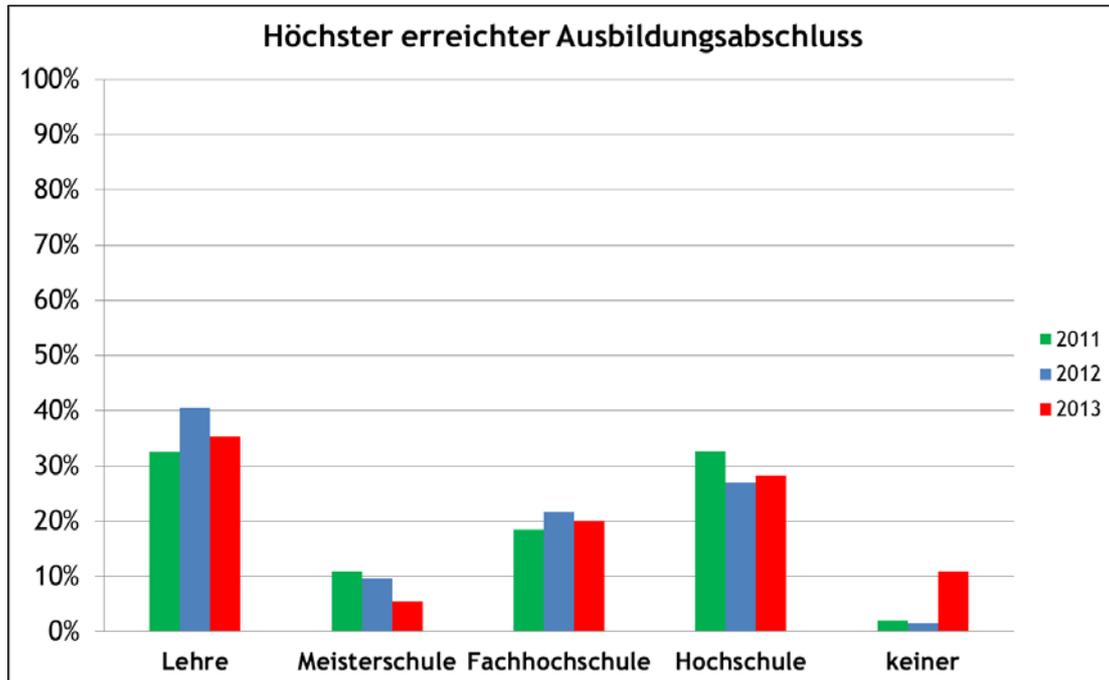


Abbildung 2-11: Höchster erreichter Ausbildungsabschluss in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=74), 2013 (N=184).

### Monatliches Haushaltsnettoeinkommen

Das monatliche Haushaltsnettoeinkommen wurde in fünf Kategorien ermittelt. Die unterste Kategorie ist „bis 1000 Euro“, die oberste Kategorie ist „über 4000 Euro“. Die Maxima in der Verteilung (d.h. 23 % - 27 %) des monatlichen Gesamtnettoeinkommens liegen in den drei Einkommenskategorien ab 3000 Euro (Abbildung 2-12).

### Haus- und Wohnungstyp

Abbildung 2-13 zeigt, dass in allen drei Studienjahren etwa je ein Drittel der untersuchten Probanden in einem freistehenden Einfamilienhaus, einem Reihenhaus oder einem Mehrfamilienhaus mit maximal 6 Wohnungen wohnt. 2013 beträgt der Anteil der Personen, die in einem Wohnblock mit mehr als sieben Wohneinheiten leben 16 %; in Reihenhäusern leben 2 %.

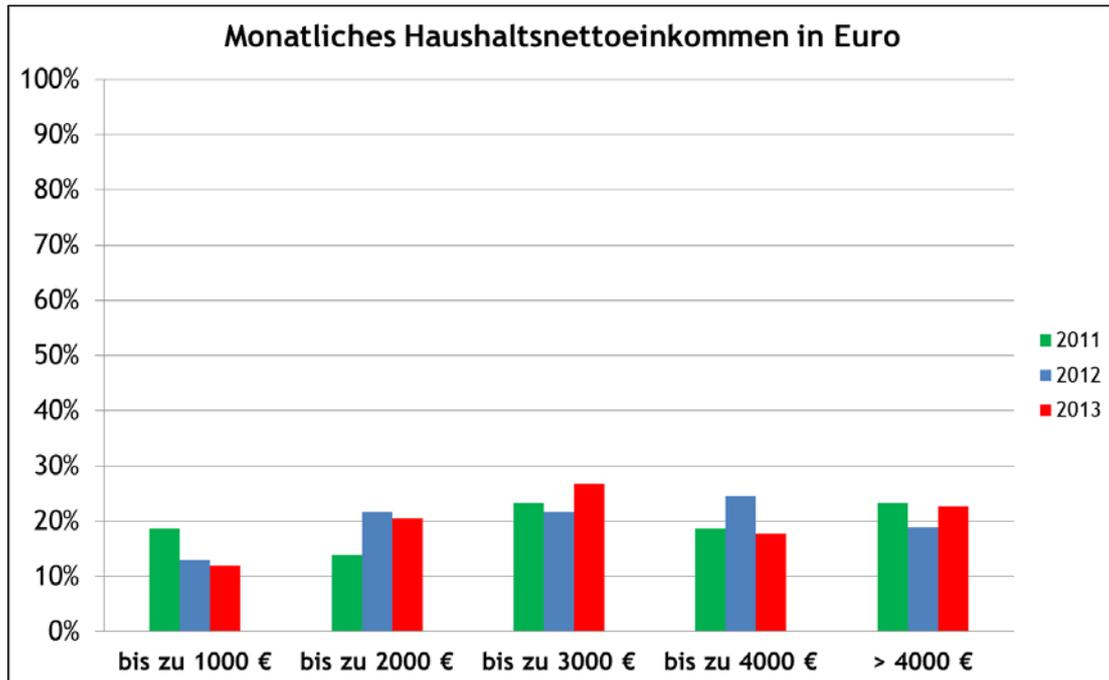


Abbildung 2-12: Monatliches Haushaltsnettoeinkommen in den Stichproben 2011 (N=43), 2012 (N=69), 2013 (N=176).

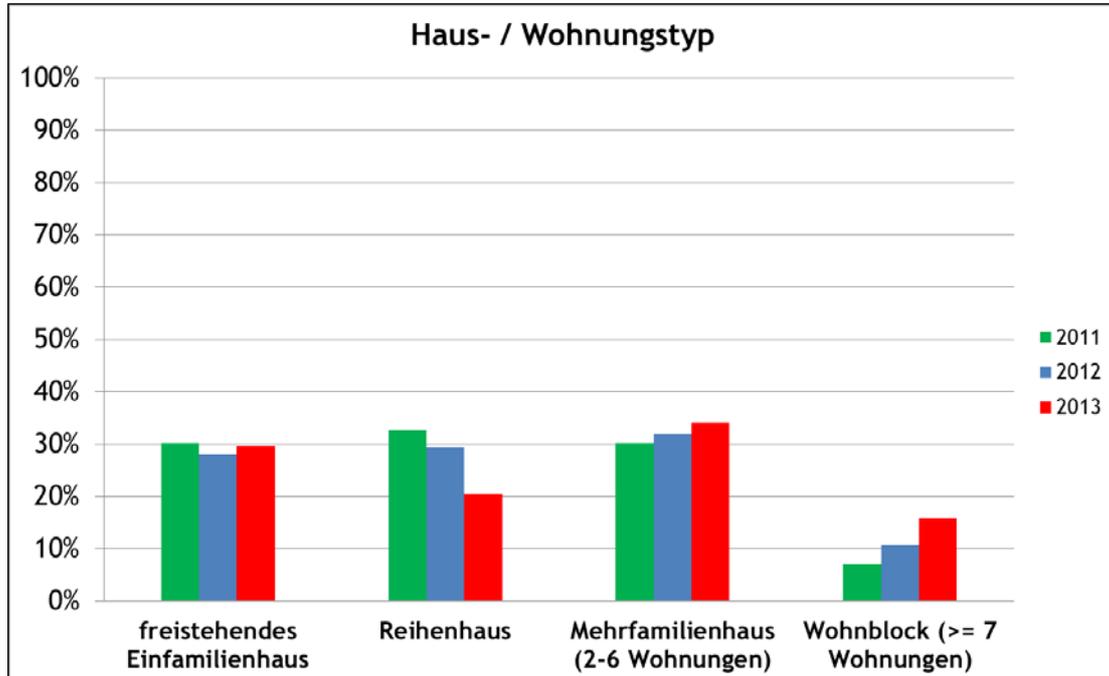


Abbildung 2-13: Haus-/Wohnungstyp in den Stichproben 2011 (N=43), 2012 (N=75), 2013 (N=176).

## Präferierte Partei

Allen Untersuchten wurde nach Abschluss der Schlafstudie die Frage gestellt: "Wenn am Sonntag Bundestagswahl wäre, welche Partei würden Sie am ehesten wählen?" Abbildung 2-14 zeigt, dass in jedem Studienjahr etwa jeweils ein Drittel der untersuchten Personen die CDU bzw. die Grünen wählen würde, 2013 beträgt der Anteil der grünen Wähler etwa 22 %. Circa 17 % der Probanden würden die SPD wählen. Im Jahr 2011 ließen 14 % der Untersuchten diese Frage unbeantwortet, 2012 19 % und 2013 nur 7 %. Die Kategorie „Nichtwähler“ wurde bei dieser Frage nicht angeboten.

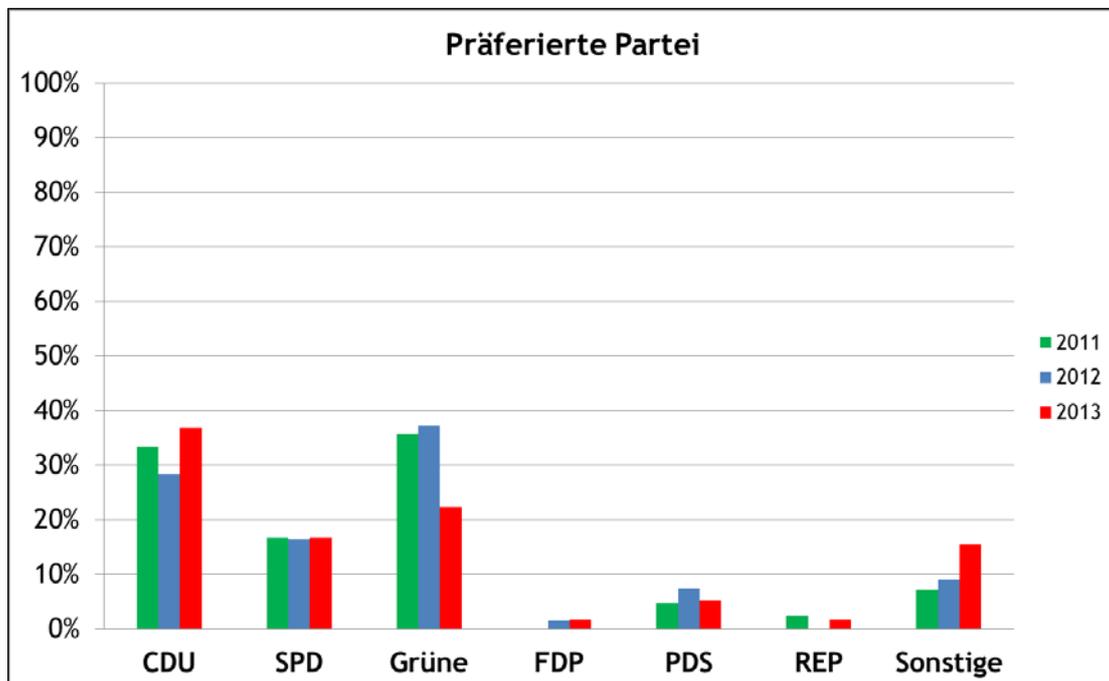


Abbildung 2-14: Präferierte Partei in den Stichproben 2011 (N=42), 2012 (N=67), 2013 (N=174). Versehentlich wurde im Fragebogen die Antwortkategorie „PDS“ anstatt „Die Linke“ vorgegeben.

## Schichtzugehörigkeit (Scheuch-Winkler-Index)

Eine der wichtigsten soziodemografischen Variablen in epidemiologischen und sozialwissenschaftlichen Studien ist die Schichtzugehörigkeit. Ein für Deutschland anwendbarer und validierter Index zur Beschreibung der Schichtzugehörigkeit ist der Scheuch-Winkler-Index, der aufgrund einer Zusammenfassung von Einzelvariablen eine hohe forschungsökonomische Anwendbarkeit bei gleichzeitig hoher Erklärungskraft erlaubt (Winkler 1998; Winkler & Stolzenberg 1999, 2009). Die zentralen Dimensionen im Scheuch-

Winkler-Index werden über die Merkmale<sup>5</sup> Haushaltsnettoeinkommen, schulische/berufliche Bildung und berufliche Stellung abgebildet, die je mit gleichem Gewicht in den Index additiv eingehen, d.h. wenn für eine Person alle drei Werte vorliegen, ergibt die Summe den Index-Wert. Der Wertebereich für den Index liegt demnach zwischen 3 und 21. Wenn für eine Variable ein Wert fehlt, wird dieser geschätzt. Üblicherweise weist das Nettoeinkommen den größten Datenausfall auf. Für einen fehlenden Wert wird das arithmetische Mittel der anderen beiden Variablen verwendet. Für Personen, bei denen zwei Werte fehlen, erfolgt keine Schätzung.

Nach dem von Winkler (1998; Winkler & Stolzenberg 2009) vorgeschlagenen Drei-Schicht-Modell gelten folgende numerischen Schichtgrenzen<sup>6</sup>:

- Unterschicht: 3-8
- Mittelschicht: 9-14
- Oberschicht: 15-21

Die Festlegung dieser Schichtgrenzen erfolgt nach einer mathematischen Regel, so dass jede Schicht eine annähernd gleiche Anzahl von Schicht-Index-Werten umfasst.

<sup>5</sup>Beim **Haushaltsnettoeinkommen** wird das Nettoeinkommen aller im Haushalt lebenden Personen nach Abzug der Steuern und Sozialabgaben berücksichtigt. Für den Index wird diese Variable in sieben Kategorien ermittelt. Die unterste Kategorie ist „bis 1250 Euro“, die oberste Kategorie ist „über 5000 Euro“ (Lampert & Kroll 2009). Die im ursprünglichen Index vorgesehene gleich große Skalenbreite von „1000 DM“ (Winkler 1998) konnte bei der Überführung in den Euro nicht beibehalten werden, da dies eine Erhöhung der Anzahl der Kategorien bedeutet hätte, was bei der Indexbildung zu einer stärkeren Gewichtung der Variable geführt hätte (Winkler & Stolzenberg 1999).

Das Merkmal **Bildung** wird über die zwei Variablen „höchster erreichter Schulabschluss“ und „höchste abgeschlossene Berufs- bzw. Hochschulbildung“ erhoben. Der Schulabschluss wird differenziert in den Abstufungen „Hauptschulabschluss/Volksschulabschluss“, „Realschulabschluss/mittlere Reife“, „Fachhochschulreife/Fachoberschule“, „Abitur/Erweiterte Oberschule (EOS)“, „Polytechnische Oberschule der DDR mit Abschluss der 8./9. bzw. 10. Klasse“, „anderer Schulabschluss“ und „noch kein oder gar kein Schulabschluss“. Der Ausbildungsstatus wird nach Winkler und Stolzenberg (2009) folgenden Kategorien zugeordnet: „keine Ausbildung“, „noch in beruflicher Ausbildung“ (Auszubildender, Student, Praktikant), „beruflich-betriebliche bzw. beruflich-schulische Ausbildung bzw. Lehre abgeschlossen“, „Fachschule/Ingenieurschule/Technikerschule“, „Fachhochschule“, „Hochschule/Universität“. Die Schul- und Ausbildungskategorien werden kombiniert und je nach Kombination mit einem Wert zwischen 1 und 7 versehen.

Die **berufliche Stellung** wird für den Hauptverdiener in einem Haushalt erfasst (Winkler 1998; Winkler & Stolzenberg 1999). Die Variable wird über die vier Gruppen „Arbeiter“, „Angestellter“, „Beamter“ und „Selbständiger (einschließlich mithelfender Familienangehöriger)“ erhoben. Innerhalb dieser Gruppen wird die „berufliche Stellung“ weiter untergliedert: die Arbeiter nach Ausbildungsgrad, die Angestellten nach Qualifikation, die Beamten nach Dienstebene und die Selbständigen nach der Anzahl der Mitarbeiter. Dahinter steht letztlich eine Klassifikation nach dem Einkommen: für die Arbeiter nach Lohngruppen, für die Angestellten nach Gehaltsklassen, für die Beamten nach Besoldungsstufen und für die Selbständigen nach Einkommen. Es werden insgesamt sieben Kategorien mit Werten zwischen 1 und 7 gebildet.

<sup>6</sup>Die Begriffe „Unterschicht“, „Mittelschicht“ und „Oberschicht“ werden hier völlig wertfrei zur Stichprobenbeschreibung verwendet, ohne dabei bestimmte Bevölkerungsgruppen diskriminieren zu wollen.

Um den Scheuch-Winkler-Index genau berechnen zu können, müssen die Daten in einem bestimmten Format mit genau definierten Antwortkategorien vorliegen. Da nicht alle für die Berechnung des Index erforderlichen Daten mit Abschluss der NORAH-Schlafstudien im Jahr 2013 vorlagen, wurden im Juli 2014 alle 202 Probanden angeschrieben mit der Bitte zur Teilnahme an einer Fragebogenkampagne. Dabei wurden verschiedene soziodemografische Variablen (z.B. Familienstand, Anzahl Personen im Haushalt, Schulbildung, Berufsausbildung, Erwerbstätigkeit, berufliche Position, Haushaltseinkommen) in dem für den Index erforderlichen Antwortformat erhoben. 150 Probanden schickten ihren Fragebogen zurück (74 % Rücklaufquote), 9 Probanden waren unbekannt verzogen (4 %), 43 Probanden (21 %) meldeten sich nicht zurück.

Abbildung 2-15 illustriert die prozentuale Verteilung der Schichtzugehörigkeit berechnet nach dem Scheuch-Winkler-Index. Der Anteil der Probanden aus der „Unterschicht“ liegt mit Ausnahme von 2011 bei unter 10 %. Zwischen 39 % und 44 % gehören der „Mittelschicht“ und zwischen 47 % und 49 % der „Oberschicht“ an.

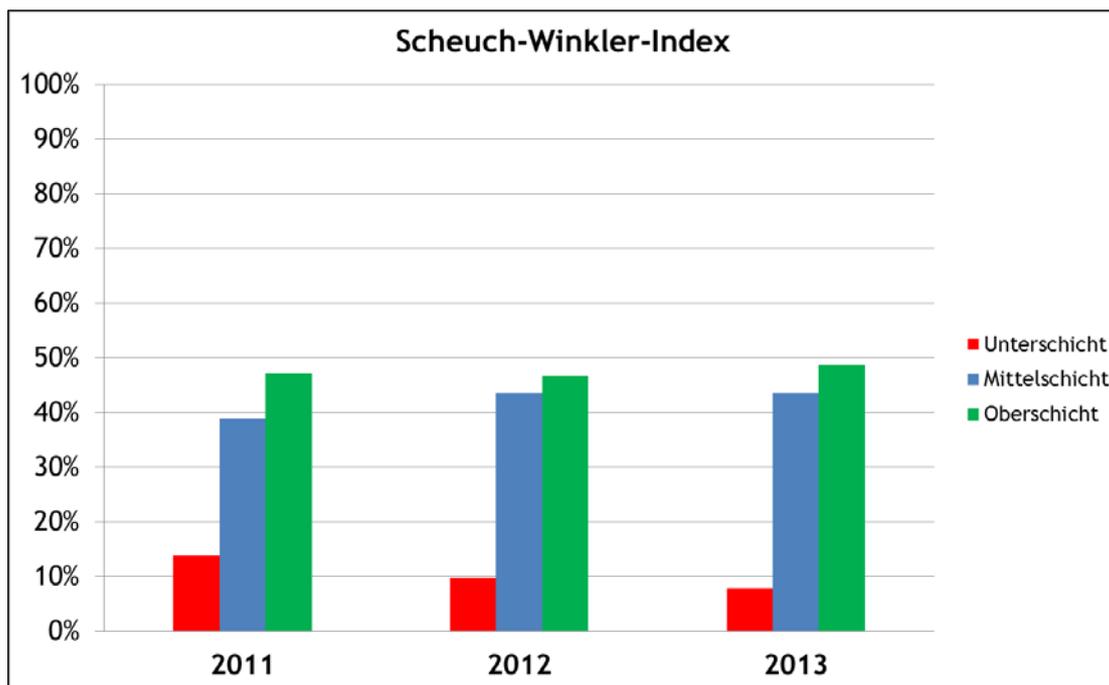


Abbildung 2-15: Verteilung der Schichtzugehörigkeit nach dem Scheuch-Winkler-Index in den Stichproben 2011 (N=36), 2012 (N=62), 2013 (N=140).

## Chronotyp

Der Chronotyp beschreibt die individuelle zirkadiane Phasenlage. Es handelt sich um ein normal verteiltes Merkmal, dessen extreme Ausprägungen als Morgen- und Abendtyp bezeichnet werden (Griefahn et al. 2001; Griefahn 2002). Abbildung 2-16 ist zu entnehmen, dass fast die Hälfte des untersuchten Probandenkollektivs weder dem Morgen- noch dem Abendtyp eindeutig zuzuordnen ist („neutral“). Zwischen 11 % und 23 % sind in die Kategorie des ausgeprägten Morgentyps einzuordnen. 23 % bis 35 % gehören der Kategorie des moderaten Morgentyps an. Bei weniger als 6 % der Probanden entspricht die individuelle Phasenlage dem eines moderaten Abendtyps. Die Kategorie des ausgeprägten Abendtyps ist nicht besetzt, was vermutlich dem Untersuchungsdesign geschuldet ist, da die Probanden spätestens um 23:30 Uhr zu Bett gehen mussten.

## Subjektive Lärmempfindlichkeit

In allen Untersuchungsjahren sollten die Probanden ihre subjektive Lärmempfindlichkeit auf einer 5-stufigen Antwortskala (1 = nicht bis 5 = sehr empfindlich gegenüber Lärm) nach Abschluss der Schlafstudie einschätzen. Abbildung 2-17 illustriert, dass über 50 % der Probanden ihre eigene Lärmempfindlichkeit als mittelmäßig einstufen. Ungefähr je 20 % sind „wenig“ (2012: 25 %) bzw. „ziemlich“ lärmempfindlich.

## Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs in der Wohngegend

Alle Teilnehmer wurden danach befragt, wie zufrieden sie in ihrer Wohngegend mit der Lautstärke des Flugverkehrs sind. Die Beantwortung erfolgte mit einer 5-stufigen Skala (1 = nicht bis 5 = sehr zufrieden). Laut Abbildung 2-18 sind etwa zwei Drittel mit der Lautstärke in ihrem Wohnumfeld „nicht“ bzw. „wenig“ zufrieden, um die 20 % sind „mittelmäßig“ zufrieden.

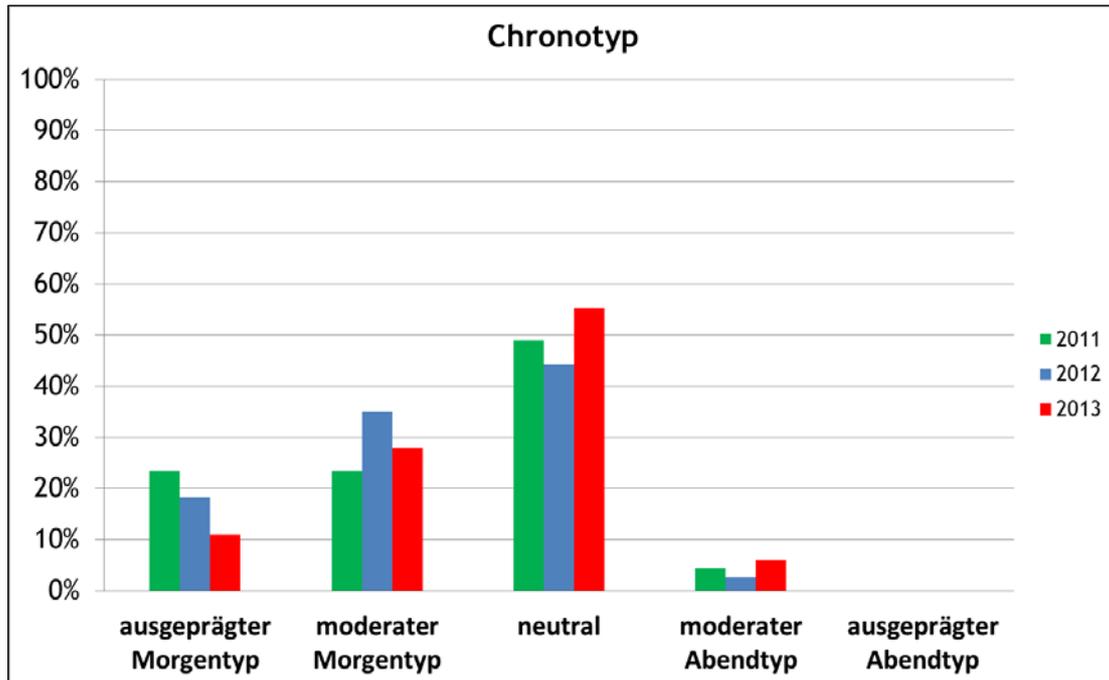


Abbildung 2-16: Chronotyp in den Stichproben 2011 (N=47), 2012 (N=77), 2013 (N=183).

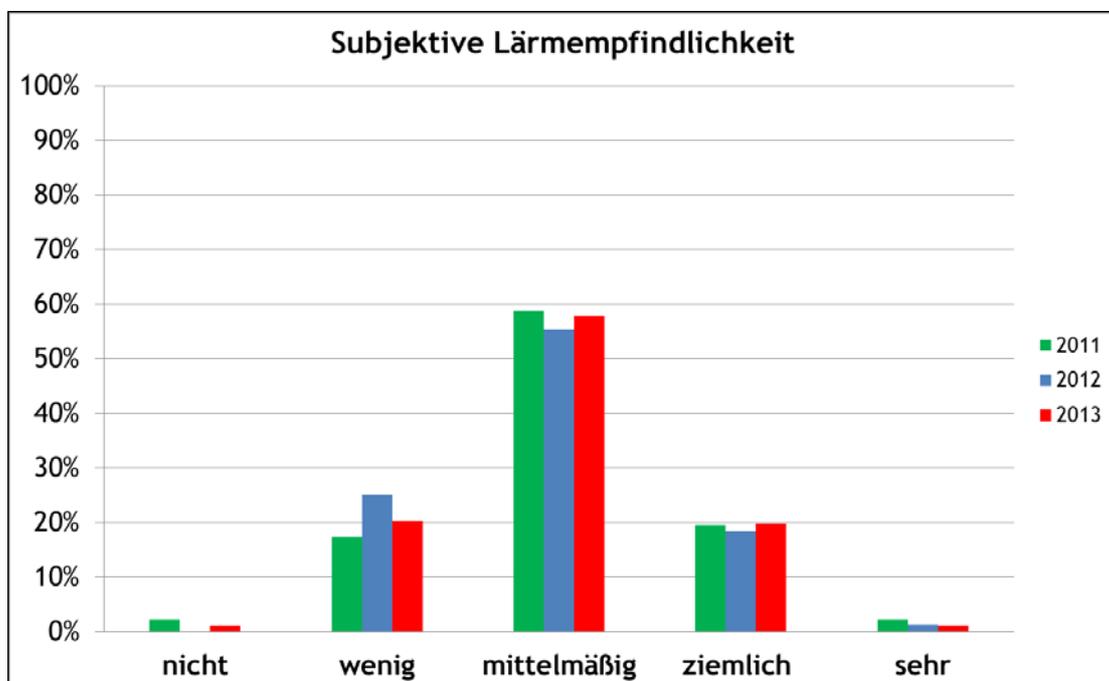


Abbildung 2-17: Subjektive Lärmempfindlichkeit in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=76), 2013 (N=187).

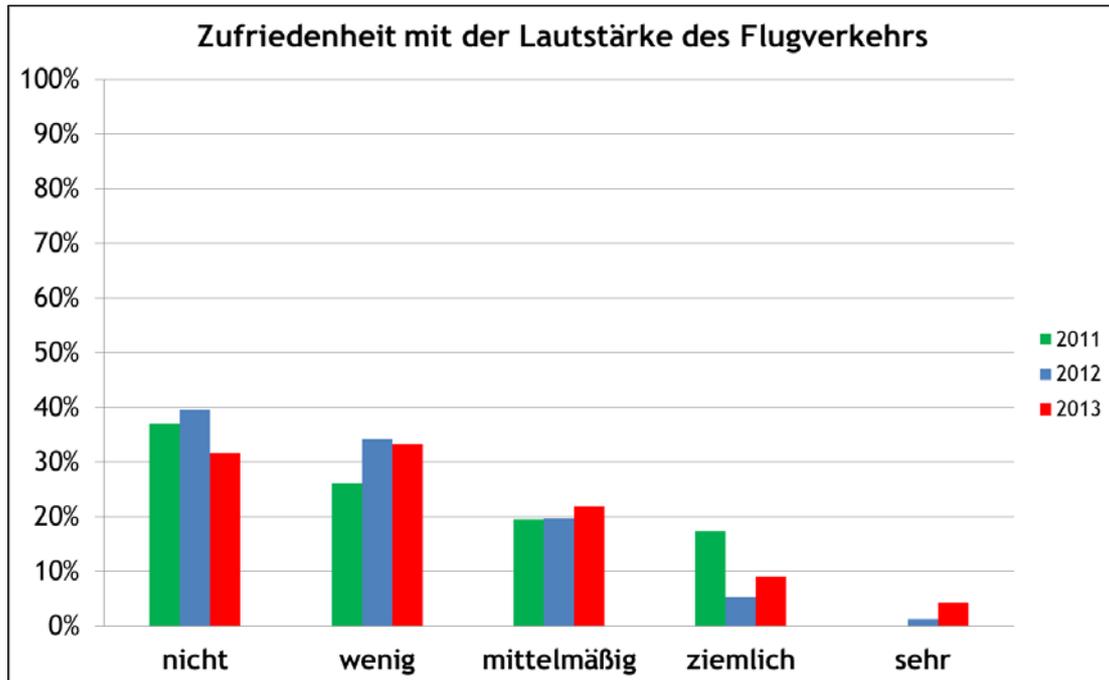


Abbildung 2-18: Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs in den Jahren 2011 (N=46), 2012 (N=76), 2013 (N=187).

### Belästigung durch Fluglärm vor Studienbeginn

Abbildung 2-19 zeigt die eingeschätzte Belästigung durch Fluglärm vor Beginn der NORAH-Schlafstudien. Die Probanden sollten den generellen Grad ihrer Fluglärmelastung im Sinne einer Langzeitbelastung auf einer 5-stufigen Skala (1 = nicht bis 5 = sehr belästigt) einschätzen. Dabei wurden die Empfehlungen zur Lärmelastungsmessung der IC BEN (International Commission on Biological Effects of Noise) berücksichtigt (Felscher-Suhr et al. 2000; Fields et al. 2001). Im Jahr 2011 sind vor den Studien 80 % und 2012 85 % der Befragten „nicht“ bzw. „wenig“ belästigt durch Fluglärm, 2013 sind dies 16 %. 20 % sind 2011 „mittelmäßig“ belästigt, die oberen beiden Kategorien („ziemlich“ und „sehr“ belästigt) werden 2011 nicht vergeben. Im Jahr 2012 sind 10 % vor Untersuchungsbeginn „mittelmäßig“ belästigt, weitere 5 % „ziemlich“ und „sehr“ belästigt. 2013 liegt hingegen eine andere Verteilung zugunsten der oberen beiden Kategorien „ziemlich“ und „sehr“ belästigt vor, die zusammen etwa 61 % der Antworten ausmachen.

### Subjektive Gewöhnung an Fluglärm

Alle Untersuchten sollten ihren individuellen Gewöhnungsgrad an Fluglärm auf einer 5-stufigen Skala (1 = nicht bis 5 = sehr gewöhnt) angeben. Gemäß Abbildung 2-20 sind etwa 45 % „nicht“ bzw. „wenig“ an Fluglärm gewöhnt, weitere 35 % haben einen mittleren Grad der Fluglärmgewöhnung (2013: 31 %).

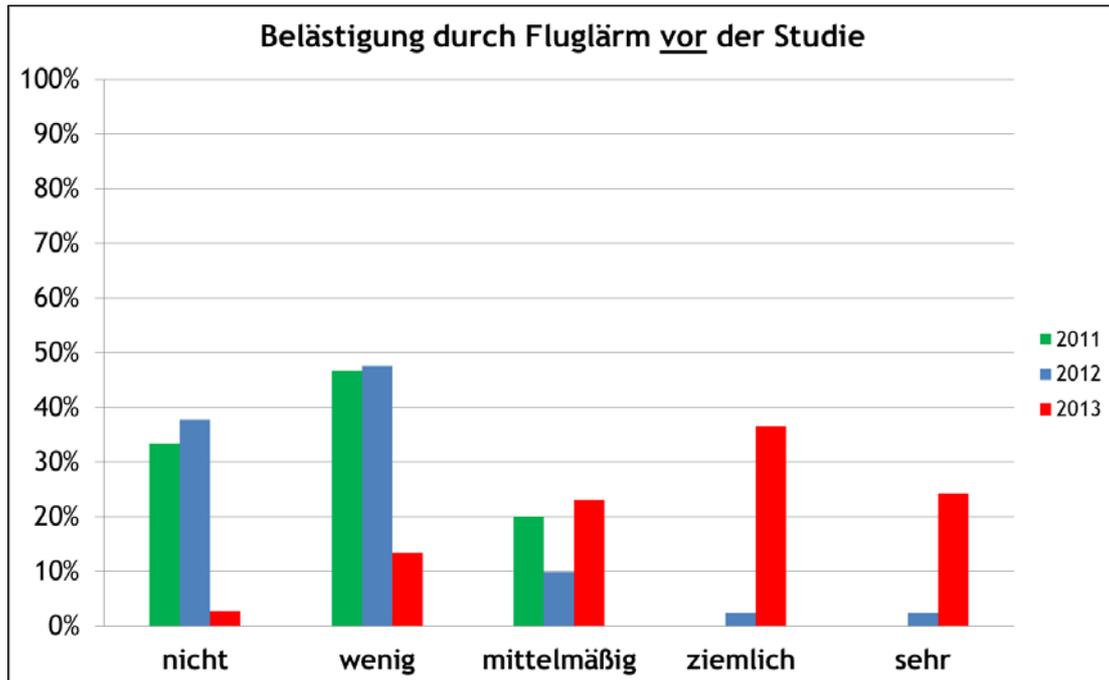


Abbildung 2-19: Prozentuale Verteilung der allgemeinen Fluglärmbelästigung vor Beginn der Schlafstudie in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie stark werden Sie belästigt durch Fluglärm?“).

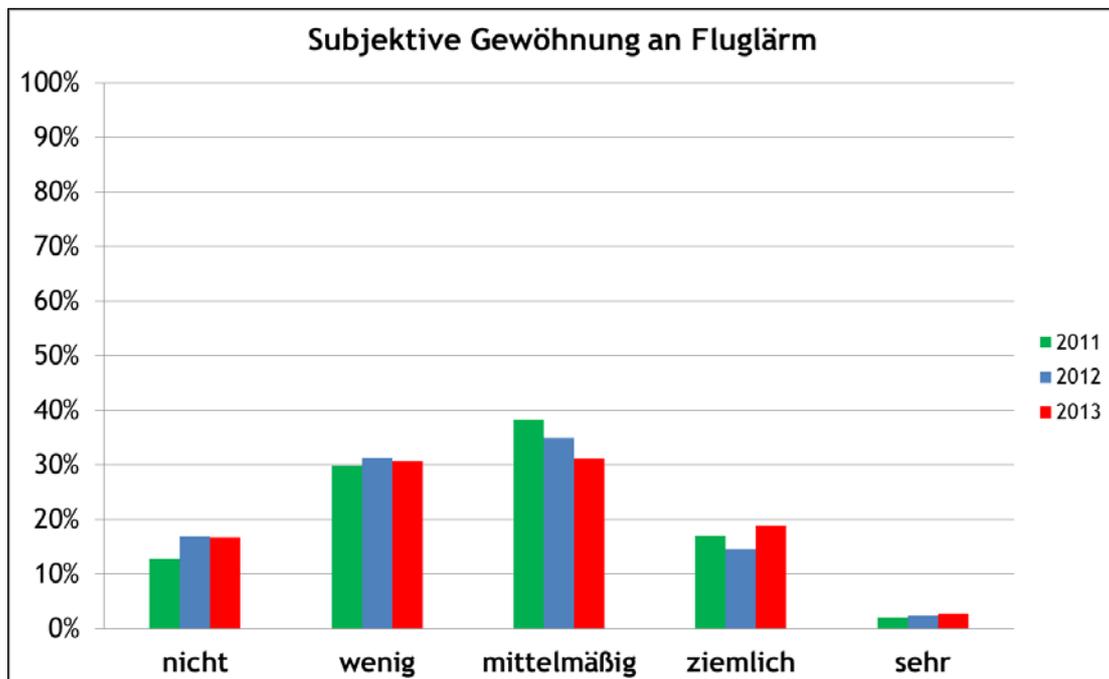


Abbildung 2-20: Gewöhnung an Fluglärm in den Stichproben 2011 (N=47), 2012 (N=83), 2013 (N=186).

## Subjektive Einstellung zum Flugverkehr

Den Probanden wurde nach den Studien die Frage gestellt, wie sie dem Flugverkehr insgesamt gegenüberstehen. Die Beantwortung erfolgte mit Hilfe einer 5-stufigen Skala (1 = negativ bis 5 = positiv). Die Mehrheit der Befragten nimmt in allen drei Jahren eine neutrale Position gegenüber dem Flugverkehr ein (26 % - 35 %). Ungefähr 17 % bis 25 % sind dem Flugverkehr gegenüber „eher negativ“ bzw. „eher positiv“ eingestellt (Abbildung 2-21).

## Chancen etwas erfolgreich gegen Fluglärm zu unternehmen

Allen Untersuchten wurde die Frage gestellt: „Wie gut sind Ihrer Meinung nach insgesamt die Chancen, erfolgreich etwas gegen Fluglärm zu unternehmen?“ Die Beantwortung der Frage erfolgte anhand einer 5-stufigen Skala (1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut). Abbildung 2-22 zeigt, dass über die Hälfte der Befragten die Chancen als „sehr schlecht“ bzw. „schlecht“ einschätzen, etwa 30 % als „mittelmäßig“ (2013: 38 %). Die oberste Kategorie („sehr gut“) wurde nicht genannt.

## Teilnahme an Aktivitäten gegen Fluglärm

Die Probanden wurden danach gefragt, ob sie sich schon einmal in irgendeiner Form an Aktivitäten gegen Fluglärm beteiligt haben. Etwa 60 % der Probanden beantworteten diese Frage mit „nein“ (2013: 68 %), ungefähr 40 % haben sich bereits aktiv an Aktionen gegen Fluglärm beteiligt (2013: 32 %) (Abbildung 2-23).

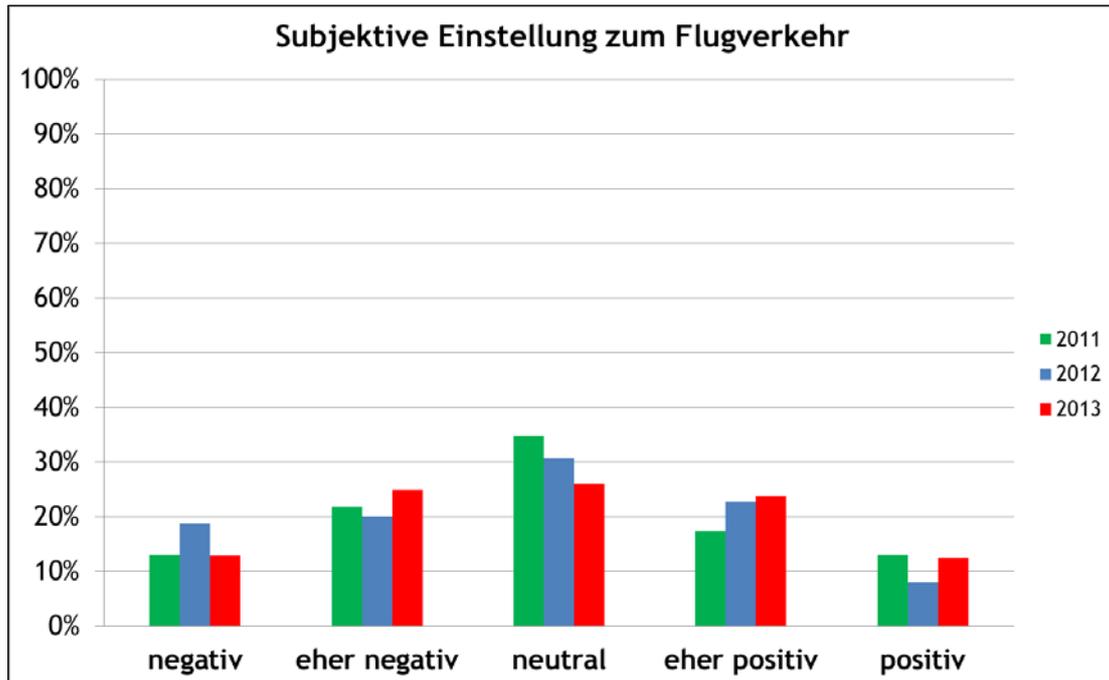


Abbildung 2-21: Subjektive Einstellung zum Flugverkehr in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=75), 2013 (N=185).

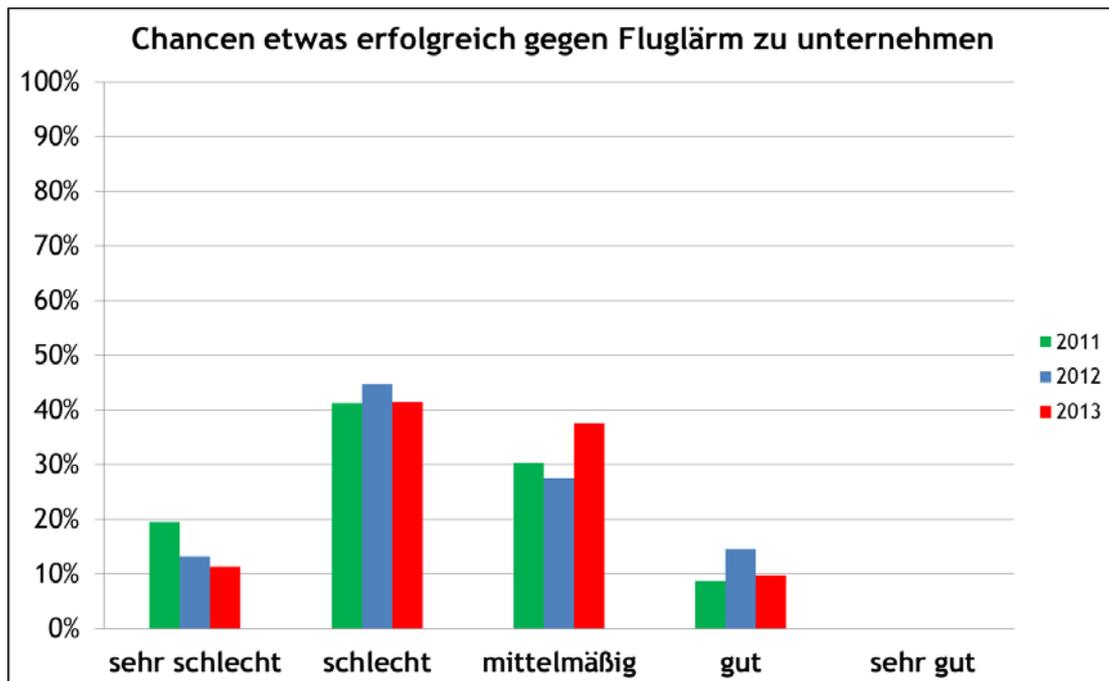


Abbildung 2-22: Eingestufte Chancen etwas erfolgreich gegen Fluglärm zu unternehmen in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=76), 2013 (N=185).

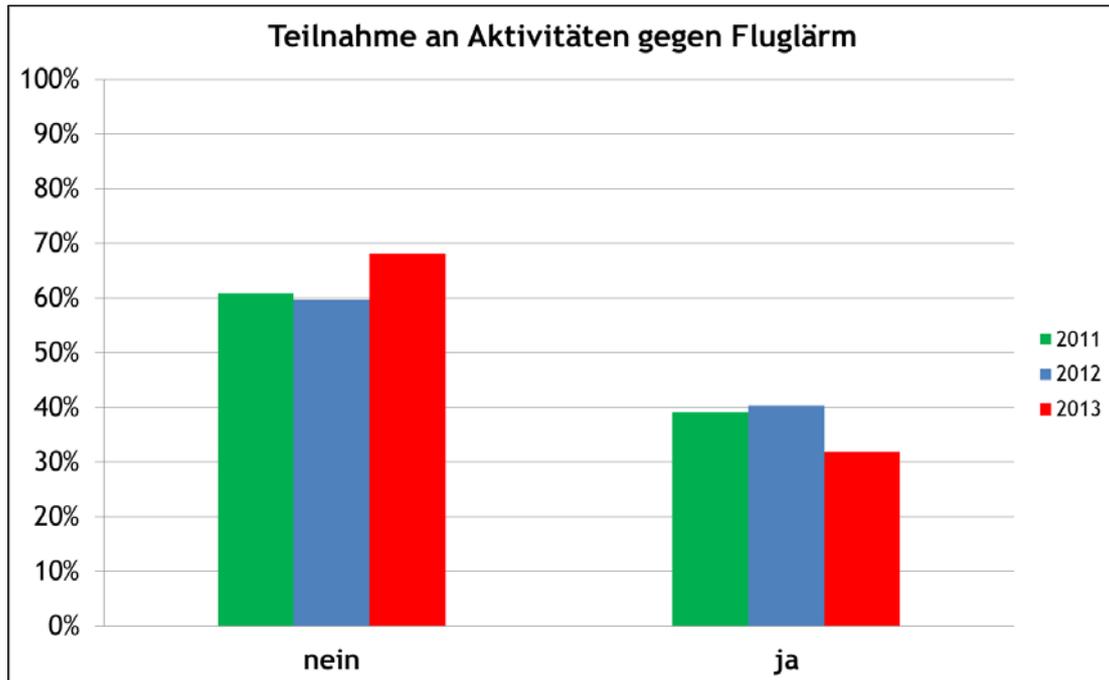


Abbildung 2-23: Teilnahme an Aktivitäten gegen Fluglärm in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=77), 2013 (N=185).

## 2.4 Akustik

### 2.4.1 Messaufbau

In der NORAH-Schlafstudie wurde von 2011 bis 2013 insgesamt an 290 Messstellen (an 29 Messstellen davon mit 2 Probanden in einem Schlafräum) gemessen. An 36 Stellen wurde dabei in allen drei, an 34 in zwei Messzeiträumen Daten aufgezeichnet. Diese Messstellen werden daher zwei- bzw. dreifach gezählt.

Im Gegensatz zu den übrigen Teilstudien in NORAH, für die die benötigten Lärmkennwerte ortsgenau berechnet wurden, wurde in der Schlafstudie während der gesamten Zeit, in denen die Probanden im Bett lagen, der Schalldruckpegel und die Geräuschdateien kontinuierlich am Ohr des Schlafenden aufgezeichnet. Aufgrund der vorhandenen Schallpegelmesser, der Schlafaufzeichnungsgeräte und dem verfügbaren Personal konnte 2011 und 2012 an maximal 6 Orten parallel, in 2013 mit der Methodik zur Messung nächtlicher vegetativ-motorischer Reaktionen an maximal 8 Orten parallel gemessen werden.



*Abbildung 2-24: In der NORAH-Schlafstudie eingesetzter Klasse1-Schallpegelmesser XL2 der Firma NTi Audio. Der Schallpegelmesser wurde jeweils nah am Ohr des Schlafenden platziert, die Messung des Schalldruckpegels und der Geräuschaufzeichnung fand während der gesamten Nacht statt.*

Als Klasse 1 - Schallpegelmesser (DIN EN 61672, Teil 1-3, 2003) wurden die XL2-Geräte der Firma NTi Audio eingesetzt (siehe Abbildung 2-24). Aufgezeichnet wurden mit einer Abtastung von 1 s der A-gewichtete und der ungewichtete (Z-gewichtete) Schalldruckpegel und die jeweiligen energieäquivalenten Dauerschallpegel. Zur nachträglichen Geräuschidentifizierung wurde zudem durchgängig mit 24 kHz-Abtastrate eine wav-Datei mitgeschnitten. Die Schallpegelmesser wurden in den Jahren 2011 und 2012, in denen jeden Abend Untersucher vor Ort waren, mit den geeichten Klasse 1 - Präzisionskalibratoren NOR 1251 der Firma Norsonic Tippkemper abgeglichen. Die akustischen Messungen wurden vor dem Verlassen des Schlafraums vom Untersucher gestartet, nach dem Eintreten des Untersuchers am folgenden Morgen beendet. Im Jahr 2013, beim Einsatz der vereinfachten Methodik, waren die Untersucher nicht jeden Abend bzw. Morgen vor Ort. In diesem Jahr wurde die Timerfunktion des XL2-Schallpegelmessers genutzt und die Messungen 15 Minuten vor den geplanten Schlafzeiten automatisch gestartet bzw. 15 Minuten nach der geplanten Aufstehzeit gestoppt. Die Kalibrierung der Schallpegelmesser erfolgte 2013 nach jedem Neuaufbau an einer Messstelle.

In allen Messnächten war es den Probanden freigestellt, mit welcher Fensterstellung im Schlafraum sie schlafen wollten. Sie wurden lediglich gebeten, diese nicht im Verlaufe der Nacht zu verändern.

#### 2.4.2 Akustische Probemessungen in 2011 und 2012

Hauptziel der Schlafstudie in NORAH war es, in 2011/2012 die Aufwachwahrscheinlichkeit und in 2013 die Wahrscheinlichkeit des Auftretens vegetativ-motorischer Reaktionen von fluglärmbelasteten Anwohnern in Abhängigkeit von akustischen Parametern zu bestimmen.

Dazu wurden nur die im Schlafräum gemessenen Überfliegergeräusche genutzt, die möglichst wenig von anderen Geräuschen überlagert waren, da ansonsten eine mögliche Aufwachreaktion nicht mehr eindeutig nur dem Überfliegergeräusch zugeordnet werden kann (siehe auch Kapitel 3.1.2). Hiervon ausgenommen sind vom Probanden erzeugte leichte Schnarchgeräusche. Zu starkes Schnarchen hingegen führt dazu, dass das Schnarchen im Schalldruckpegelverlauf andere Geräusche so stark überlagert, dass die Parameter, die diese Geräusche akustisch charakterisieren, nicht mehr bestimmt und Überfliegergeräusche in der Aufzeichnung nicht mehr identifiziert werden können (siehe Abbildung 2-25, zu möglichen medizinischen Ausschlussgründen aufgrund starken Schnarchens siehe Kapitel 2.1).

Um zu vermeiden, dass mehrere Tage aufwendig und teuer akustische, schlafphysiologische und psychologische Daten beim Probanden vor Ort erhoben werden, die später für die Auswertung nicht verwendet werden können, wurden vor einer möglichen Messphase in den Jahren 2011 und 2012 beim Probanden akustische und medizinische Probemessungen vorgenommen, die die oben beschriebenen Ausschlussgründe für Probanden aufzeigen.

Grundsätzlich wurden die Messstellen vorab so ausgewählt, dass sie in stark von Fluglärm belasteten Wohngebieten lagen, die ansonsten aber möglichst frei von anderen dominanten Geräuschquellen waren. Im Jahr 2011 wurden insgesamt 66 Probemessungen vorgenommen, bei denen an 24 Messstellen die Probanden für die Studie aus akustischen oder medizinischen Gründen nicht geeignet waren. 2012 waren es von 59 Probemessstellen 15, die nicht geeignet waren.

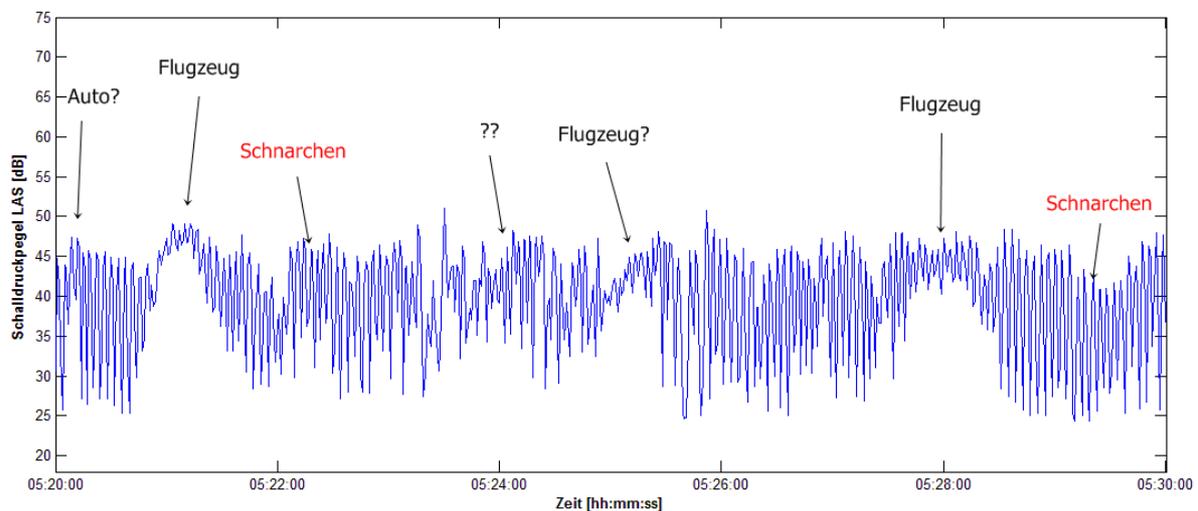


Abbildung 2-25: 10-minütiger Schalldruckpegelverlauf einer Testmessung am Ohr des Schlafenden vom 14.07.2011 an einer Messstelle in Raunheim bei geöffnetem Fenster. Die Geräuschereignisse sind vom durchgängig starken Schnarchen des Probanden überlagert, so dass die auswertungsrelevanten Akustikparameter der Überfliegergeräusche, des Hintergrundpegels und der übrigen Verkehrsgeräusche nicht bestimmt bzw. gewisse Außengeräusche gar nicht identifiziert werden können. Somit ist diese Messstelle aus akustischen Gründen für die Schlafstudie nicht geeignet.

Ziel der Entwicklung einer einfacheren Methodik zur Identifizierung einer (lärmbedingten) vegetativ-motorischen Körperreaktion (siehe Kapitel 2.6) war es, mit deutlich geringerem personellem und finanziellem Aufwand weit mehr Versuchspersonen als mit der Aufzeichnung des Polysomnogramms untersuchen zu können. Diese Methodik wurde im Sommer 2013 eingesetzt. Zum Einsparkonzept gehörte konsequenterweise, dass vorab auch auf akustische und medizinische Probemessungen verzichtet wurde. Von den Messungen an insgesamt 171 Messstellen in 2013 konnten 31 aus o.g. Gründen nicht genutzt werden.

### 2.4.3 Auswertungsmethodik

Für eine statistische Modellbildung zur Berechnung von Aufwachwahrscheinlichkeiten aufgrund von Lärmereignissen (siehe Kapitel 2.8) ist es notwendig, dass von den in der Nacht aufgetretenen Geräuschen die jeweils für das Modell potentiell wichtigen akustischen Größen wie der Anfangs- und Endzeitpunkt, der Maximalpegel  $L_{ASmax}$ , die Anstiegssteilheit und der Schallereignispegel SEL vorliegen. Zudem müssen die Geräusche eindeutig identifiziert und gegebenenfalls gleichzeitig aufgetretene „Stör-“ Geräusche mittels eines Kommentars vermerkt werden. Zur Berechnung der Emergenz (Maximalpegel minus Hintergrundpegel) ist zudem das regelmäßige Markieren des Hintergrundpegels wichtig.

Darüber hinaus wird neben den nächtlichen Gesamtverkehrszahlen auch die Berechnung des energieäquivalenten Dauerschallpegels  $L_{ASeq}$  als akustischer Gesamtparameter für die Nacht benötigt.

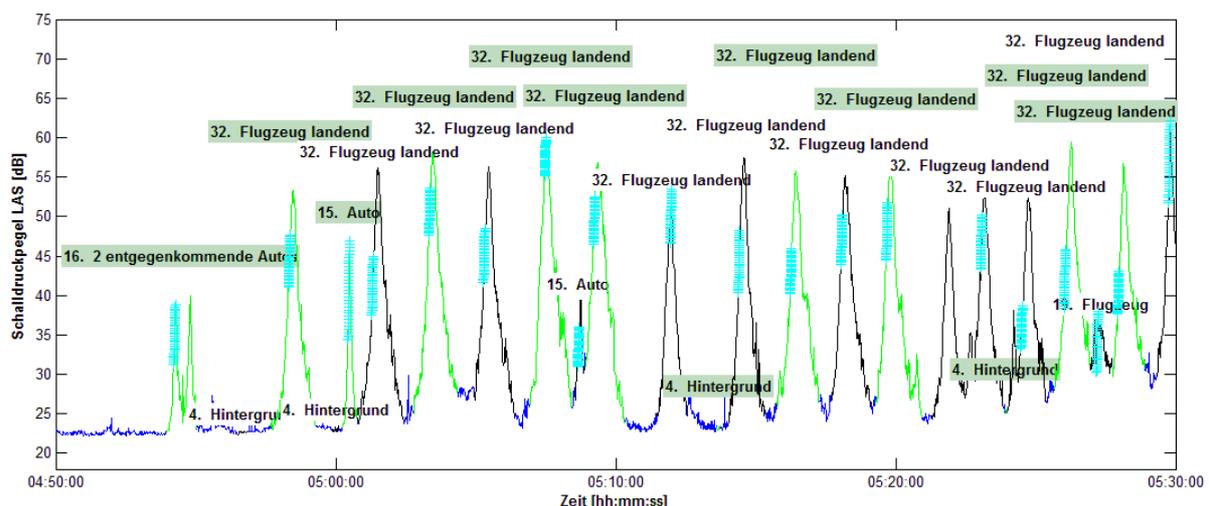


Abbildung 2-26: 40-minütiger Schalldruckpegelverlauf am Ohr des Schlafenden vom 28.07.2011 an einer Messstelle in Offenbach bei geöffnetem Fenster. Für die ereigniskorrelierte Auswertung wurde jedes Geräusch markiert (abwechselnd grün und schwarz), angehört und benannt. Die berechnete Pegelanstiegssteilheit ist in Cyan dargestellt.

Zur Berechnung dieser akustischen Größen war es notwendig, dass jedes in der Nacht aufgetretene Geräusch von einem Mitarbeiter abgehört, Anfangs- und Endzeitpunkt markiert und mit einem Kommentar zur Art des Geräusches versehen wurde. Für die Identifizierung der Überfliegergeräusche wurde zudem als weiteres Hilfsmittel das Casper „Live Aircraft Tracking“ - System der Gemeinnützigen Umwelthaus GmbH genutzt, welches jede Flugbewegung im Umkreis von mehr als 40 km am Frankfurter Flughafen in der Rückschau zeitgenau visuell darstellt.

Für die speziellen Anforderungen an die akustische Auswertung dieser Feldstudie und das Zählen der einzelnen Schallereignisse wurde die im DLR mit dem Programmpaket Matlab (Matrix Laboratory, letzte eingesetzte Vers. 2014 a) entwickelte und bereits in Vorgängerstudien eingesetzte Software „Akustikview“ verwendet.

Abbildung 2-26 zeigt beispielhaft den 40-minütigen Ausschnitt einer ausgewerteten Nacht. Der Schalldruckpegelverlauf des  $L_{AS}$  ist in blau dargestellt, die markierten Geräusche der besseren Übersicht wegen abwechselnd in grün und schwarz, die berechnete Anstiegssteilheit der Geräusche in cyan.

Wenn Überfliegergeräusche von einem zusätzlichen Geräusch überlagert wurden, wurde dies im Kommentar vermerkt (siehe beispielhaft Abbildung 2-27). Diese Überfliegergeräusche werden zukünftig „gestörte Geräusche“ genannt und konnten nicht für die ereigniskorrelierte Auswertung mit den Schlafdaten verwendet werden, da eine mögliche Aufwachreaktion nicht eindeutig auf eines der beiden Geräusche hätte zurückgeführt werden können.

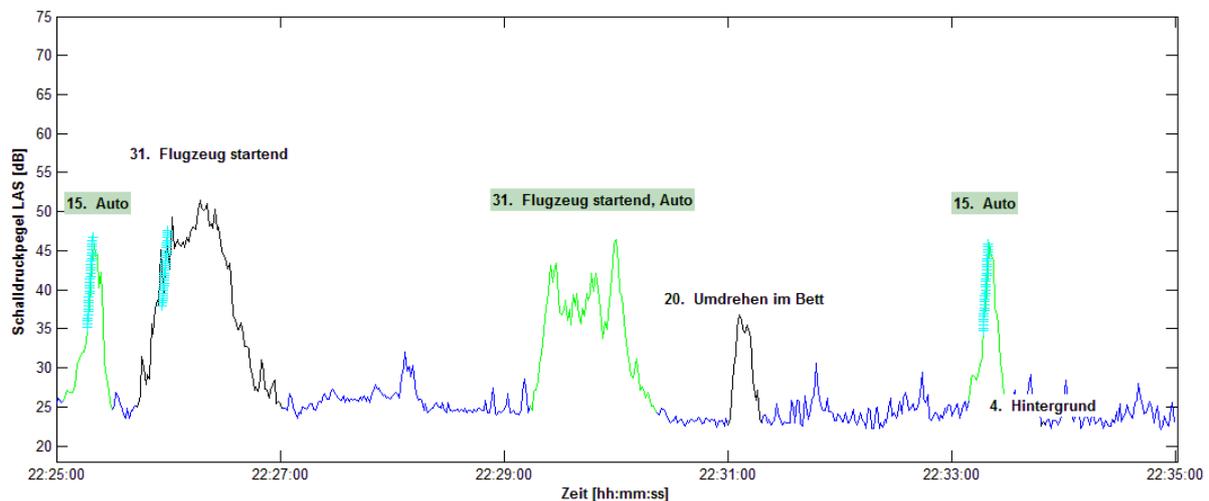


Abbildung 2-27: 10-minütiger Schalldruckpegelverlauf am Ohr des Schlafenden vom 18.09.2013 an einer Messstelle in Trebur bei gekipptem Fenster. Das Geräusch um 22:30 Uhr ist eine Überlagerung aus einem Überflug- und einem Vorbeifahrgeräusch. Da aus solch einer Geräuschüberlagerung nicht eindeutig die akustischen Parameter für die Einzelgeräusche berechnet werden können, zudem bei einer ereigniskorrelierten Auswertung mit den Schlafdaten eine mögliche Aufwachreaktion nicht zweifellos auf eine der beiden Geräusche zurückgeführt werden kann, werden solche Geräuschüberlagerungen nicht für die Auswertung verwendet.

Die Ergebnisdateien sowohl für diese ereigniskorrelierte Auswertung mit den Schlafdaten als auch für die Auswertung der deskriptiven Gesamtparameter der Nacht werden von der Software im ASCII-Tabellenformat abgelegt und können somit problemlos in anderen Programmen wie SPSS, R oder MS-EXCEL weiterverwendet werden.

#### 2.4.4 Deskriptive Darstellung der akustischen Messwerte

Primäres Kriterium für die Auswahl der Untersuchungsgebiete war es, dass dort von 2011 bis 2013 das höchste Aufkommen an nächtlichen Flugbewegungen zwischen 22:00-06:30 Uhr bzw. 23:00-07:30 Uhr ausgehend vom Flughafen Frankfurt am Main vorlag (siehe auch Kapitel 2.1), gleichzeitig aber wenig andere Geräusche in der Nacht auf den Schlafenden zusätzlich einwirkten, um besser mögliche Aufwachreaktionen eindeutig auf Überflugeräusche zurückführen zu können.

Die akustische Messgröße, die üblicherweise am stärksten mit einer möglichen Aufwachreaktion korreliert, ist der Maximalpegel des Überflugeräusches (siehe auch Kapitel 2.8). Um Expositions-Wirkungskurven aus den Messdaten zu ermitteln, die einen möglichst breiten Maximalpegelbereich abdecken, ist es in der Regel nicht notwendig in Gebiete zu gehen, die weit entfernt von den An- und Abflugrouten liegen. Die gewünschte Varianz in den akustischen Größen wird allein durch die unterschiedlichen Überflughöhen, Fensterstellungen im Schlafraum, Etage und generelle Dämmung des Schlafraums, Wetterbedingungen und die Topologie am Messort erreicht. Orte nah am Flughafen haben zudem den Vorteil, dass dort mehr Flugbewegungen gemessen und in der Analyse berücksichtigt werden können (unter der Voraussetzung, dass ein gewisser zeitlicher Mindestabstand gegeben ist) als dies unter Flugpfaden weiter entfernt vom Flughafen der Fall ist, wo der Flugverkehr schon vorher auf verschiedene Routen verteilt wurde.

In Abbildung 2-28 ist die mittlere stündliche Anzahl aller in der Schlafstudie von 2011 - 2013 gemessenen Überflüge dargestellt. Zwischen 2011 und 2012 ist deutlich die Reduktion der Flugbewegungszahlen in der nach der Messphase in 2011 eingeführten Kernruhezeit von 23 - 5 Uhr zu erkennen, aber auch in 2012 die Zunahme der Überflüge in den frühen Morgenstunden. Es ist zu beachten, dass auch nach Einführung der Kernruhezeit Gebiete noch nach dem letztmöglichen Starttermin eines Flugzeuges um 23 Uhr von diesem belastet sein können bzw. morgens erste anfliegende Flugzeuge bereits vor 5 Uhr gemessen werden. Auch sind Starts nach 23 Uhr mit Ausnahmegenehmigung weiterhin möglich. Im Jahr 2013 wurden die nächtlichen vegetativ-motorischen Reaktionen des Schlafenden mit einer vereinfachten Messmethodik gemessen, die es erlaubte, deutlich mehr Probanden zu untersuchen. Daher wurden zusätzlich auch Probanden aus Gebieten in die Studie aufgenommen, die weiter vom Flughafen entfernt sind als die Gebiete aus 2011 und 2012. Die etwas geringeren mittleren stündlichen Überflugzahlen in 2013 in den Morgenstunden verglichen mit 2012 sind in diesen zusätzlichen Gebieten auf die vorherige Verteilung der Flugzeuge auf andere Routen zurückzuführen.

In den Kapiteln 3.1.3 und 3.2.5.3 werden die in der NORAH-Schlafstudie gewonnenen Daten mit der DLR-Fluglärmfeldstudie am Köln-Bonner-Flughafen in den Jahren 2001/2002 verglichen. Die in dieser Studie gewonnenen Ergebnisse gehen derzeit in die Berechnung des Frankfurter Nachtindex ein (Schreckenberget al. 2009). Für den Köln-Bonner-Flughafen gibt es keine nächtliche Kernruhezeit und es werden dort nachts zahlreiche Frachtflüge abgewickelt. Tabelle 2-2 stellt die mittleren stündlichen Flugbewegungszahlen und die Standardabweichung STD (68 % der gemessenen Überflüge lagen im Bereich Mittelwert  $\pm$  STD) vergleichend für NORAH 2011-2013 und die Köln-Bonner-Studie dar. Es ist zu erkennen, dass am Köln-Bonner-Flughafen nachts deutlich mehr Überflüge an den Messorten detektiert wurden als an den Messorten am Frankfurter Flughafen selbst vor Einführung der Kernruhezeit im NORAH-Schlafstudienmesszeitraum 2011.

Zur detaillierteren Beschreibung der an den NORAH-Messorten vorgefundenen nächtlichen akustischen Bedingungen stellen die Abbildung 2-29 bis Abbildung 2-34 die Häufigkeitsverteilungen der Maximalpegel der Überflugeräusche, der Geräuschlängen, der Einzelereignispegel, der energieäquivalenten Dauerschallpegel der ungestörten Überflugeräusche bezogen auf die Bettliegezeiten der Probanden, der Pegelanstiegssteilheiten der Überflugeräusche und der energieäquivalenten Dauerschallpegel aller innen am Ohr des Schlafenden auftretenden Geräusche dar. All diese akustischen Messgrößen werden bei der statistischen Modellbildung zur Vorhersage von Aufwach-, vegetativ-motorischen und subjektiven Reaktionen auf den nächtlichen Fluglärm in einem ersten Schritt berücksichtigt. Stellen sich die Größen als statistisch nicht-signifikant heraus, werden sie dann im finalen optimalen Modell nicht mehr verwendet (siehe auch Kapitel 2.8).

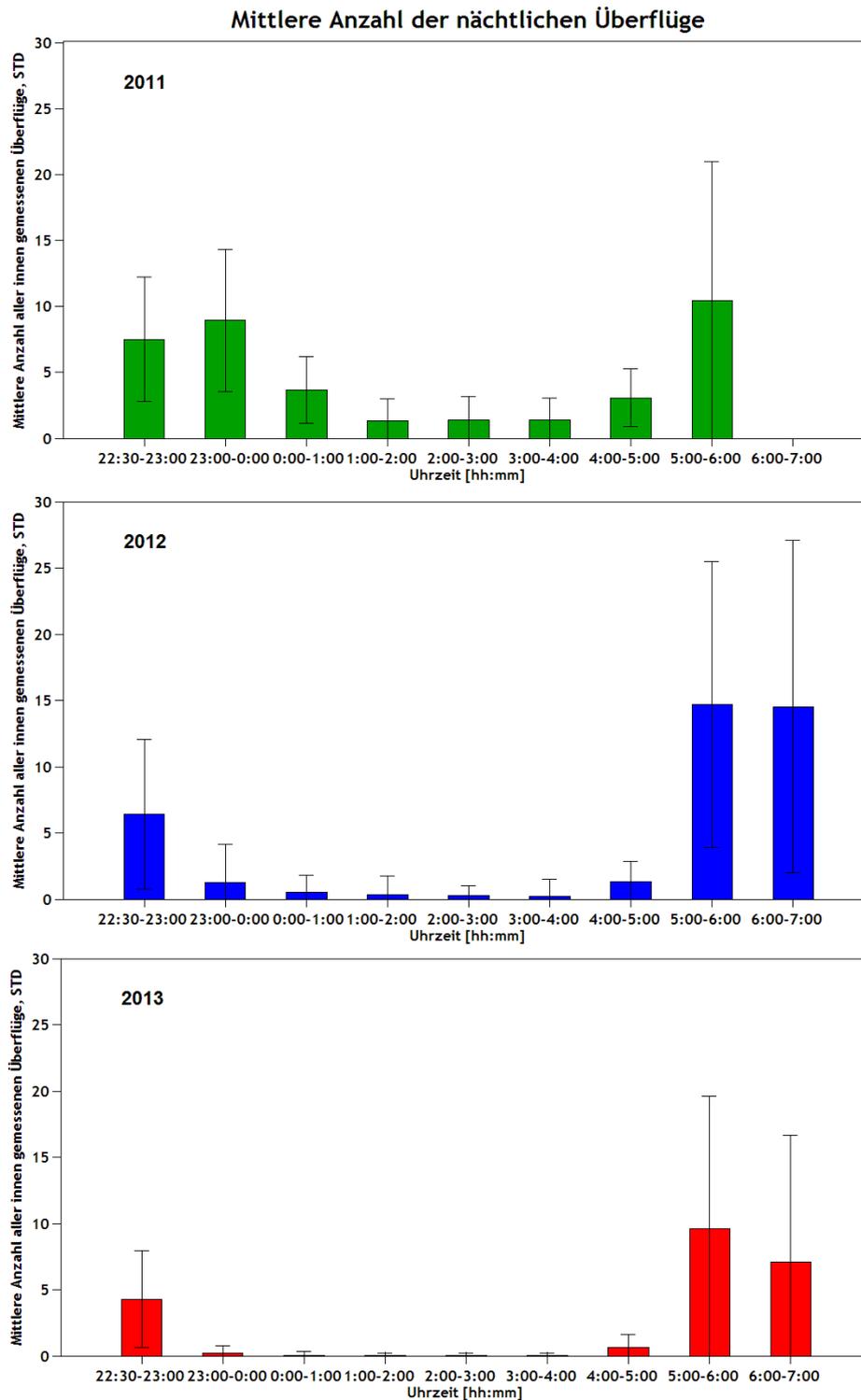


Abbildung 2-28: Mittlere stündliche Anzahl sämtlicher innen, während der Probandenbettzeit, gemessenen Überflugeräusche (ungestört + gestört) an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. Die Standardabweichung STD ist in schwarzen Balken dargestellt. Berücksichtigt werden ausschließlich die Zeiträume, die die Gruppe 1 und die Gruppe 2 durchgehend im Bett verbrachten (22:30-6:00 Uhr bzw. 23:30-7:00 Uhr). Im Jahr 2011 gehen insgesamt 4475 Fluggeräusche in 119 Nächten, in 2012 5890 Fluggeräusche in 186 Nächten und in 2013 9394 Fluggeräusche in 535 Nächten in die Auswertung ein. Nächte, in denen 2 Versuchspersonen in einem Raum untersucht wurden, werden doppelt gezählt.

Tabelle 2-2: Mittlere stündliche Anzahl sämtlicher innen, während der Probandenbettzeit, gemessenen Überfliegergeräusche (ungestört + gestört) in NORAH in den Jahren 2011-2013 und der Köln-Bonner-Fluglärmstudie des DLR aus den Jahren 2001/2002. Die Standardabweichung ist in Klammern aufgeführt. Berücksichtigt werden ausschließlich die Zeiträume, die die Probandengruppen in den jeweiligen Studien vollständig im Bett verbrachten.

Uhrzeit	NORAH 2011	NORAH 2012	NORAH 2013	Köln-Bonn 2001/2002
22:30-23:00 Uhr	7,5 (4,7)	6,4 (5,6)	4,3 (3,7)	---
23:00 -0:00 Uhr	8,9 (5,4)	1,3 (2,9)	0,2 (0,6)	1,4 (4,2)
0:00-1:00 Uhr	3,7 (2,5)	0,5 (1,3)	0,1 (0,3)	6,0 (5,8)
1:00-2:00 Uhr	1,4 (1,6)	0,3 (1,4)	0,0 (0,2)	2,7 (2,7)
2:00-3:00 Uhr	1,4 (1,8)	0,2 (0,8)	0,0 (0,2)	3,3 (3,0)
3:00-4:00 Uhr	1,4 (1,7)	0,2 (1,3)	0,0 (0,2)	6,2 (6,4)
4:00-5:00 Uhr	3,1 (2,2)	1,3 (1,5)	0,6 (1,0)	7,0 (7,6)
5:00-6:00 Uhr	10,4 (10,6)	14,7 (10,8)	9,6 (10,0)	2,7 (2,8)
6:00-7:00 Uhr	---	14,5 (12,5)	7,1 (9,5)	---

In Abbildung 2-29 bis Abbildung 2-34 ist zu erkennen, dass in allen drei Untersuchungsjahren der NORAH-Schlafstudie durch die Wahl der Messstellen ein weiter akustischer Messbereich abgedeckt wurde, der damit auch die Ermittlung von Expositions-Wirkungskurven in diesem großen Bereich erlaubt. Die Abbildungen in diesem Kapitel dienen allein der akustischen Beschreibung der Messstellen. Es sind alle am Ohr des Schlafenden gemessenen, nicht durch andere Geräusche überlagerten Überfliegerereignisse dargestellt. Wenn Überfliegergeräusche für einzelne Auswertungen nicht verwendet werden (z.B. bei der Schlafauswertung die Überfliegergeräusche, denen in einem Zeitraum von 60 s andere Geräusche wie z.B. das eines Autos vorausgehen), so ist das in den jeweiligen Auswertungskapiteln vermerkt.

Der Median und die 25 %- bzw. 75 %-Quantile beschreiben idealerweise die dargestellten Häufigkeitsverteilungen und die Messwerte, die 25 %, 50 % und 75 % der Daten unterschreiten. In Tabelle 2-3 sind die Mediane und 25 %- bzw. 75 % - Quantile der Häufigkeitsverteilungen für Maximalpegel, Überfliegergeräuschlänge, Pegelanstiegssteilheit, und die energieäquivalenten Dauerschallpegel der Überfliegergeräusche und aller Geräusche am Ohr des Schlafenden für die NORAH-Daten 2011-2013 und die Köln-Bonner-Studie 2001/2002 aufgeführt.

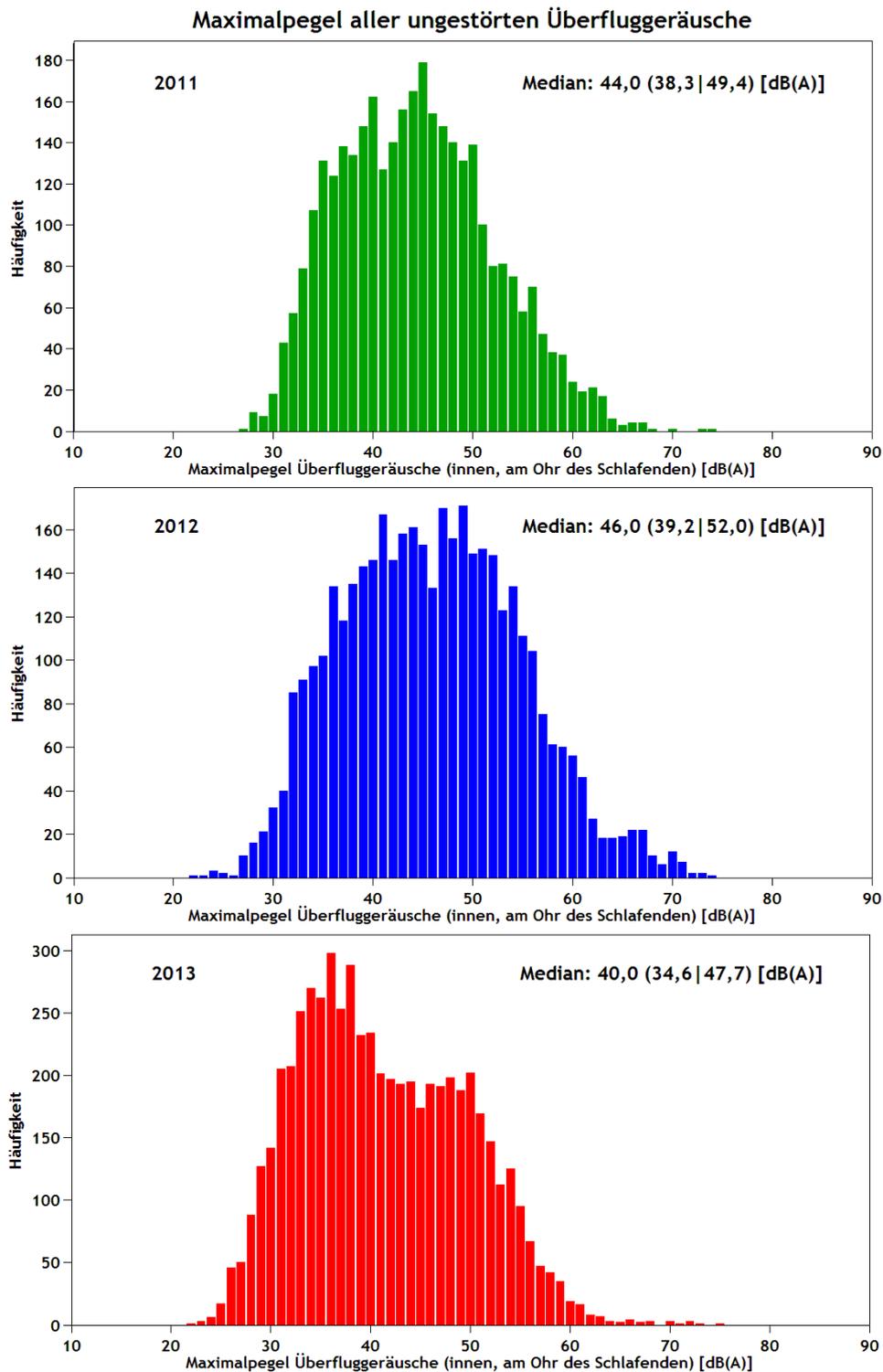


Abbildung 2-29: Häufigkeitsverteilung der Maximalpegel sämtlicher innen, während der Bettzeit am Ohr des Schlafenden gemessenen ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. Für das Jahr 2011 werden die Maximalpegel von 3325 (971 bei geöffnetem, 2043 bei gekipptem und 311 bei geschlossenem Fenster), für 2012 3977 Maximalpegel (820 bei geöffnetem, 2780 bei gekipptem und 377 bei geschlossenem Fenster) und für das Jahr 2013 werden die Maximalpegel von 5824 Flugzeuggeräuschen (869 bei geöffnetem, 3162 bei gekipptem und 1793 bei geschlossenem Fenster) dargestellt. Nächte, in denen 2 Versuchspersonen in einem Raum untersucht wurden, werden doppelt gezählt.

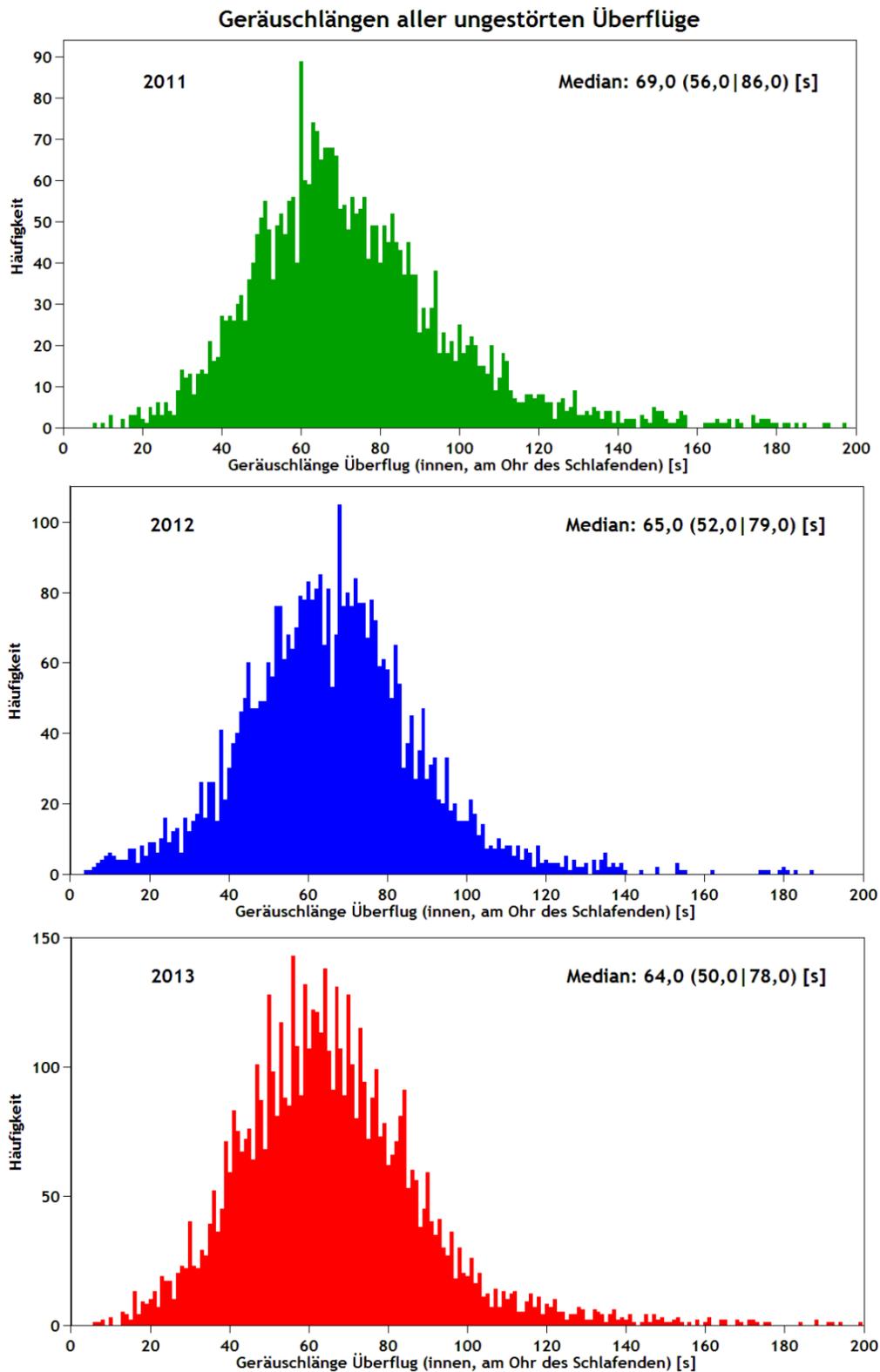


Abbildung 2-30: Häufigkeitsverteilung der Geräuschlängen sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. Für detailliertere Informationen zu den berücksichtigten Geräuschen siehe Unterschrift zu Abbildung 2-29.

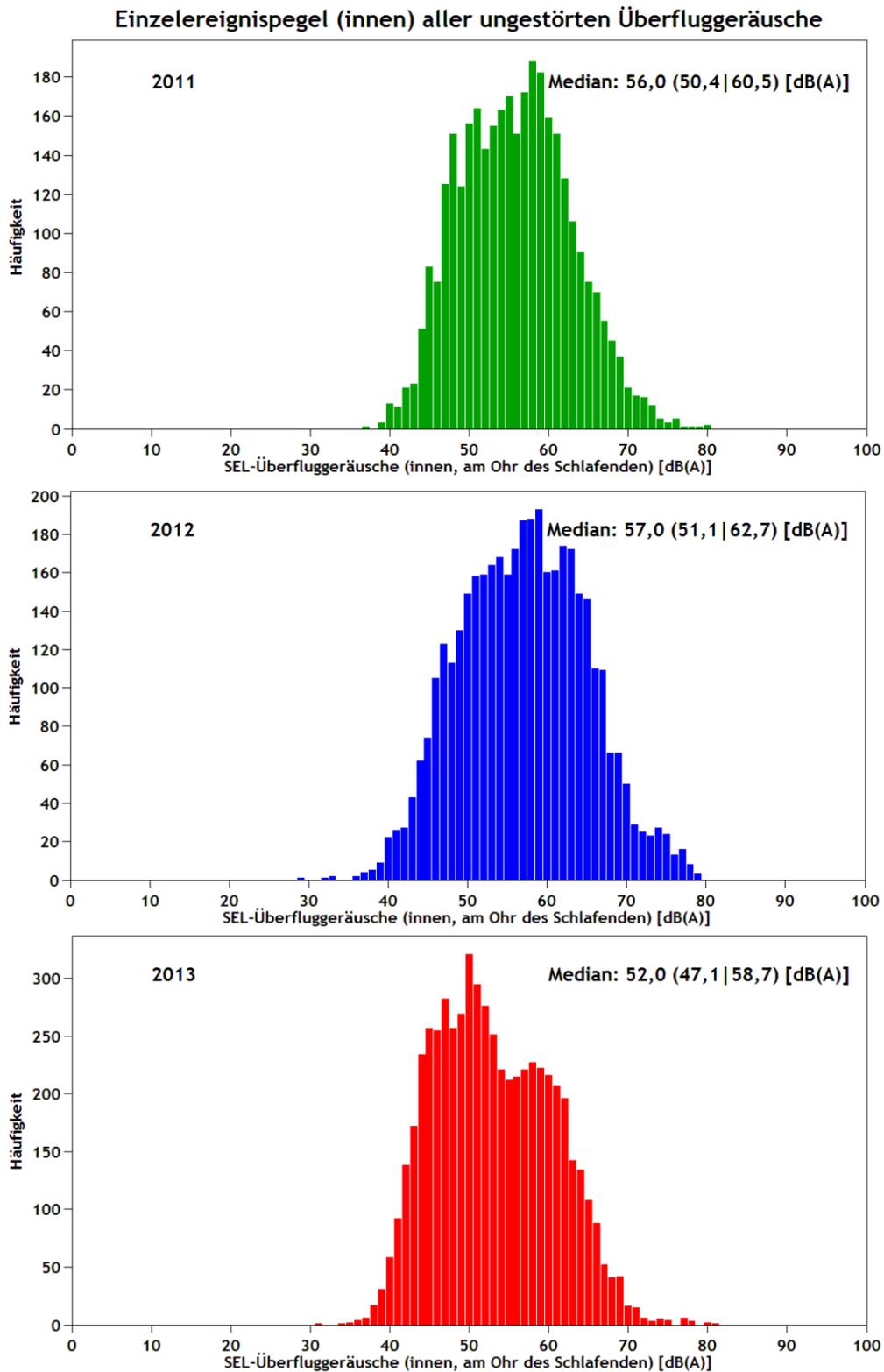


Abbildung 2-31: Häufigkeitsverteilung der Schallexpositionspiegel SEL sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überfliegergeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. Für detailliertere Informationen zu den berücksichtigten Geräuschen siehe Unterschrift zu Abbildung 2-29.

### Energieäquivalente Dauerschallpegel (innen) aller ungestörten Überflugeräusche

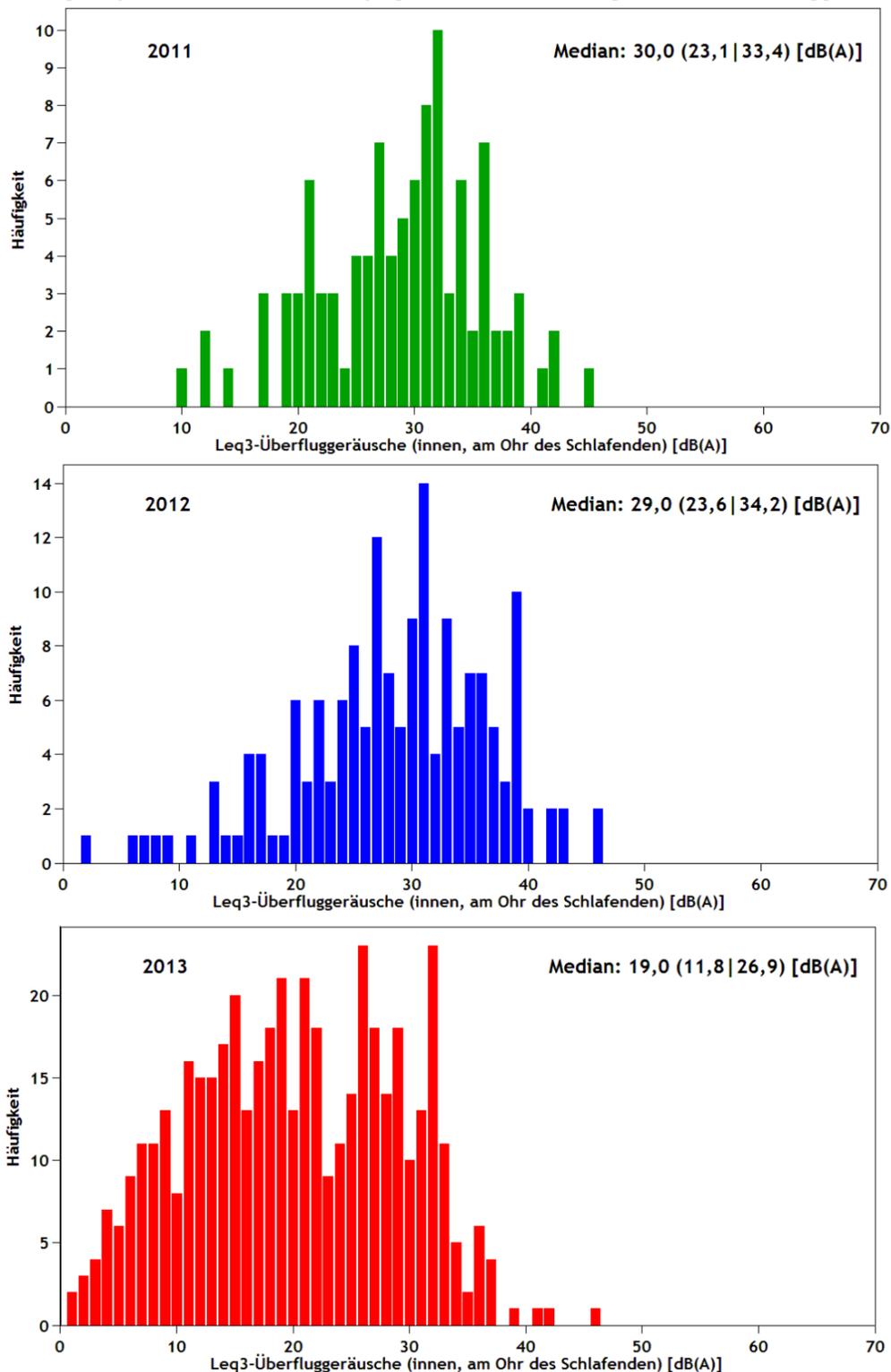


Abbildung 2-32: Häufigkeitsverteilung der energieäquivalenten Dauerschallpegel  $Leq_3$  der Gesamtnacht sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen in den Jahren 2011-2013. Für detailliertere Informationen zu den berücksichtigten Geräuschen siehe Unterschrift zu Abbildung 2-29.

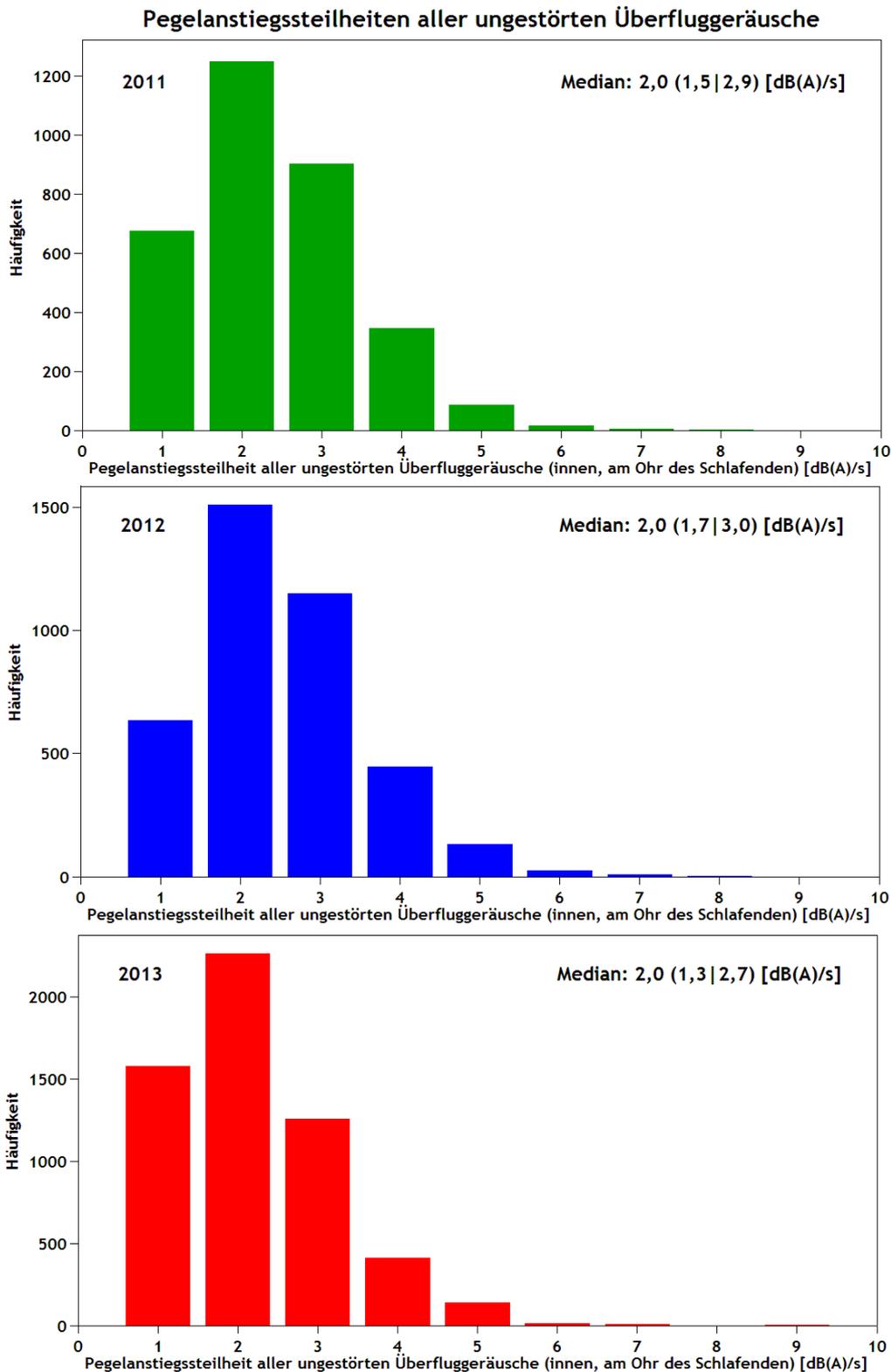


Abbildung 2-33: Häufigkeitsverteilung der Pegelanstiegssteilheiten sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überfliegergeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. Für detailliertere Informationen zu den berücksichtigten Geräuschen siehe Unterschrift zu Abbildung 2-29.

### Energieäquivalente Dauerschallpegel (innen) aller Gesamtnächte

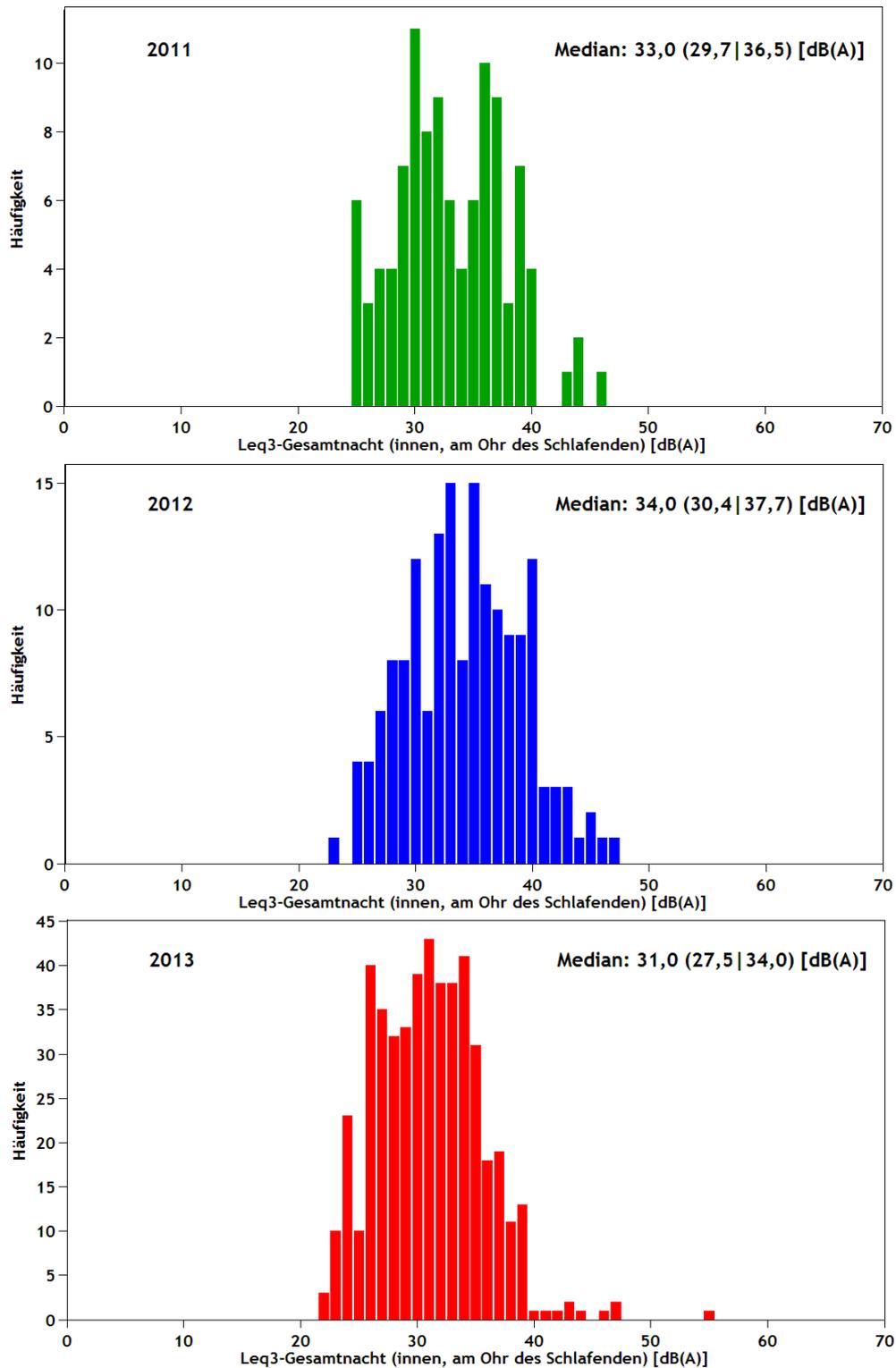


Abbildung 2-34: Häufigkeitsverteilung der energieäquivalenten Dauerschallpegel  $Leq_3$  der Gesamtnacht sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, Geräusche an allen Messstellen in den Jahren 2011-2013. Für detailliertere Informationen zu den berücksichtigten Geräuschen siehe Unterschrift zu Abbildung 2-29

Tabelle 2-3: Vergleich der Mediane (25 % | 75 % - Quantile) der Häufigkeitsverteilungen für Maximalpegel, Überfliegergeräuschlänge, Pegelanstiegssteilheit, energieäquivalenter Dauerschallpegel der Überfliegergeräusche und aller Geräusche (alle innen, am Ohr des Schlafenden) bezogen auf den Zeitraum der Bettliegezeit der Probanden bzw. 0 - 6 Uhr für die Köln-Bonner-Studie.

	NORAH 2011	NORAH 2012	NORAH 2013	Köln-Bonn 2001/2002
Maximalpegel [dB(A)]	44,0 (38,3   49,4)	46,0 (39,2   52,0)	40,0 (34,6   47,7)	43,8 (37,1   50,2)
Überfliegergeräuschlänge [s]	69,0 (56,0   86,0)	65,0 (52,0   79,0)	64,0 (50,0   78,0)	80,0 (59,0   100,0)
Pegel-Anstiegssteilheit [dB(A)/s]	2,0 (1,5   2,9)	2,0 (1,7   3,0)	2,0 (1,3   2,7)	2,6 (1,7   3,9)
Energieäquival. Dauerschallpegel Überfliegergeräusche [dB(A)]	30,0 (23,1   33,4)	29,0 (23,6   34,2)	19,0 (11,8   26,9)	26,0 (20,1   32,2)
Energieäquival. Dauerschallpegel Gesamtnacht [dB(A)]	33,0 (29,7   36,5)	34,0 (30,4   37,7)	31,0 (27,5   34,0)	33,1 (29,7   36,9)

## 2.5 Polysomnografie

### 2.5.1 Schlaf-EEG

Die Polysomnografie, besteht aus der Aufzeichnung des EEGs, der Augenbewegungen (Elektrookulografie = EOG) und der Muskelaktivität (Elektromyografie = EMG) zur Bewertung des Schlafs in Quantität und Qualität. Um das Schlaf-EEG abzuleiten, werden Elektroden an vorgegebenen Positionen auf die Kopfhaut und im Gesicht geklebt. So kann die elektrische Oberflächenaktivität des Gehirns in Form von Potenzialschwankungen kontinuierlich dargestellt werden. Im Schlaf verändern sich Amplitude und Frequenz der Wellenmuster im EEG, die Art der Augenbewegungen und die Muskelaktivität in typischer Weise und erlauben die Einteilung in die beschriebenen Schlafstadien. Im entspannten Wachzustand zeigt die Hirnaktivität einen niedrigamplitudigen und hochfrequenten Rhythmus (Abbildung 2-35). In den tieferen Schlafstadien nimmt die Amplitude der Hirnaktivität zu und die Frequenz wird langsamer. Für den Tiefschlaf sind beispielsweise besonders langsame Wellen charakteristisch, die als Delta-Wellen ( $\geq 75 \mu\text{V}$ ,  $> 500 \text{ ms}$ ) bezeichnet werden. Der REM-Schlaf nimmt eine Sonderrolle ein. Er ist gekennzeichnet durch ein niedrigamplitudiges EEG mit gemischten Frequenzen, in dem sägezahnartige Wellenmuster auftreten können. Der Muskeltonus ist äußerst niedrig mit Ausnahme kurzzeitiger phasischer Aktivierungen. Schnelle, konjugierte Augenbewegungen sind

typisch, die dem REM-Schlaf seinen Namen gegeben haben. In Abbildung 2-35 sind typische Charakteristika der einzelnen Schlafstadien veranschaulicht.

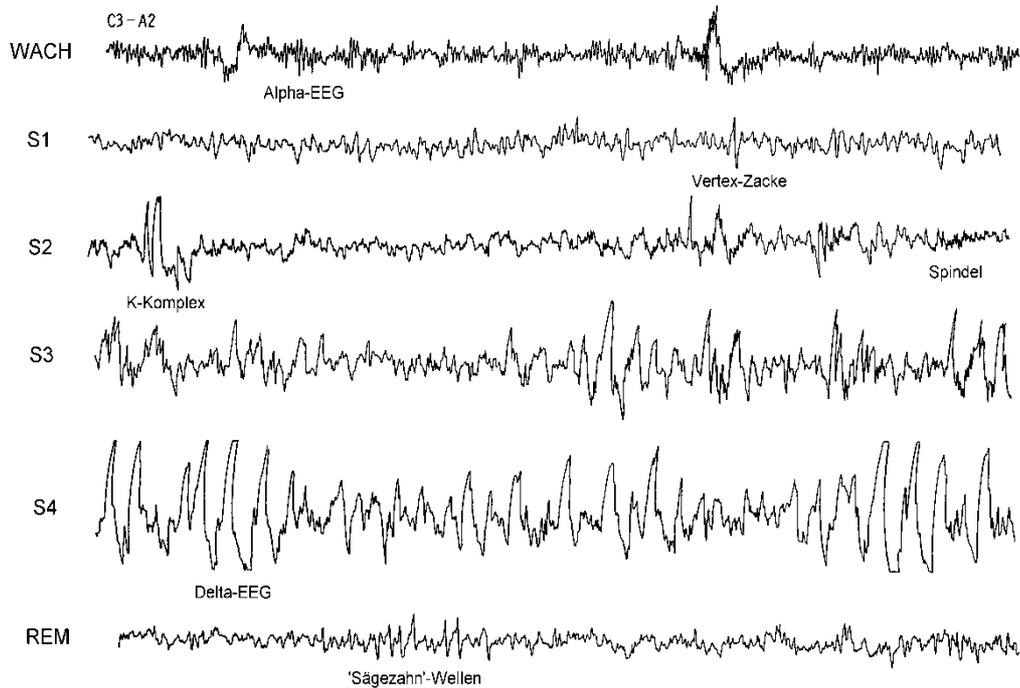


Abbildung 2-35: Schlafstadienklassifikation: Auszug aus (Rechtschaffen et al., 1968).

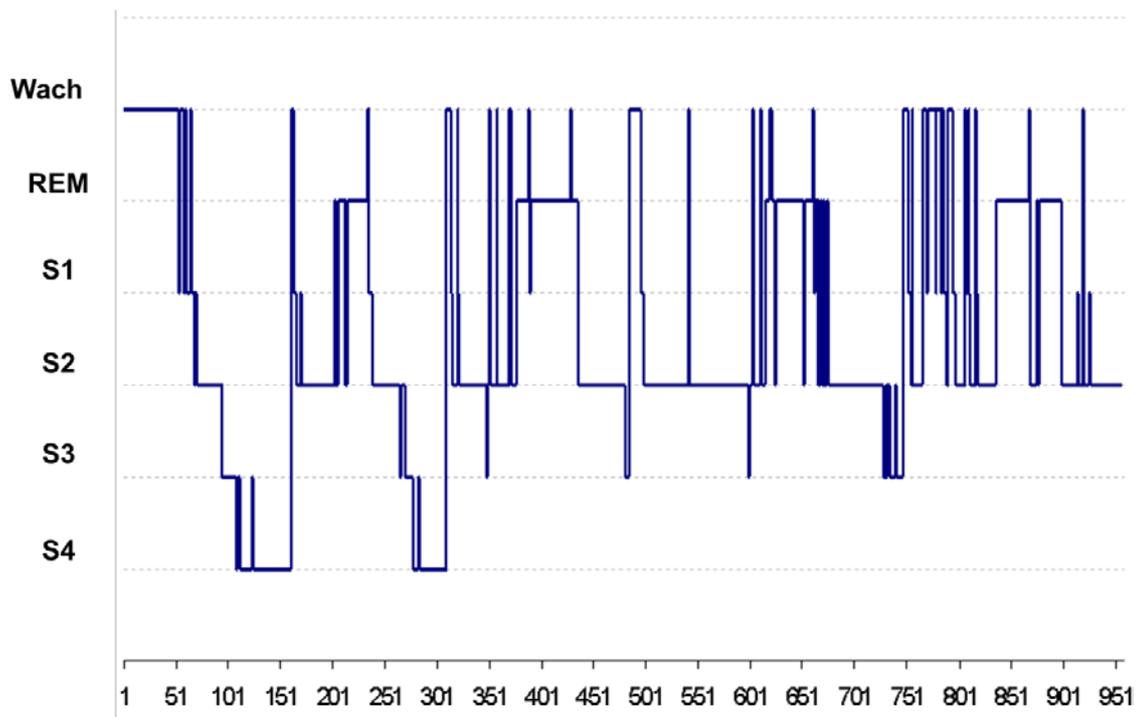


Abbildung 2-36: Hypnogramm einer ungestörten Nacht.

Ein geschulter Auswerter weist jeweils 30-sekündigen Epochen ein Schlafstadium zu. Auf diese Weise wird die Erstellung einer Gesamtübersicht über die Nacht möglich, die als Hypnogramm bezeichnet wird (Abbildung 2-36). Durch den hohen Personalaufwand, den sowohl das Applizieren der Elektroden als auch das nachfolgende manuelle Bewerten des Schlafs erfordert, ist die Polysomnografie zeitintensiv und teuer, was ihren Einsatz außerhalb des Schlaflabors erschwert und die Zahl an untersuchten Probanden begrenzt. Der Einsatz der Polysomnografie in einer Felduntersuchung, d.h. bei den Probanden zu Hause, ermöglicht aber die Aufzeichnung des Schlafs mit hoher ökologischer Validität.

In den Jahren 2011 und 2012 wurden die Probanden der Schlafstudie mit Hilfe der Polysomnografie untersucht. Zu diesem Zweck wurden Elektroden an definierten Stellen auf der Kopfhaut und im Gesicht geklebt (Abbildung 2-37). Die frontale (F4), zentrale (C4) und okzipitale (O2) Elektrode wurde redundant gegen die retroaurikulären Elektroden (A1 und A2) abgeleitet. M bezeichnet die Position der Masse-Elektrode. Das EOG wird links oberhalb des Lidwinkels, rechts unterhalb des Lidwinkels abgeleitet. Das Auge wirkt als Dipol. Die Potenzialdifferenz zwischen der Netzhaut und der Hornhaut kann bei sich bewegendem Auge als Kurve aufgezeichnet werden. Das EMG wurde über zwei Elektroden unter dem Kinn (submental) erfasst.

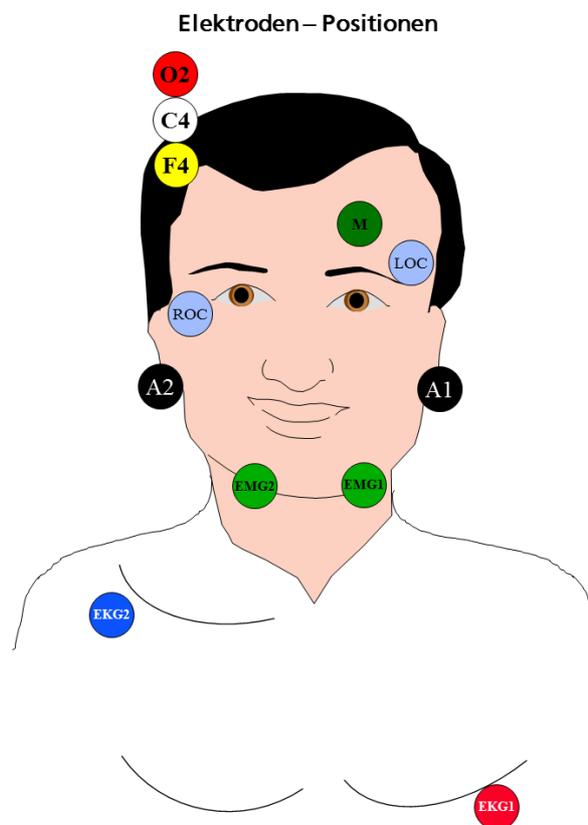


Abbildung 2-37: Schematische Darstellung der Elektrodenpositionierung, wie sie in den Jahren 2011 und 2012 gewählt wurde.

Das Elektrokardiogramm (EKG) wurde einachsig aufgezeichnet. Die Pulswelle und Sauerstoffsättigung wurden mit Hilfe eines am Finger getragenen Pulsoxymeters erfasst. Je ein Atemgurt um den Brustkorb und den Bauch lieferten kontinuierliche Informationen zu Atemexkursionen sowie durch einen integrierten Lagesensor zur Lage im Bett. Nur in der ersten Untersuchungsnacht (Adaptationsnacht) lieferte ein Thermistor, der den Atemfluss an Mund und Nase registrierte, in Verbindung mit einem Bauchatemgurt und der Sauerstoffsättigung Hinweise auf Probanden mit atembезogenen Schlafstörungen, die dann von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen wurden.

### 2.5.2 Schlafkennwerte

Der Schlaf wurde durch einen Auswerter nach Standardkriterien (Rechtschaffen et al. 1968) in 30 s Epochen bewertet. Den Kriterien zur Schlafauswertung nach Rechtschaffen et al. (1968) wurde der Vorzug gegeben vor den Kriterien nach AASM, um eine Vergleichbarkeit mit vorherigen Studienergebnissen zu den Wirkungen nächtlichen Fluglärms am Flughafen Köln-Bonn zu gewährleisten (Basner et al. 2006). Aktivierungen im EEG in Form von Frequenzbeschleunigungen werden als Arousal bezeichnet und wurden bei einer Dauer von 3 s bis 10 s nach den Kriterien der American Sleep Disorders Association (Bonnet et al. 1992) markiert.

Schlafparameter, die aus dem Schlaf-EEG abgeleitet wurden, waren:

1. Schlafstadienanteile: Wach, S1, S2, S3, S4 und REM
2. Schlafperiodendauer: SPT (Sleep period time) - Zeit zwischen dem ersten Auftreten eines Schlafstadiums bis zur letzten Epoche Schlaf
3. Gesamtschlafdauer: TST (Total sleep time) - SPT ohne Wach-Epochen
4. Einschlaflatenz: SOL (Sleep onset latency) - Zeit vom Löschen des Lichts bis zum ersten Auftreten eines Schlafstadiums (min. S1)
5. Schlafeffizienz: SE (Sleep efficiency) - TST als Anteil der gesamten Zeit von Löschen des Lichts bis zum Aufstehen
6. EEG-Arousal: EEG-Frequenzbeschleunigung mit einer Dauer von 3 s-10 s (Bonnet et al., 1992)

Neben diesen Schlafkennwerten ist für die Lärmwirkungsforschung insbesondere das Aufwachen aus dem Schlaf interessant, das in unmittelbarem zeitlichem Zusammenhang mit einem Lärmereignis steht. Zu diesem Zweck wurden die akustischen Daten und die Polysomnografie zeitlich synchronisiert aufgezeichnet. Eine 30 s Epoche mit Aufwachreaktion ist in Abbildung 2-38 dargestellt. Die plötzlich einsetzende Beschleunigung der EEG-Frequenz einhergehend mit Erhöhung des Muskeltonus und einer Zunahme der Herzfrequenz sind zu erkennen.

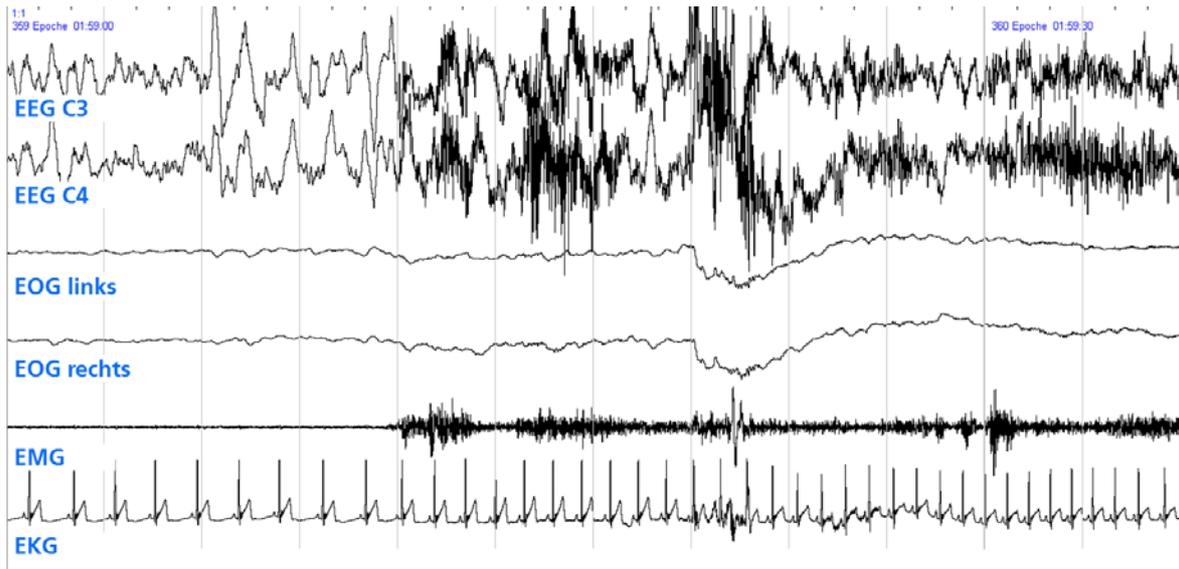


Abbildung 2-38: 30 s Epoche mit Aufwachreaktion aus dem Schlaf

### 2.5.3 Aktimetrie

Die motorische Aktivität wurde kontinuierlich mittels eines Aktimeters aufgezeichnet, der einen piezoelektrischen Bewegungsaufnehmer enthält und am nicht-dominanten Handgelenk getragen wurde.

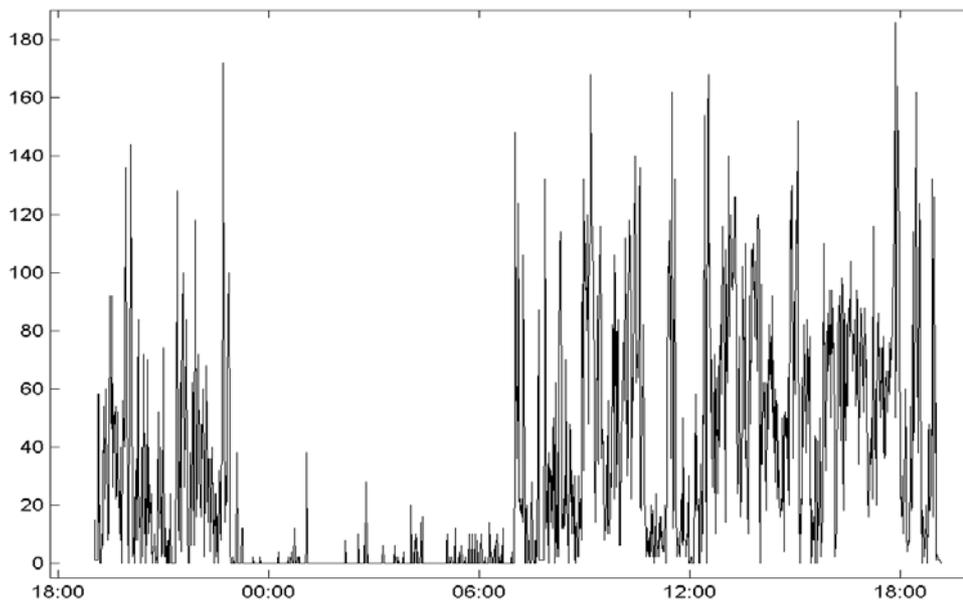


Abbildung 2-39: Ruhe-Aktivitätsmuster gemessen mit Hilfe der Aktimetrie.

Die Aktimetrie ist eine einfache Methode zum Langzeitmonitoring des Ruhe-Aktivitätsrhythmus. Schlaf-Wach-Phasen können recht zuverlässig erfasst werden. In der NORAH-Studie diente die Aktimetrie zusätzlich zum EKG dazu, eine vereinfachte Methodik zur Ermittlung vegetativ-motorischer Reaktionen zu entwickeln (Kapitel 2.6). Abbildung 2-39 gibt ein Beispiel für einen Ruhe-Aktivitätszyklus.

## 2.6 Weiterentwicklung einer einfachen Methodik zur Messung vegetativ - motorischer Reaktionen im Schlaf

Wie in Kapitel 2.5 dargelegt, ist die Messung und Auswertung polysomnografischer Größen sehr zeit- und kostenintensiv, was letztlich in der Praxis die Untersuchung nur relativ kleiner Stichprobengrößen erlaubt.

Aufwachreaktionen sind nun nahezu obligat mit Herzfrequenzbeschleunigungen und/oder Körperbewegungen verbunden. Im EEG werden selten aber auch Aufwachreaktionen detektiert, die nicht mit Herzfrequenzbeschleunigungen und/oder Körperbewegungen einhergehen bzw. es treten im Schlaf auch Herzfrequenzbeschleunigungen und Körperbewegungen auf, ohne dass damit eine Aufwachreaktion verbunden ist.



*Abbildung 2-40: Proband mit Messequipment für die Polysomnografiemessung (links) und Messequipment für die für die vegetativ-motorische Methode benötigte EKG- und Aktimetriemessung (rechts).*

Die stärkste Form der Störung des Schlafes ist die Aufwachreaktion. Bereits im Jahr 2008 hat das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR, in Zusammenarbeit mit der University of Pennsylvania, UPenn, mit Hilfe von vorwiegend Labordaten einen Algorithmus entwickelt, der Aufwachreaktionen anhand der EKG- und Aktimitrieaufzeichnungen vorhersagt (Basner et al., 2008a). Ein Ziel der NORAH-Schlafstudie ist es, mit Hilfe der EEG-, EKG- und Aktimitrieaufzeichnungen aus den Jahren 2011 und 2012 diesen

Algorithmus für Felddaten zu optimieren und diese Methode im Messzeitraum 2013 ausschließlich einzusetzen. Abbildung 2-40 zeigt das benötigte Equipment für die Polysomnografiemessung (links) und die vegetativ-motorische Methode (rechts). Für die Polysomnografiemessung muss ein qualifizierter Untersucher ca. 45 min am Abend und ca. 20 min am Morgen vor Ort sein. Die zwei Elektroden für die vegetativ-motorische Methode VMM kann der Proband selbstständig anbringen und die Messung starten.

### 2.6.1 Algorithmus zur Bestimmung von vegetativ-motorischen Reaktionen im EKG- und Aktimetersignal

Aufgabe des optimierten Algorithmus zur Auswertung der EKG- und Aktimetriedaten ist es, eine möglichst hohe Übereinstimmung mit der Anzahl und den Start- und Endzeiten der im EEG gefundenen Aufwachreaktionen zu finden.

DLR und UPenn haben dabei im Laufe des Jahres 2012 mit dem Datensatz der Probanden aus 2011 verschiedene Ansätze bzgl. Aufbereitung der Eingangsdaten, Finden eines optimalen Algorithmus zur Bestimmung von Aufwachreaktionen mit Hilfe des EKG- und Aktimetersignals und Bestimmung des Einschlaf- und Aufwachzeitpunkts verfolgt. Im Dezember 2012 erfolgte eine Bewertung der verschiedenen Ansätze und ein optimierter Algorithmus wurde erstellt.

#### Prinzipielles Vorgehen beim Auswerten der EKG- und Aktimetriedaten:

- Ein gleitender Median mit einem Zeitfenster von 3 Minuten wird vom Beat-to-Beat (jeder Herzfrequenzwert wird berücksichtigt) EKG-Signal bestimmt.
- Es wird die Differenz von jedem Herzfrequenzwert mit dem gleitenden Median gebildet.  
 Jede dieser Herzfrequenzdifferenzen ist mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit assoziiert, dass der momentane Herzschlag mit dem Beginn einer Aufwachreaktion verknüpft ist (je größer die Differenz, desto wahrscheinlicher). Diese Wahrscheinlichkeit findet mathematisch Ausdruck in sog. Likelihood Ratios. Diese werden für jeden von 34 aufeinander folgenden Herzschlägen bestimmt und miteinander multipliziert (das entspricht dem Durchführen von 34 aufeinanderfolgenden diagnostischen Tests). Die in diesem Algorithmus genutzte Tabelle der Likelihood Ratios basiert auf Aufwachreaktionen ermittelt aus den Daten der DLR-Feldstudie 2001/2002 am Köln-Bonner-Flughafen.
- Der Wert, der aus der Multiplikation erhalten wird, wird dann mit einem voreingestellten Schwellenwert verglichen. Wird der Schwellenwert überschritten, wird die Herzfrequenzerhöhung auf eine Aufwachreaktion zurückgeführt.
- Nachdem in dieser Weise sämtliche Aufwachreaktionen im EKG identifiziert wurden, werden die Anfangs- und Endzeiten korrigiert. Hierzu werden für jeden betrachteten Herzfrequenzwert die Differenzen bis sieben Herzfrequenzwerte vorher gebildet und aufsummiert. Genauso wird verfahren mit den bis zu 8 Herzfrequenzwerten nach dem betrachteten Herzfrequenzwert. Der Quotient aus

beiden Summen wird gebildet und Anfangs- und Endzeit der betrachteten Aufwachreaktion damit korrigiert.

- Im nächsten Schritt werden Aufwachreaktionen anhand der Körperbewegungsdaten berechnet. Aus dem mit 32 Hz-Abtastrate aufgezeichneten Signal wird für jede Sekunde die Summe aus der quadrierten Ableitung des Signals gebildet.
- Anschließend wird eine ähnliche Prozedur wie bei den EKG-Daten angewandt. Likelihood Ratios werden multipliziert, Aufwachreaktionen bei Überschreiten eines Grenzwertes identifiziert und Anfangs- und Endzeit korrigiert.
- Sämtliche Aufwachreaktionen, die der Algorithmus im EKG- und Aktimetersignal identifiziert hat, werden in einem nächsten Schritt kombiniert. Liegt das Ende einer Aufwachreaktion  $< 10$  s vor dem Anfang einer neuen Aufwachreaktionen, werden beide zu einer Aufwachreaktion zusammengefasst.
- Für die Berechnung von Einschlaf- und Aufwachzeitpunkten werden sowohl das EKG- als auch das Aktimetersignal herangezogen. Für den Schlafbeginn muss bei geringer Körperbewegung der Quotient aus Herzrate und gleitender Mittelwert (Fenster 20 min) für 90 s vor und 90 s nach dem betrachteten Zeitpunkt einen Schwellenwert unterschreiten. Zur Bestimmung des Aufwachens muss der Quotient aus Körperbewegung und Herzrate unter einem bestimmten Schwellenwert für 90 s vor dem betrachteten Zeitpunkt liegen und diesen Schwellenwert ab dem betrachteten Zeitpunkt überschreiten.

Der beschriebene Algorithmus wurde in ein mit Hilfe von MATLAB, R2012b entwickeltes Softwarepaket umgesetzt.

### 2.6.2 Übereinstimmungsmaß „Cohens Kappa“

Die Maßzahl „Cohens Kappa“ ist eine Maßzahl zur Beschreibung der Urteilsübereinstimmung zweier Methoden (Landis et. al 1977). Sie ist anwendbar auf Nominalskalen (hier: Aufwachreaktion, keine Aufwachreaktion).

Die Autoren des Originalartikels legen folgende Kappa-Werte zur Beurteilung der Stärke der Übereinstimmung zweier Methoden fest:

*Tabelle 2-4: Beurteilung der Stärke der Übereinstimmung zweier Methoden mit Hilfe von „Cohens Kappa“*

Kappa Statistic	Strength of Agreement
$< 0.00$	Poor
0.00-0.20	Slight
0.21-0.40	Fair
0.41-0.60	Moderate
0.61-0.80	Substantial
0.81-1.00	Almost Perfect

Im Projekt wurde festgelegt, dass ein Kappa  $\geq 0,81$  („almost perfect“) anzustreben ist, um die vegetativ-motorische Methode in 2013 im Feld einsetzen zu können.

### 2.6.3 Validierung

Die Berechnung der Aufwachreaktionen mit Hilfe der EKG-/Aktimetriesignale (vegetativ-motorische Methode) erfolgte mit dem in Kapitel 2.6.1 beschriebenen Algorithmus.

Alle Methoden zur Bestimmung der Aufwachreaktionen wurden einander gegenübergestellt und hierfür jeweils die Sensitivität, die Spezifität und Cohens Kappa berechnet. Als Maß für die im EEG visuell ermittelten Aufwachreaktionen wurden die Konsensusarousal bestimmt.

Die Auswertung der Daten aus 2011 ergab ein „Cohens Kappa“ als Maß für die Übereinstimmung von Konsensusarousal und vegetativ-motorischer Methode von **0,87**, was einem „almost perfect“ entspricht und somit über der geforderten Grenze von 0,81 liegt.

*Tabelle 2-5: Entwicklung Alternativalgorithmus an Auswertung der EEG-Daten aller Probanden aus 2011 (106 Nächte)*

	Sensitivität	Spezifität	Cohens Kappa
DLR EEG-visuelles Scoring vs. vegetativ-motorische Methode EKG / Aktimetrie	0,788	0,980	0,768
UPenn EEG-visuelles Scoring vs. vegetative-motorische Methode EKG / Aktimetrie	0,814	0,977	0,791
<b>Konsensusarousal vs. vegetativ-motorische Methode EKG / Aktimetrie</b>	<b>0,891</b>	<b>0,977</b>	<b>0,868</b>
DLR EEG-visuelles Scoring vs. UPenn EEG-visuelles Scoring	0,773	0,997	0,770
UPenn EEG-visuelles Scoring vs. DLR EEG-visuelles Scoring	0,801	0,992	0,793

Um den Algorithmus zu validieren, wurde der Datensatz aller in 2012 neu untersuchten Probanden verwendet (insgesamt 86 in der Berechnung genutzte Nächte). Für diesen Validierungsdatensatz konnte ein „Cohens Kappa“ von **0,88** zwischen den Konsensusarousal und der vegetativ-motorischen Methode erzielt werden.

Tabelle 2-6: Validierung Alternativalgorithmus an Auswertung der EEG-Daten aller neuen Probanden aus 2012 (86 Nächte)

	Sensitivität	Spezifität	Cohens Kappa
DLR EEG-visuelles Scoring vs. vegetativ-motorische Methode	0,888	0,964	0,852
UPenn EEG-visuelles Scoring vs. vegetativ-motorische Methode	0,828	0,967	0,796
Konsensusarousal vs. vegetativ-motorische Methode EKG / Aktimetrie	0,921	0,963	0,884
DLR EEG-visuelles Scoring vs. UPenn EEG-visuelles Scoring	0,941	0,994	0,935
UPenn EEG-visuelles Scoring vs. DLR EEG-visuelles Scoring	0,571	0,998	0,569

Bei der Analyse des Datensatzes aus 2012 stellte sich heraus, dass der direkte Vergleich der visuellen Scorings der Aufwachreaktionen in den EEG-Daten von DLR und UPenn anders als bei der Auswertung des Datensatzes aus 2011 nur zu einem Cohens Kappa von 0,57 führte (Tabelle 2-6, letzte Zeile). Die Gründe für die Unterschiede können vielfältiger Natur sein. Arousal werden im EEG aufgrund der Beschleunigungen in den Signalen visuell detektiert. Beschleunigungen >15 s werden als Aufwachreaktionen klassifiziert. Liegt z.B. ein Auswerter bei der Bestimmung von einem Arousal knapp unter 15 s, der andere knapp darüber, so wird im ersten Fall keine, im zweiten Fall sehr wohl eine Aufwachreaktion bestimmt. Zur Problematik des Interrater-Vergleichs bei der visuellen EEG-Auswertung siehe auch (Basner et al. 2008b).

## 2.7 Subjektive Reaktionen: verwendete Fragebögen und Skalen

Kaida et al. (2006) verweisen auf die konsistenten Zusammenhänge zwischen polysomnografischen Schlafdaten und Erhebungen subjektiver Schlafparameter (siehe auch Åkerstedt et al. 1994; Barwick et al. 2011). Verschiedene Fragebögen und Skalen zur Messung der aktuellen Müdigkeit und Schläfrigkeit sowie zum Schlafempfinden der Probanden haben in der NORAH-Schlafstudie die objektiven Schlafuntersuchungen durch eine subjektive Komponente ergänzt.

**Messung der subjektiven Schläfrigkeit und Müdigkeit.** Nach Åkerstedt et al. (1994) bestehen hohe Korrelationen zwischen polysomnografischen Messungen (EEG, EOG) und subjektiver Schläfrigkeit. Daher besitzen psychometrische Messverfahren zur Schläfrigkeit eine ausreichende kriteriumsbezogene Validität. In der NORAH-Schlafstudie wurden aktuelle Schläfrigkeits- als auch Müdigkeitsbewertungen<sup>7</sup> als Indikatoren für eine

<sup>7</sup> Die Begriffe Müdigkeit (im Englischen Fatigue) und Schläfrigkeit (im Englischen Sleepiness oder Drowsiness) werden oft synonym verwendet, in der Literatur jedoch inhaltlich voneinander abgegrenzt: Schläfrigkeit beschreibt den Grad der Wachheit einer Person und wird direkt der

schlafgestörte Nacht herangezogen. Die Einstufungen erfolgten jeweils morgens unmittelbar nach dem Aufstehen. Die subjektive Müdigkeit wurde durch einen standardisierten Fatigue-Fragebogen (FAT) erfasst, der in der deutschen Übersetzung des amerikanischen Originals verwendet wurde (Samn & Pirelli 1982).<sup>8</sup> Der FAT beschreibt zehn unterschiedliche Stadien von Müdigkeit, welche auf einer dreistufigen Skala zu beantworten sind. Die erreichten Punkte werden aufsummiert. Dieser Wert (von 0 = „hellwach“ bis 20 = „todmüde“) wird dann in vier Müdigkeitsstufen eingeteilt (keine Ermüdung, milde Ermüdung, moderate bis erhebliche Ermüdung, erhebliche Ermüdung). Neben dem FAT wurde die Karolinska Sleepiness Scale (KSS) zur Messung der aktuellen subjektiven Schläfrigkeit in der NORAH-Schlafstudie eingesetzt (Åkerstedt & Gillberg 1990). Bei der KSS handelt es sich um ein validiertes Standardverfahren in der experimentellen und klinischen Schlafforschung zur Messung der Schläfrigkeit, das ursprünglich aus der Stanford Sleepiness Scale von Hoddes, Dement und Zarcone (1972) hervorgeht. Die KSS misst über eine neunstufige Skala den momentanen Schläfrigkeitsgrad mit einer Abstufung von 1 (sehr wach) bis 9 (sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend).

**Schlafbewertung und Messung des Chronotyps.** Visuelle Analogskalen (VAS) werden häufig in der experimentellen und klinischen Schlafforschung zur Erfassung psychologischer Dimensionen angewendet, die als schlafassoziierte Parameter angesehen werden wie etwa die subjektive Einschätzung von Wachheit, Erholung oder Schlafqualität (Becker-Carus 2004). Mittels VAS aus einem Fragebogen von Griefahn, Marks & Robens (2006) wurden auch in der NORAH-Schlafstudie verschiedene Dimensionen des Schlafs, d.h. der Vorgang des Einschlafens am Abend (leicht - schwer) und des Wachwerdens am Morgen (leicht -

---

zentralnervösen Aktivierung zugeordnet. Sie unterliegt der zirkadianen Rhythmik (Chipman & Jin 2009; Zully et al. 1995). Eine schläfrige Person verspürt einen erhöhten Schlafdrang (Zully et al. 1995). In Situationen mit erhöhten psychischen und körperlichen Belastungen wird dieser Schlafdrang kompensiert. In Situationen, in denen Schlaf möglich ist, tritt Schlaf ein. Eine erhöhte Schläfrigkeit kann sich auf die Leistungsfähigkeit des Menschen auswirken. Eine Verringerung der Schläfrigkeit gelingt nur durch erholsamen Schlaf (Spath 2004; Zully et al. 1995; Zully & Knab 2009). Müdigkeit beschreibt eine Abnahme der körperlichen und kognitiven Leistungsfähigkeit einer Person als Folge von Tätigkeiten. Im Gegensatz zur Schläfrigkeit entsteht Müdigkeit vorwiegend durch externe Einflussfaktoren wie etwa die Art und Dauer einer Aufgabe. Müdigkeit ist durch Gefühle von Erschöpfung, Mattigkeit oder Überforderung charakterisiert. Der Begriff der Müdigkeit ist damit einerseits vom Begriff der Schläfrigkeit abzugrenzen, kann aber gleichzeitig mit Schläfrigkeit assoziiert sein. Entsprechend werden in der Literatur hohe Zusammenhänge zwischen Müdigkeits- und Schläfrigkeitsskalen beschrieben, obwohl die Begriffe inhaltlich voneinander getrennt werden (Samel et al. 1997a,b; Samn & Perelli 1982).

<sup>8</sup> Der FAT basiert ursprünglich auf dem Anliegen, Flugdienste und Arbeitsprozesse der U.S. Air Force Transportflugzeugpiloten zu optimieren, um mentale Leistungseinbußen durch Müdigkeit zu minimieren und damit die Flugsicherheit zu gewährleisten. Der FAT kam bereits in vielen Studien sowohl in der militärischen als auch in der zivilen Luftfahrt sowie in Untersuchungen zur Fahrtauglichkeit von LKW-Fahrern zum Einsatz (Åkerstedt et al. 2008; Desmond & Matthews 2009; Golz et al. 2010; Müller & Larisch 2012; Niederl 2007, Reinprecht 2013) und hat in der Ermüdungsforschung generell eine hohe Akzeptanz aufgrund seiner Praktikabilität gefunden (Richter et al. 2005; Samel et al. 1986; Samel, Wegmann & Vejvoda 1997a,b). Die in diesen Studien publizierten Müdigkeitswerte sollen Anhaltspunkte zur Einordnung der Ergebnisse aus den NORAH-Schlafuntersuchungen liefern, da es bisher keine publizierten Werte aus der Lärmwirkungsforschung gibt. Eine milde Ermüdung mit einem Wert  $\geq 12$  auf der FAT-Skala gilt bereits als bedenklich bei der Flugtauglichkeitsprüfung von Piloten (Niederl 2007).

schwer), die empfundene Schlafdauer (zu kurz - zu lang) und Schlaftiefe (tief - leicht), der Erholungswert des Schlafs (groß - gering) und die Bewegungshäufigkeit bzw. motorische Unruhe während der Nachtruhe (gering - groß) subjektiv bewertet.<sup>9</sup> Die Probanden sollten außerdem angeben, ob, wie oft und ggf. warum sie nachts aufgewacht sind. Die Klassifikation des sogenannten Chronotyps erfolgte einmalig nach Abschluss der Studien mit Hilfe der deutschen Fassung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg (1976) (Griefahn et al. 2001; Griefahn 2002) (siehe auch Kapitel 0).

**Messung der Belästigung.** Es wurden die Empfehlungen zur Lärmbelastigungsmessung der IC BEN berücksichtigt (Felscher-Suhr et al. 2000; Fields et al. 2001). Die generelle Belästigung durch Fluglärm im Sinne einer Langzeitbelästigung wurde vor der NORAH-Schlafstudie anhand einer 5-stufigen Antwortskala (von „1 = nicht“ bis „5 = sehr“ belästigt) erhoben. Die Langzeitbelästigung durch Fluglärm wurde nur einmalig erfragt. Im Jahr 2013 wurde zusätzlich die akute Belästigung durch nächtlichen Fluglärm der vorausgegangenen Nacht an jedem Morgen nach dem Aufstehen retrospektiv ermittelt. Die dazugehörige Frage lautete: „Wie stark wurden Sie durch den Fluglärm der vergangenen Nacht belästigt?“. Die Beantwortung erfolgte anhand der genannten 5-stufigen Skala (von „1 = nicht“ bis „5 = sehr“ belästigt).

**Messung von personenbezogenen und psychologischen Einflussgrößen.** Folgende nicht-akustische Variablen wurden außerdem fragebogenbasiert (in der Regel anhand von 5-stufigen Antwortskalen) ermittelt:

- Lärmempfindlichkeit (Erfassung anhand des Lärmempfindlichkeitsfragebogens von Zimmer & Ellermeier (1998, 1999) sowie mittels einer 1-Item-Abfrage)
- subjektive Gewöhnung an Fluglärm
- Beteiligung an Aktivitäten gegen Fluglärm
- Langzeitbelästigung durch Fluglärm vor der Studie (Vorbelästigung)
- generelle Einstellung gegenüber dem Flugverkehr
- Überzeugung, dass Chancen auf erfolgreiche Fluglärmreduktion bestehen
- generelles Lautstärkeempfinden in der eigenen Wohngegend (d.h. nicht nur bezogen auf den Fluglärm)
- Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs in der eigenen Wohngegend

Die aufgeführten personenbezogenen und psychologischen Größen wurden sowohl zur Stichprobenbeschreibung als auch in den statistischen Analysen verwendet.

Zu folgenden Zeitpunkten im Verlauf der NORAH-Schlafstudie wurden die genannten Fragebögen und Skalen eingesetzt:

- vor Durchführung der Schlafstudie (in Papier-Version): Erhebung der Langzeitbelästigung durch Fluglärm,

<sup>9</sup> Da in der NORAH-Schlafstudie die Beantwortung der VAS mit Hilfe von Netbooks erfolgte, wurden zur Einstufung Schieberegler verwendet. Es ist zu beachten, dass aufgrund der Nutzung unterschiedlicher Netbooks in den drei NORAH Untersuchungsjahren die Skalen in nicht einheitlicher Länge präsentiert wurden, die Bewertung erfolgte daher prozentual.

- während der Schlafstudie jeden Morgen nach dem Aufstehen (am Notebook): FAT, KSS, VAS, subjektive Aufwachhäufigkeit, akute Belästigung durch Fluglärm der vergangenen Nacht (letzteres nur im Jahr 2013),
- nach Abschluss der Schlafstudie (in Papier-Version): ein Fragebogen zur Erhebung der aufgeführten nicht-akustischen Einflussgrößen sowie je ein Fragebogen zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit (Zimmer & Ellermeier 1998, 1999) und des Chronotyps (Griefahn et al. 2001; Griefahn 2002).

## 2.8 Statistische Verfahren

### 2.8.1 Ermittlung von Aufwachreaktionen aus der Polysomnografie

Aufwachreaktionen ermöglichen es, eine zeitliche Assoziation zwischen Fluglärm und seiner direkten Wirkung auf den Schlaf herzustellen. Zum einen können fluglärmassoziierte Aufwachhäufigkeiten berechnet werden. Zum anderen ist es Ziel dieser Untersuchungen, eine Expositions-Wirkungsbeziehung des nachts einwirkenden Fluglärms auf die Aufwachwahrscheinlichkeit zu erstellen.

Das Ereignis „Aufwachen“ wird im Folgenden in zwei unterschiedlichen Definitionen verwendet: Durch Probleme bei der Datenerfassung im Jahr 2011 (siehe Anhang A als Begründung für das Vorgehen sowie zur detaillierten Dokumentation des Messproblems) wurde für den Vergleich der polysomnografischen Ergebnisse aus den Jahren 2011 und 2012 das Aufwachen als ein Wechsel in das Stadium Wach aus jeglichem Nicht-Wach-Zustand angesehen.

Zum Vergleich der Daten aus dem Jahr 2012 mit den Ergebnissen am Flughafen Köln-Bonn 2001/2002 wird das Aufwachen als ein Wechsel in die Stadien Wach oder S1 aus jedem tieferen Schlafstadium bewertet. Dies entspricht der bisherigen Auswertung der Köln-Bonner-Fluglärmstudie (Basner et al. 2006), deren Aufwachwahrscheinlichkeit in den Frankfurter Nachtindex eingeht.

### 2.8.1 Ereigniskorrelierte Auswertung

Für die ereigniskorrelierte Auswertung wird eine Epoche als „erste Fluglärmepoche“ definiert, wenn ein Fluglärmereignis innerhalb von 15 s nach Beginn der Epoche startet. Daraufhin werden die Lärmepoche und die nächsten beiden Epochen auf eine Aufwachreaktion (Wechsel nach „Wach“ oder „S1“) hin überprüft, siehe dazu auch Abbildung 2-41. Dadurch ist das Lärmfenster, welches auf eine Aufwachreaktion überprüft wird 90 s lang.

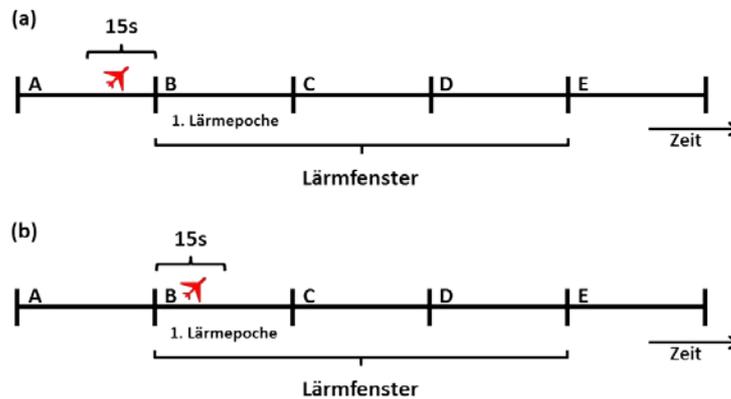


Abbildung 2-41: Definition der 1. Lärmepoche. Die vertikalen Balken stellen jeweils Start und Ende einer 30 s - Epoche dar. Das rote Flugzeug symbolisiert den Start eines Fluglärmeignisses. Sowohl in Bild (a) als auch in Bild (b) beginnt das Fluglärmeignis innerhalb von 15 s nach dem Start von Epoche B. Daher ist in beiden Fällen diese Epoche die 1. Lärmepoche und Epochen B, C und D werden auf eine Aufwachreaktion überprüft.

Ein Fluglärmeignis wird ausgeschlossen, wenn der Proband in der Epoche vor der 1. Lärmepoche bereits wach ist. Dies bedeutet folgerichtig auch, dass nur Fluglärmeignisse, die während der Schlafperiodendauer auftreten, in die Analyse mit eingehen.

## 2.8.2 Univariate Analyse

Zur deskriptiven Beschreibung der Stichprobe werden die relevanten Daten (u.a. Anzahl der Fluglärmeignisse und Anzahl der beobachteten Aufwachreaktionen) sowohl grafisch als auch durch die Angabe verschiedener Lage- und Streuungsmaße (arithmetisches Mittel, Standardabweichung, Median, Minimum, Maximum) dargestellt. Zusätzlich werden die zur Beurteilung der Schlafstruktur wichtigen Größen mittels Box-Whisker-Plots für die verschiedenen Jahre, Bettzeitgruppen im Jahr 2012 und Flughäfen miteinander verglichen. Hierbei werden auch die Mittelwerte in den verschiedenen Gruppen auf signifikante Unterschiede getestet. Da für jeden Probanden mehrere Nächte pro Jahr vorliegen und außerdem dieselben Probanden in mehreren Jahren teilnahmen und somit messwiederholt untersucht wurden, werden diese Mittelwerte anhand der Methode der verallgemeinerten Schätzungsgleichungen (generalized estimating equations; GEE; (Liang & Zeger 1986)) miteinander verglichen. Für multiple Tests wird mittels Holm's step-down procedure (Holm 1979) korrigiert. Im Folgenden wird das Signifikanzniveau mit 5 % festgesetzt.

Zur Beschreibung der subjektiven Daten (z.B. subjektive Aufwachhäufigkeit, Schlaferholung, Müdigkeit (FAT), Schläfrigkeit (KSS), akute Belästigung durch Fluglärm) werden je nach Skalenniveau ebenfalls verschiedene Lage- und Streuungsmaße (prozentuale Häufigkeitsverteilungen, arithmetischer Mittelwert, Standardabweichung) unter Verwendung unterschiedlicher Abbildungsarten (Säulendiagramme, Box-Whisker-Plots) verwendet.

### 2.8.3 Multivariable Regressionsanalyse

Für die Erstellung der Expositions-Wirkungsbeziehung bzgl. der Aufwachreaktion ist es zunächst erforderlich die Aufwachwahrscheinlichkeit zu berechnen. Die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel des Fluglärmereignisses und anderer Einflussvariablen erfolgt mit Hilfe eines Regressionsmodells. Da die Aufwachreaktionen eines Probanden mehrmals in einer Nacht stattfinden können und über mehrere Nächte verteilt sind, liegen Messwiederholungen vor. Zusätzlich ist die abhängige Variable dichotom (Aufwachreaktion ja/nein). Daher wird als Regressionsmodell eine logistische Regression mit Zufallseffekten (random effects logistic regression) verwendet (Diggle et al. 2002). Die logistische Regression erlaubt es, Wahrscheinlichkeitswerte in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren im Sinne von Expositions-Wirkungskurven zu berechnen.

Die Auswahl der Einflussvariablen, die in das Regressionsmodell eingehen, wird mittels Stepwise-Selection (Hosmer & Lemeshow 2000) durchgeführt. Man startet hierfür mit einem Intercept-Modell und in jedem Schritt wird eine Variable hinzugefügt oder eine Variable entfernt. Die Entscheidung, ob eine Variable in das Modell aufgenommen oder entfernt wird, geschieht anhand des AICs (Akaike Information Criterion), das eine Maßeinheit für die Anpassungsgüte eines Regressionsmodells ist (Pinheiro & Bates 2009). Diese Prozedur wird solange wiederholt, bis keine Verbesserung mehr hinsichtlich des AICs stattfindet.

Zusätzlich wird für die metrischen Variablen die Annahme der Linearität auf der logit-Skala überprüft. Dies geschieht zum einen durch deskriptive grafische Verfahren, zum anderen wird getestet, ob eine Transformation der metrischen Variablen die Modellgüte basierend auf den AIC verbessert, z.B. durch quadratische und kubische Terme oder logarithmische und Wurzel-Transformationen (Hosmer et al. 2000). Des Weiteren wird untersucht, ob Interaktionen zwischen den Einflussvariablen, die durch die Stepwise-Selection gefunden wurden, vorliegen. Dies erfolgt ebenfalls mittels des AICs.

Eine Vielzahl akustischer, persönlicher und situativer Variablen können einen potentiellen Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit haben. Für die Berechnung der Expositions-Wirkungsbeziehungen wurde der Einfluss folgender Variablen auf die Güte der Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit überprüft:

#### Akustische Parameter:

- $L_{ASmax}$  des Fluglärmereignisses (in dB(A))
- Dauer des Fluglärmereignisses (in s)
- Pegelanstiegssteilheit des Fluglärmereignisses (in dB(A)/s)
- $L_{ASeq}$  10 min vor Beginn des Fluglärmereignisses (in dB(A))
- $L_{ASeq}$  eine Minute vor Beginn des Fluglärmereignisses (in dB(A))
- $L_{ASeq}$  des Fluglärmereignisses (in dB(A))
- Schallereignispegel des Fluglärmereignisses (in dB(A))

- bisherige Anzahl an Fluglärmereignissen vor Beginn des Fluglärmereignisses
- Abstand zum Ende des vorhergehenden Fluglärmereignisses (in min)
- Abstand zum Ende des vorhergehenden Lärmereignisses (allgemein) (in min)

#### Personenbezogene Parameter:

- Geschlecht
- Alter

#### Situative Parameter:

- bisher verstrichene Schlafdauer (in 30 s Epochen)

#### Weitere Parameter:

- Studienjahr (2011 versus 2012)
- Bettzeitgruppe (2011 versus 2012: Bettzeitgruppe 1 und 2)

Für die Erstellung einer Expositions-Wirkungsbeziehung für vegetativ-motorische Reaktionen, wird die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion ebenfalls durch eine logistische Regression mit Zufallseffekten berechnet. Die Analyse erfolgt analog zur oben beschriebenen Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit.

Die erhobene akute Belästigung durch Fluglärm der vorausgegangenen Nacht wird in der regressionsbasierten Auswertung ebenfalls als dichotome Größe behandelt (belästigt ja/nein)<sup>10</sup>. Es liegen auch hier Messwiederholungen vor, weil jeder Proband mehrfach befragt wurde und mit mehreren Werten in die Analyse eingeht. Aus diesen Gründen wird für die Berechnung einer Exposition-Wirkungsbeziehung bezüglich des Effekts von Fluglärm auf die akute Belästigung, ähnlich wie für die Aufwachwahrscheinlichkeit, eine logistische Regression mit Zufallseffekten verwendet mit den gleichen Analyseschritten wie oben beschrieben. Die Analyse der akuten Belästigung wird nur für Messdaten aus 2013 durchgeführt, da die dafür erforderlichen Belästigungsdaten nur im Jahr 2013 erhoben wurden.

Expositions-Wirkungskurven zu subjektiven Schlafstörungen werden ebenso mit regressionsbasierten Verfahren für messwiederholte Daten berechnet. Alle Schlafvariablen werden als kontinuierliche Größen behandelt, auch wenn sie auf ordinalem Skalenniveau

---

<sup>10</sup> Gemäß des so genannten Schultz-Kriteriums (1978) (d.h. ein Anteil von etwa 28 % erheblich bzw. ziemlich Belästigter (highly annoyed)) wurden zur Erstellung der dichotomen abhängigen Belästigungsvariablen die Stufen 3, 4 und 5 der ursprünglichen Antwortskala zusammengefasst (Vorliegen einer Belästigung durch Fluglärm). Eine Einschränkung auf den Anteil der Personen, die erheblich durch Lärm belästigt sind (bei einer 5-stufigen Skala die Kategorien 4 und 5) erschien nicht sinnvoll, da dadurch der (quantitativ ebenfalls bedeutende) Teil der Betroffenen, deren Lärmbelästigung im mittleren Bereich der verwendeten Antwortskala liegt, ignoriert wird. Die beiden unteren Skalenstufen indizierten keine Belästigung.

wie der FAT und die KSS gemessen wurden (Quehl & Basner 2005a,b, 2006). Bei der Modellierung der Variablen wird die Methode der verallgemeinerten Schätzungsgleichungen (generalized estimating equations; GEE) nach Liang und Zeger (1986) mit Einheitslinkfunktion zugrunde gelegt. Diese Methode benötigt die Normalverteilungsannahme nicht. Es werden die für die Aufwachwahrscheinlichkeit und Belästigung beschriebenen Analyseschritte (Auswahl der Einflussfaktoren, Überprüfung der Linearität und der Interaktionen) durchgeführt, allerdings wird das Quasi-AIC ( $QIC_u$ ) anstatt des AICs verwendet. Das  $QIC_u$  ist die AIC äquivalente Maßeinheit für die Anpassungsgüte eines GEE Models (Hardin & Hilbe 2002; Pan 2001). Zusätzlich werden Variablen, die auf dem Signifikanzniveau von 5 % nicht statistisch signifikant sind, aus dem Modell entfernt.

Bei der Berechnung der Expositions-Wirkungsbeziehungen für alle subjektiven Schlafstörungen sowie die akute Belästigung durch Fluglärm werden folgende Parameter berücksichtigt:

#### Fluglärmspezifische Parameter

- Anzahl an Fluglärmereignissen pro Nacht
- energieäquivalenter Dauerschallpegel  $L_{ASeq}$  bezogen auf alle Fluglärmereignisse pro Nacht gemessen am Ohr des Schlafers

#### Psychologische Parameter

- Lärmempfindlichkeit
- Fluglärmvorbelastung im Sinne einer Langzeitbelastung
- Gewöhnung an Fluglärm
- allgemeines Lautstärkeempfinden in der Wohngegend

#### Personenbezogene Parameter

- Alter
- Geschlecht
- Chronotyp
- Belastungsänderung (d.h. alt belastet vs. neu belastet durch Fluglärm)<sup>11</sup>

In den Ergebnistabellen werden die Effektschätzer unstandardisiert und standardisiert dargeboten. Die Standardisierung findet hierbei wie in Gelman (2008) beschrieben statt. Numerische Variablen werden demnach zentriert und durch zwei Standardabweichungen dividiert, kategoriale Variablen bleiben unverändert. Nach Gelman (2008) werden dadurch die standardisierten Effektschätzer von numerischen und kategorialen Größen vergleichbar. Zusätzlich werden die Prädiktoren in den Regressionsmodellen auf Multikollinearität überprüft.

<sup>11</sup> Die Differenzierung zwischen alt und neu belasteten Anwohnern wurde nur für das Jahr 2013 vorgenommen, da in den Untersuchungsjahren 2011 und 2012 alle Probanden alt belastet waren.

Die statistischen Auswertungen wurden mit Hilfe der Softwarepakete R (Version 3.1) (R Core Team, 2014), SAS (Version 9.2) (SAS Institute, 2008) und SPSS (Version 21) (IBM Corp, 2012) vorgenommen.

#### 2.8.4 First Night Effect

Durch die zahlreichen Messinstrumente, die zur Aufzeichnung der Polysomnografie am Probanden angebracht werden, hat es sich etabliert, die erste untersuchte Nacht als Gewöhnungsnacht (Adaptationsnacht) nicht in die Analysen einzubeziehen. Agnew et al. (Agnew et al. 1966) zeigten, dass sich nur diese erste Nacht signifikant von den weiteren Nächten unterschied. Auch eine Untersuchung von Basner et al. (2000), die die Probanden über 13 Nächte hinweg beobachtete, ergab signifikante Unterschiede nur im Vergleich der ersten mit der zweiten Nacht. Lediglich die REM-Latenz (Zeitdauer zwischen Einschlafen und erstem Auftreten von REM) verkürzte sich weiter.

Somit wurde auch bei der Auswertung der Polysomnografie in NORAH der Jahre 2011 und 2012 die erste Nacht als Adaptationsnacht nicht in die Analysen einbezogen.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Physiologische Untersuchungen des Schlafs

#### 3.1.1 Ergebnisse: spontane Aufwachwahrscheinlichkeit

Es gehört zum normalen, physiologischen Schlafprozess während des Nachtschlafs auch ohne äußere Störeinflüsse zu erwachen. Wie in kontrollierten Laborstudien zu nächtlichem Verkehrslärm gezeigt werden konnte (Basner et al., 2011), wird ein Teil dieses Aufwachens durch lärmbedingte Aufwachreaktionen ersetzt, da der menschliche Organismus bestrebt ist, seine Schlafstruktur zu erhalten. Es könnte somit argumentiert werden, dass nur diejenigen Aufwachreaktionen als lärminduziert zu werten sind, die die natürliche Anzahl an Erwachen übersteigen (Basner et al., 2011). Unter der Annahme, dass spontane Wachphasen durch fluglärmassoziierte (= in zeitlichem Zusammenhang mit Fluglärm beobachtbare) Aufwachreaktionen ersetzt werden, wurde die Wahrscheinlichkeit, zusätzlich durch Fluglärm zu erwachen, aus der Differenz der fluglärmassoziierten und der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit berechnet. Da sich Lärmwirkungen im Labor normalerweise stärker ausprägen als im Feldversuch (Pearsons et al., 1995), (Horne et al., 1994), (Fidell et al., 1995) und es im Feldversuch bei lärmbelasteten Probanden keine lärmfreien Nächte gibt, aus denen die individuelle spontane Aufwachwahrscheinlichkeit bestimmt werden könnte, konnte in der Vergangenheit die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit durch komplexe Berechnungen näherungsweise bestimmt werden (Basner et al. 2006). Dabei wurde abgestimmt auf den Einschlafzeitpunkt in einer Lärmnacht geschaut, zu welchem Zeitpunkt Lärmereignisse stattfanden, um dann in den weiteren Lärmnächten zum gleichen Zeitpunkt zu bestimmen, ob der Proband spontan aufwachte, falls hier kein Lärmereignis zeitgleich eintrat. Durch Ermittlung der Aufwachwahrscheinlichkeit zu diesen Kontrollzeitpunkten konnte in einer logistischen Regression in Anlehnung an die Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit durch Lärm die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit berechnet werden (Brink et al. 2006).

In den NORAH-Studien konnte auf diese Weise die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit nicht sicher berechnet werden, da eine zu geringe Anzahl an untersuchten Nächten mit einem zu dichten Verkehrsaufkommen in den Randstunden vorlag.

Durch Untersuchung der Bettzeitgruppe 2 im Rahmen der NORAH-Studie im Jahr 2012, die ihren Zubettgeh-Zeitpunkt nach Beginn der Kernruhezeit hatte, ergab sich allerdings erstmals die Möglichkeit, die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit innerhalb der ersten sechs von Fluglärm ungestörten Schlafstunden zu bestimmen. Zur Berechnung einer spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit wurden im Zeitbereich von 23 Uhr bis 5 Uhr nur diejenigen Schlafepochen berücksichtigt, die ungestört von Fluglärm im Zeitraum von zwei Epochen vorher bis zur aktuellen Epoche waren. Das Auftreten anderer Geräusche wurde nicht ausgeschlossen. Die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit kann nun anhand zweier unterschiedlicher Konzepte definiert werden:

(1) Im definierten Zeitraum wird ein Wechsel aus dem Schlaf (S1-S4 und REM) in das Stadium Wach als spontanes Erwachen gewertet, wenn der Proband im Zeitraum von einer Epoche vorher bis zur aktuellen Epoche nicht bereits wach war. 53530 Epochen der Polysomnografie von 41 Probanden wurden nach diesem Kriterium analysiert. Für jede den Vorgaben entsprechende Schlafepoche wurde nun überprüft, ob der Proband spontan in das Stadium Wach wechselte. Die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit wurde mit einer logistischen Regression mit Messwiederholungen modelliert, die als Prädiktoren die verstrichene Schlafdauer und das Alter der Probanden beinhaltete (Tabelle 3-1). Die modellierte Aufwachwahrscheinlichkeit lag um 5:30 Uhr bei 2,4 % (verstrichene Schlafdauer: 814 Epochen, medianes Alter: 43 Jahre). Dieses Modell entspricht dem in Tabelle 3-6 berechneten Modell zur Darstellung der modellierten Aufwachwahrscheinlichkeit unter Fluglärm in den Studienjahren 2011 und 2012 ohne akustische Prädiktoren.

*Tabelle 3-1: Modellierung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit als Wechsel aus dem Schlaf in das Stadium Wach.*

	Schätzer	SF	p-Wert
Konstante	-4,872	0,215	< 0,001
verstrichene Schlafdauer	0,001	0,000	< 0,001
Alter	0,011	0,005	0,024

(2) Im festgelegten Zeitraum wird ein Wechsel aus einem tieferen Schlafstadium in das Stadium S1 oder Wach als spontanes Erwachen gewertet, wenn der Proband im Zeitraum von einer Epoche vorher bis zur aktuellen Epoche nicht bereits wach oder im Stadium S1 war. Für diese Analyse standen 50344 Epochen der Polysomnografie von 41 Probanden zur Verfügung. Für jede Schlafepoche, die von den Ausschlusskriterien nicht betroffen war, wurde überprüft, ob der Proband spontan in das Schlafstadium S1 oder Wach wechselte. Die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit wurde dann mit einer logistischen Regression mit Messwiederholungen modelliert. Das Modell enthielt als Prädiktoren die verstrichene Schlafdauer und das Schlafstadium in der vorherigen Epoche (Tabelle 3-2). Für die Regression der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit wurden folgende Annahmen getroffen: vorheriges Schlafstadium: S2, verstrichene Schlafdauer: 766 Epochen = 5:30 Uhr. Es ergab sich eine spontane Aufwachwahrscheinlichkeit von 3,6 %. Dieses Modell entspricht dem in Tabelle 3-7 berechneten Modell zur Darstellung der modellierten Aufwachwahrscheinlichkeit am Flughafen Frankfurt im Jahr 2012 im Vergleich zum Flughafen Köln-Bonn ohne akustische Prädiktoren.

Tabelle 3-2: Modellierung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit als Wechsel aus einem tieferen Stadium in die Stadien S1 oder Wach.

	Schätzer	SE	p-Wert
Konstante	-3,781	0,078	< 0,001
verstrichene Schlafdauer	0,001	0,000	< 0,001
Vorheriges Schlafstadium			
Schlafstadium 2	0,000	Referenzgruppe	
Schlafstadium 3 + 4	-0,381	0,073	< 0,001
Schlafstadium REM	0,161	0,068	0,019

Da die Modelle zur Berechnung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit und der fluglärmassoziierten Aufwachwahrscheinlichkeit methodisch nicht identisch sind, ist der Wert der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit als zusätzliche Information zu werten. Sie kann aber nicht von der fluglärmassoziierten Aufwachwahrscheinlichkeit abgezogen werden, um die fluglärminduzierte Aufwachwahrscheinlichkeit zu erhalten.

### 3.1.2 Auswirkungen der Kernruhezeit

#### 3.1.2.1 Fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen

In den Jahren 2011 und 2012 wurden insgesamt 8820 Fluglärmereignisse aufgezeichnet, die auf die Probanden während ihrer Schlafperiode einwirkten. Um eine Reaktion im Schlaf möglichst eindeutig auf ein Fluglärmereignis als Ursache zurückführen zu können, wurden solche Fluglärmereignisse von der weiteren Analyse ausgeschlossen, die 60 s vor bzw. 90 s nach Beginn des Lärmereignisses durch störende Geräusche beispielsweise von anderen Verkehrsträgern überlagert wurden. Geräusche, die durch den Probanden selbst verursacht waren (z.B. Schnarchen) bzw. gleichzeitig auftretende Geräusche mehrerer Flugzeuge führten nicht zum Ausschluss des Überflugeräuschs. In den Analysen dieses Kapitels (Kapitel 3.1.2) wurde eine Aufwachreaktion als der Übergang eines Schlafstadiums in das Stadium Wach definiert.

Tabelle 3-3: Überblick über Anzahl der Probanden, der Fluglärmereignisse und der Aufwachreaktionen

	NORAH 2011	NORAH 2012	Gesamt
Fluglärmereignisse	3946	4874	8820
Probanden*	49	79	90**
Fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen***	Ja: 319 (8,1%) Nein: 3627 (91,9%)	Ja: 374 (7,7%) Nein: 4500 (92,3%)	Ja: 693 (7,9%) Nein: 8127 (92,1%)

\* Probanden, für die sowohl akustische als auch polysomnografische Daten vorlagen.

\*\* Gesamt=Probanden 2012 plus Probanden 2011, die im Jahr 2012 nicht erneut teilnahmen.

\*\*\* Aufwachreaktion: Wechseln in das Stadium „Wach“ innerhalb von 90 s nach Eintreten eines Fluglärmereignisses.

Obwohl insbesondere solche Probanden ausgesucht wurden, die vorwiegend durch Fluglärm und wenig durch zusätzliche Geräuschquellen belastet waren, reduzierte sich die Anzahl, der für die Analyse verwendbaren Überflüge, auf 5978 ungestörte Geräusche (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Verwendete versus nicht verwendete Fluglärmereignisse

	NORAH 2011	NORAH 2012	Gesamt
Nicht-verwendete Fluglärmereignisse	1057 (26,8%)	1785 (36,6%)	2824 (32,2%)
Verwendete Fluglärmereignisse	2889 (73,2%)	3089 (63,4%)	5978 (67,8%)
Probanden*	48*	79	90
Fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen	Ja: 210 (7,3%) Nein: 2679 (92,7%)	Ja: 227 (7,3%) Nein: 2868 (92,7%)	Ja: 437 (7,3%) Nein: 5541 (92,7%)

\* Ein Proband hatte kein verwendetes Fluglärmereignis.

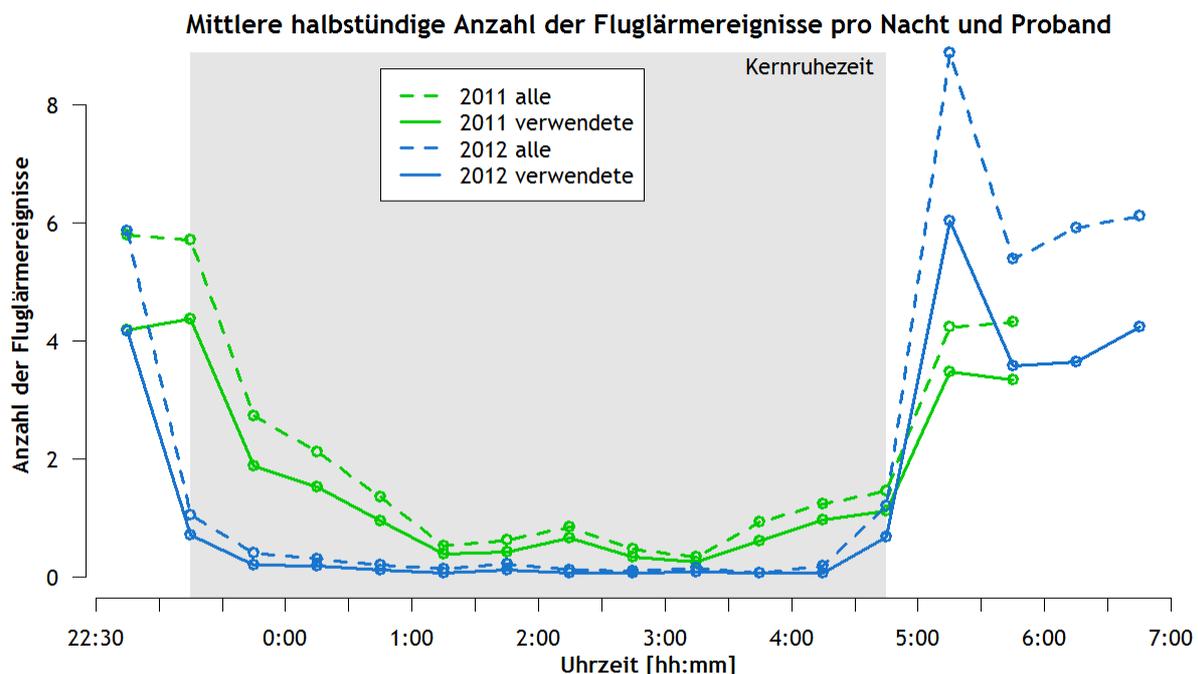


Abbildung 3-1: Verhältnis der Gesamtanzahl aller aufgezeichneten Fluglärmereignisse zur Anzahl für die Analyse verwendeter Fluglärmereignisse, die in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht dargestellt ist. Die graue Fläche zeigt die Kernruhezeit an. Etwa 15 min nach 23:00 Uhr überquerten die letzten Flugzeuge das Untersuchungsgebiet bzw. 15 min vor 5:00 Uhr überflogen die ersten Flugzeuge das Untersuchungsgebiet vor der Landung gegen 5:00 Uhr.

Abbildung 3-1 zeigt die für die Analyse verwendeten Fluglärmereignisse im Vergleich zur Gesamtanzahl der aufgezeichneten Fluglärmereignisse, zusammengefasst in Intervallen von je 30 min pro Nacht und Proband für die Jahre 2011 und 2012. Es wird deutlich, dass sich die Datenreduktion durch Analyse nur der verwendeten Geräusche im Wesentlichen gleichmäßig über die gesamte Nacht verteilt. Im Jahr 2011 gingen im Mittel 27

Fluglärmereignisse ( $\pm 18$  Standardabweichung (STD), min. 3 bis max. 108) pro Proband und Nacht in die Analyse ein, während im Jahr 2012 im Mittel 18 Fluglärmereignisse ( $\pm 15$  STD, min. 1 bis max. 64) pro Proband und Nacht verwendet wurden.

In zeitlichem Zusammenhang mit diesen Fluglärmereignissen wurden im Jahr 2011 im Mittel 2,0 Aufwachreaktionen ( $\pm 2,5$  STD, min. 0 bis max. 13) pro Proband und Nacht beobachtet. Im Jahr 2012 wachten die Probanden im Mittel 1,3 mal pro Nacht in zeitlicher Assoziation zu einem Überflug auf ( $\pm 2,4$  STD, min. 0 bis max. 26). Dies entspricht in beiden Jahren einer fluglärmassoziierten Aufwachhäufigkeit von 7,3 %.

Im Jahr 2011 wurden Probanden untersucht, die entsprechend ihrer gewohnten Schlafzeit zwischen 22:00 Uhr und 22:30 Uhr zu Bett gingen und zwischen 6:00 Uhr und 6:30 Uhr aufstanden. Die Daten von 38 dieser Probanden, die mit denselben Schlafzeiten im Jahr 2012 erneut an der Untersuchung teilnahmen, bilden im Folgenden die Bettzeitgruppe 1 des Jahres 2012. Auf diese Probanden wirkte somit im Jahr 2012 Fluglärm sowohl während der Einschlafphase als auch in der Aufwachphase ein. In zeitlichem Zusammenhang mit Fluglärm wurden bei diesen Versuchspersonen in 6,1 % der Fälle Aufwachreaktionen beobachtet (Tabelle 3-5). Um Informationen über die Auswirkungen des vermehrten Verkehrsaufkommens in den morgendlichen Randstunden nach Ende der Kernruhezeit auf den Schlaf zu gewinnen, wurden im Jahr 2012 weitere Probanden rekrutiert (N=41), die gemäß ihrer gewohnten Schlafzeit zwischen 23:00 Uhr und 23:30 Uhr zu Bett gingen, aber erst zwischen 7:00 Uhr und 7:30 Uhr aufstanden. Auf diese Weise lag die Einschlafphase dieser Probanden in der Kernruhezeit und war von Fluglärm weitgehend unbeeinflusst. Das Ende der Schlafperiode hingegen dehnte sich noch mindestens 2 Stunden über das Ende der Kernruhezeit hinweg aus, so dass der Einfluss des wieder einsetzenden Verkehrs am frühen Morgen auf diesen Teil des Schlafs untersucht werden konnte. In diesem Untersuchungskollektiv wurden in 8,1 % der Fälle fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen verzeichnet. Der Anteil an fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen war somit in Bettzeitgruppe 2 höher als in Bettzeitgruppe 1.

*Tabelle 3-5: Anzahl Probanden, verwendeter Fluglärmereignisse und fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen in den beiden Bettzeitgruppen in 2012*

	2011 Bettzeit 1	2012 Bettzeit 1	2012 Bettzeit 2
Probanden	48	38	41
Verwendete Fluglärmereignisse	2889	1196	1893
Fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen	210 (7,3%)	73 (6,1%)	154 (8,1%)

Bettzeitgruppe 1: Zubettgehzeit 22:00 - 22:30 Uhr; Aufwachzeit 6:00 - 6:30 Uhr; Bettzeitgruppe 2: Zubettgehzeit 23:00 - 23:30 Uhr; Aufwachzeit 7:00 - 7:30 Uhr; in der Bettzeitgruppe 1 des Jahres 2012 wurden die Probanden aus dem Jahr 2011 der Bettzeitgruppe 1 erneut untersucht.

Bei Betrachtung des Verhältnisses zwischen Fluglärmereignissen pro Nacht und der Aufwachhäufigkeit pro Nacht (Abbildung 3-2) wird deutlich, dass hier ein klarer Zusammenhang besteht. Den größten Nutzen durch die Kernruhezeit hatten die Probanden

im Untersuchungsjahr 2012 mit der Bettzeit 1, die durch den Einschlaf- und Aufstehzeitpunkt signifikant weniger Überflügen ausgesetzt waren und signifikant weniger häufig aufwachten als dies im Jahr 2011 der Fall war. Es wirkten auch signifikant weniger Fluglärmereignisse auf sie ein, als dies bei den Probanden der Bettzeit 2 der Fall war.

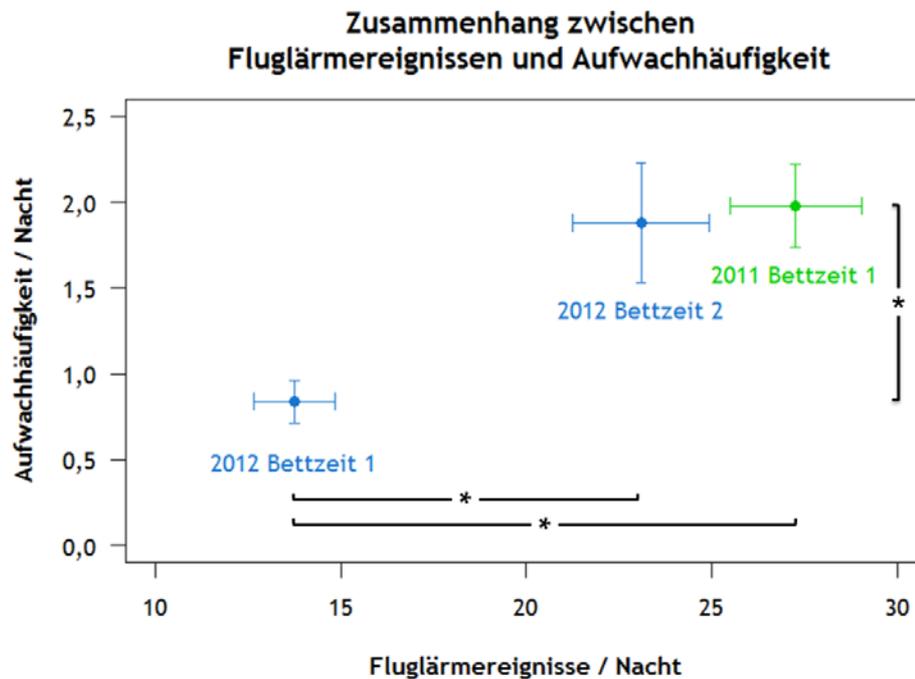


Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen mittlerer fluglärmassoziierter Aufwachhäufigkeit pro Nacht und der mittleren Anzahl der Fluglärmereignisse pro Nacht für die Probanden im Untersuchungsjahr 2011 sowie für Bettzeit 1 und Bettzeit 2 im Jahr 2012 mit Standardfehler in x- und y- Richtung. \* bezeichnet signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ), geprüft mittels GEE, adjustiert für multiples Testen nach Holm.

Im nächsten Schritt wurde untersucht, ob sich die Unterschiede im fluglärmassozierten Erwachen zwischen den Jahren und den Bettzeiten auf bestimmte zeitliche Intervalle im Verlauf der Nacht rückführen lassen. Abbildung 3-3 stellt in der oberen Hälfte die verwendeten Fluglärmereignisse im Vergleich der Jahre 2011 und 2012 dar, die sich in ihrer Anzahl pro halbstündigem Intervall nahezu über die gesamte Schlafdauer hinweg signifikant voneinander unterschieden. Bis in die Morgenstunden zwischen 4:30 Uhr und 5:00 Uhr hinein flogen im Jahr 2011 mehr Flugzeuge, erst danach traten im Jahr 2012 mehr Fluglärmereignisse auf als im Jahr 2011. In der unteren Hälfte der Grafik sind zum direkten Vergleich mit den oben dargestellten Fluglärmereignissen die im zeitlichen Zusammenhang mit diesem Fluglärm beobachteten Aufwachreaktionen aufgetragen. Die mittlere Anzahl fluglärmassoziierter Aufwachreaktionen unterschied sich in nur einem der halbstündigen Intervalle signifikant zwischen den Jahren. Im Jahr 2011 wurden lediglich zwischen 0:00 Uhr und 0:30 Uhr signifikant mehr fluglärmassozierte Aufwachreaktionen gemessen als im Jahr 2012. Nach Ende der Kernruhezeit am Morgen unterschied sich die mittlere Anzahl der Aufwachreaktionen in den beiden Jahren nicht und auch die beiden Bettzeitgruppen im

Jahr 2012 zeigten keine Unterschiede in der mittleren Anzahl der lärmassoziierten Aufwachreaktionen.

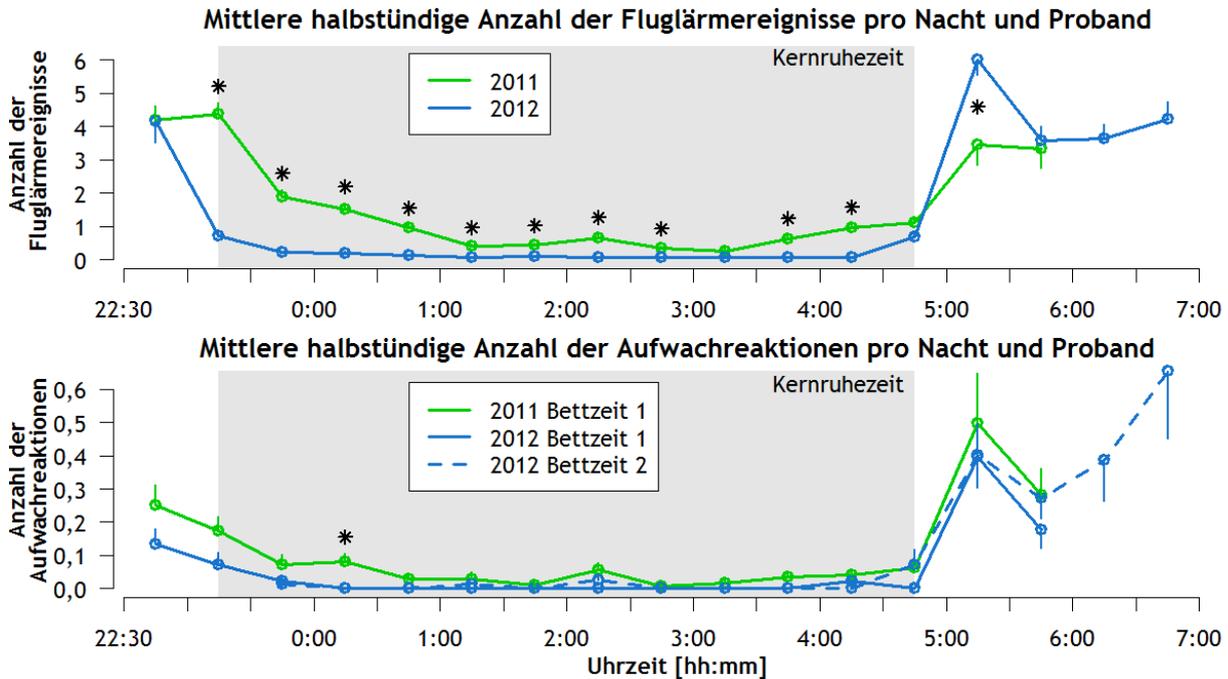


Abbildung 3-3: Nächtlicher Verlauf der mittleren Anzahl an Fluglärmereignissen (oberer Teil) und fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen (unterer Teil) in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht. \* bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2011 und 2012, adjustiert für multiple Tests nach Holm. Die Fehlerbalken entsprechen einem Standardfehler.

### 3.1.2.2 Quantität und Qualität des Schlafs

Trotz der Unterschiede in der Lärmsituation in den Jahren 2011 und 2012 waren keine Effekte auf die Gesamtschlafdauer der Probanden zu verzeichnen. Die Probanden hatten die Vorgabe, in jeder Nacht zwischen 7,5 und 8,5 Stunden im Bett zu verbringen. Im Jahr 2011 und in den beiden Bettzeitgruppen im Jahr 2012 setzten die Probanden die Vorgabe in der Art um, dass sie im Mittel 7,8 bis 7,9 Stunden im Bett lagen. In beiden Jahren wurden etwa 7,1 Stunden davon wirklich geschlafen. Interindividuelle Unterschiede waren dabei insbesondere im Jahr 2011 und im Jahr 2012 in der zweiten Bettzeitgruppe ausgeprägt (Abbildung 3-4).

Auch die Dauer bis zum Einschlafen war in den Jahren 2011 und 2012 nicht unterschiedlich (Abbildung 3-5). Im Mittel lag die Einschlaf latenz bei 13 bis 14 Minuten. Auch hier zeigte sich wiederum, dass einzelne Probanden durchaus deutlich längere Latenzzeiten aufwiesen.

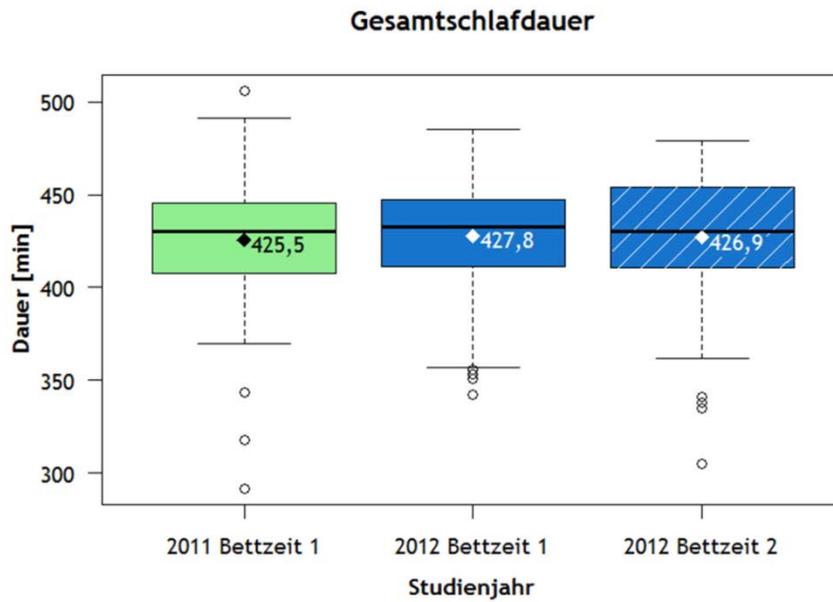


Abbildung 3-4: Gesamtschlafdauer (in Minuten): Antennen entsprechen dem 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Die waagerechte Linie innerhalb der Boxplots zeigt die Lage des Medians an; mit einer Raute ist zusätzlich der Mittelwert abgebildet. 2011: 49 Probanden, 110 Nächte; 2012: Gruppe 1: 40 Probanden, 98 Nächte; 2012: Gruppe 2: 41 Probanden, 93 Nächte.

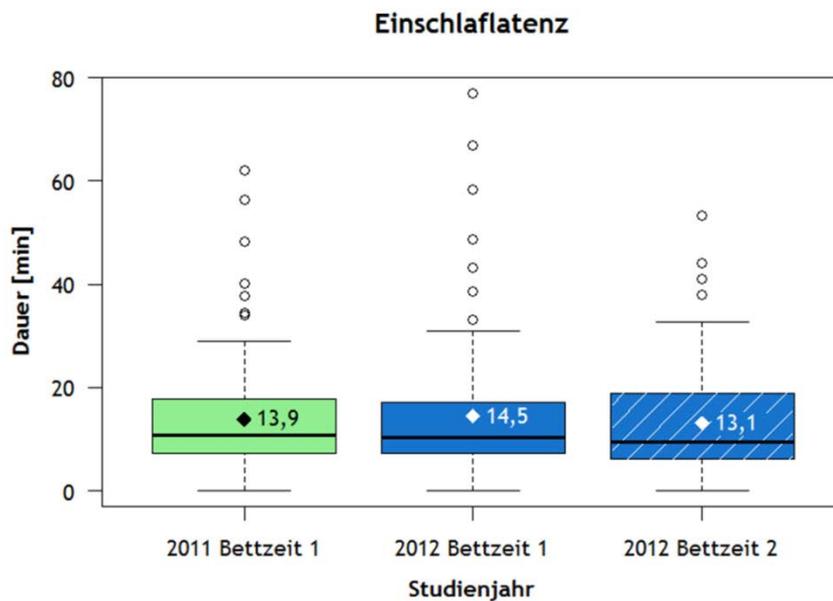


Abbildung 3-5: Dauer vom Zeitpunkt des Zubettgehens bis zum Erreichen der ersten Epoche im Schlaf (in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4.

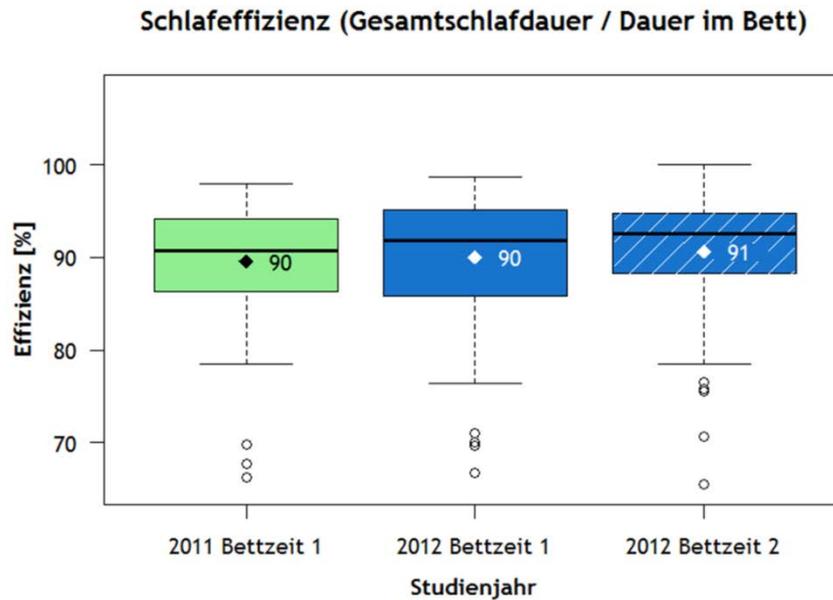


Abbildung 3-6: Schlafeffizienz (Total Sleep Time / Time in Bed). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4.

Die Schlafeffizienz ist ein Maß, um abzuschätzen, wie gut die zur Verfügung stehende Bettzeit durch Schlaf ausgeschöpft wurde (Abbildung 3-6). Sie lag in allen Jahren im Mittel zwischen 90 % und 91 %. Dies entspricht einem Wert, wie er bei gesunden, gut schlafenden Personen zu erwarten ist. Ein Wert von mehr als 87 % wurde von Probanden in einer Laboruntersuchung als ‚ziemlich gut‘ bewertet (Åkerstedt et al. 1994). Die Schlafeffizienz ist zudem altersabhängig und sinkt mit zunehmendem Alter. Ohayon et al. (2004) zeigen für einen Altersbereich von etwa 40 -45 Jahren eine Schlafeffizienz um 88 - 89 %.

### 3.1.2.3 Verfrühtes Erwachen am Morgen

Durch das vermehrte Verkehrsaufkommen nach der Kernruhezeit am Morgen ist es denkbar, dass es zu einem vorzeitigen Ende der Schlafperiode kommt. Da der Tiefschlaf vorwiegend in der ersten Nachthälfte stattfindet, ist die zweite Schlafhälfte anfälliger für ein Erwachen durch äußere Stimuli. Zur Klärung dieser Fragestellung wurden mehrere Aspekte beleuchtet:

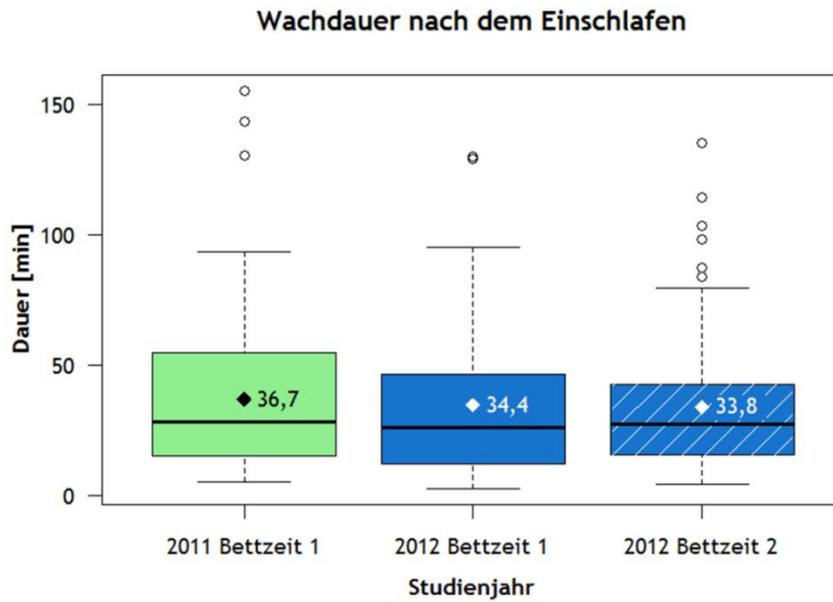


Abbildung 3-7: Wachdauer nach dem Einschlafen (WASO in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4.

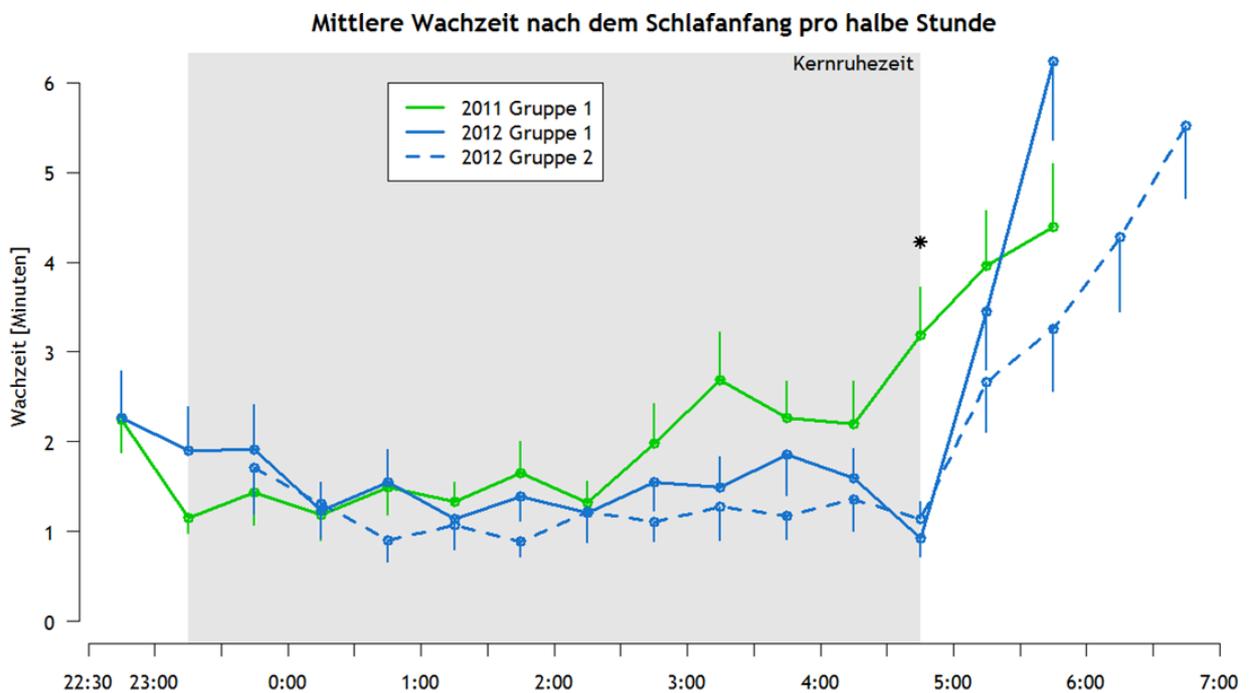


Abbildung 3-8: Mittlere Wachdauer (WASO) nach dem Schlafanfang (erstes Erreichen eines Schlafstadiums) bis zum Aufstehen in halbstündigen Intervallen. \* indiziert einen signifikanten Unterschied der Mittelwerte ( $p < 0,05$ ), adjustiert für multiple Tests nach Holm. Die Fehlerbalken entsprechen einem Standardfehler.

Die akkumulierte Wachdauer in Minuten vom Erreichen des ersten Schlafstadiums (mindestens S1) bis zum Aufstehen zeigt (Abbildung 3-7), dass die Probanden im Jahr 2011 in dieser Zeitspanne ebenso lange wach lagen, wie die Probanden im Jahr 2012. Auch hinsichtlich der beiden Bettzeitgruppen im Jahr 2012 ergab sich kein Unterschied. Wird jedoch die mittlere Wachdauer in halbstündigen Intervallen betrachtet, wie in Abbildung 3-8 dargestellt, so zeigt sich, dass es zum Ende der Kernruhezeit im Zeitintervall von 4:30 Uhr bis 5:00 Uhr zu einer signifikant höheren Wachdauer der Probanden im Jahr 2011 kam, die am ehesten auf das verstärkte Flugverkehrsaufkommen am Morgen zurückzuführen ist.

Der Zeitpunkt des Schlafendes kann einen Anhaltspunkt bieten, ob Probanden vor ihrem geplanten Weckzeitpunkt bereits wach waren. Im Jahr 2011 endete für mehr als 60 % der Probanden die Schlafperiode im geplanten Zeitintervall zwischen 6:00 Uhr und 6:30 Uhr. Im Jahr 2012 sank bei denselben Probanden (Bettzeit 1) der Prozentsatz in diesem Zeitintervall leicht ab auf etwa 55 % zugunsten der halbstündigen Zeitintervalle von 5:30 Uhr bis 6:00 Uhr und von 6:30 Uhr bis 7:00 Uhr. Anhand der Bettzeit 2 im Jahr 2012 wird deutlich, dass das Ende der Schlafperiode mehr durch den geplanten Aufstehzeitpunkt als durch das Ende der Kernruhezeit beeinflusst wurde. Zwischen 6:30 Uhr und 7:00 Uhr erwachten etwa 50 % der Probanden, zwischen 7:00 Uhr und 7:30 Uhr etwa 40 % der Probanden. Für keinen der Probanden dieser Bettzeit endete die Schlafperiode zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr. Abbildung 3-9 illustriert in diesem Zusammenhang die Differenz zwischen geplantem und tatsächlichem Schlafende. Im Mittel lag diese Differenz im Jahr 2011 bei 3 min und stieg im Jahr 2012 leicht an auf 5 min für Bettzeit 1 und 6 min für Bettzeit 2. Damit war die Differenz zwischen geplantem und tatsächlichem Schlafende gering und unterschied sich nicht zwischen den Studienjahren.

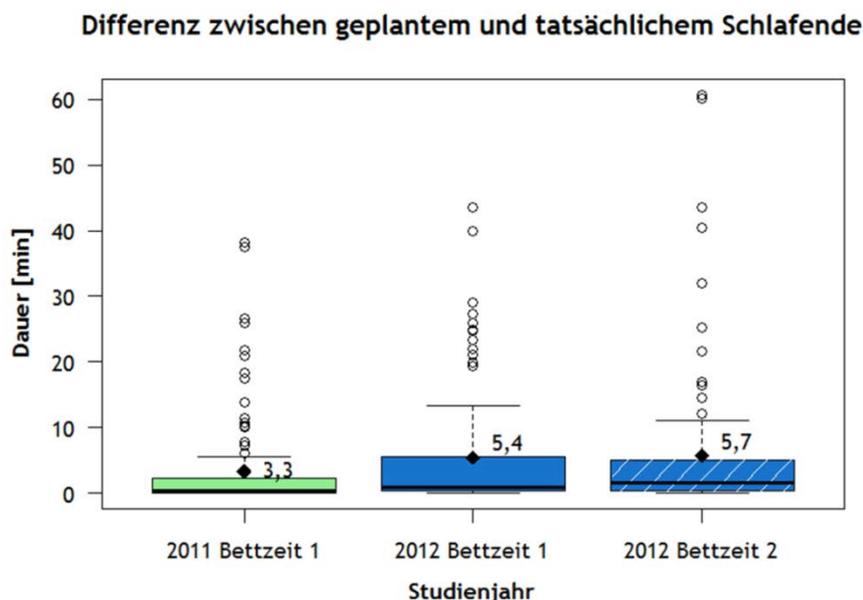


Abbildung 3-9: Wachdauer (in Minuten) dargestellt als Differenz zwischen geplantem und tatsächlichem Schlafende.

Da bei dieser Analyse nur das Ende der Schlafperiode betrachtet wurde, sind weitere Informationen nötig, die zeigen, ob es zu verlängerten Wachphasen noch vor Ende der geplanten Schlafperiode kam. In der Zeit von 4:30 Uhr bis zum geplanten Ende der jeweiligen Bettzeit lagen die Probanden im Jahr 2011 im Mittel 15 min, die Probanden der Bettzeitgruppe 1 im Jahr 2012 14 min und der Bettzeitgruppe 2 im Jahr 2012 19 min wach. Diese Unterschiede waren statistisch nicht signifikant. Dieser Vergleich beinhaltet interindividuell unterschiedliche Zeitspannen von 4:30 Uhr bis zum Ende der jeweiligen Bettzeit, insbesondere zwischen den Bettzeitgruppen. Aus diesem Grund bietet eine Standardisierung der Wachdauer anhand der möglichen Schlafdauer - eine inverse Schlafeffizienz für diese Zeitspanne - eine bessere Vergleichbarkeit. In Abbildung 3-10 wurde die individuelle Wachdauer jedes Probanden durch seine mögliche Schlafdauer (von 4:30 Uhr bis zum geplanten Aufstehzeitpunkt) dividiert. Auch diese Analyse zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Jahren 2011 und 2012. Im Mittel wurden zwischen 12 % und 14 % der Zeitspanne wach verbracht.

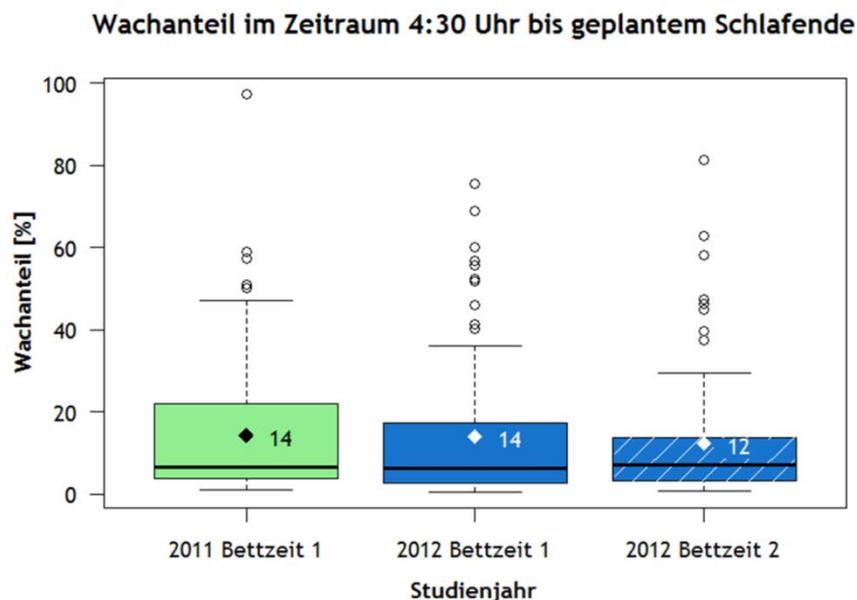


Abbildung 3-10: Prozentsatz der im Stadium Wach verbrachten Zeit seit 4:30 Uhr, standardisiert auf die mögliche Schlafdauer. Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4.

#### 3.1.2.4 Aufwachwahrscheinlichkeit durch Fluglärm in den Jahren 2011 und 2012 am Flughafen Frankfurt

In einem ereigniskorrelierten Ansatz wurde innerhalb von 90 s nach dem Eintreten eines Lärmereignisses überprüft, ob in den polysomnografischen Aufzeichnungen ein Stadienwechsel aus einem Schlafstadium in das Stadium Wach stattgefunden hatte (Kapitel 2.8.1).

Das Modell mit der besten Anpassungsgüte beruhend auf dem gesamten Datensatz der Jahre 2011 und 2012 ist in Tabelle 3-6 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Größe des Einflusses der einzelnen Prädiktoren untereinander wurde der Schätzer zusätzlich standardisiert (Gelman, 2008) berechnet.

Die Aufwachwahrscheinlichkeit erhöhte sich signifikant mit steigendem  $L_{ASmax}$  des Fluglärmereignisses, wobei der Effekt des  $L_{ASmax}$  vom  $L_{ASeq}$  eine Minute vor Beginn des Fluglärmereignisses abhing. Je höher der  $L_{ASeq}$  eine Minute vor Beginn des Fluglärmereignisses, desto kleiner war der Effekt des Maximalpegels. Dies wird durch den negativen Schätzer der Interaktion deutlich. Die Aufwachwahrscheinlichkeit sank mit zunehmender Dauer eines Lärmereignisses. Es ist anzunehmen, dass die Entscheidung, ob eine Person mit Aufwachen reagiert, recht früh im Geräuschverlauf getroffen wird. Die Aufwachwahrscheinlichkeit stieg mit der bereits verstrichenen Schlafdauer an. Dies ist durch die Verteilung des Tiefschlafs im Verlauf der Nacht zu erklären und durch die Weise, in der die Notwendigkeit, tief zu schlafen, abgebaut wird. Der Tiefschlaf, aus dem die Wahrscheinlichkeit zu erwachen am geringsten ist, dominiert insbesondere die erste Hälfte der Schlafperiode. Dabei wird der sogenannte Tiefschlafdruck exponentiell abgebaut.

Um zu prüfen, ob die Reduktion der Daten von allen Schallereignissen auf die verwendeten Fluglärmereignisse, wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, einen signifikanten Effekt auf die Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit hat, wurde die Expositions-Wirkungsbeziehung zusätzlich für alle Schallereignisse berechnet. Es zeigte sich, dass bei Verwendung aller Schallereignisse der Effekt des  $L_{AS,max}$  höher war, dass sich aber auf Basis überlappender Konfidenzintervalle kein signifikanter Unterschied zu der Expositions-Wirkungsbeziehung der verwendeten Fluglärmereignisse ergab.

*Tabelle 3-6: Modell der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Fluglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit mit der besten Anpassungsgüte (gesamte Daten aus 2011 und 2012)*

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer*	p-Wert
Konstante	-7,482	1,485	-2,754	< 0,001
$L_{ASmax}$	0,078	0,032	0,404	0,014
Geräuschdauer	-0,007	0,003	-0,360	0,004
Bisherige Anzahl an FLE	0,016	0,003	0,589	< 0,001
verstrichene Schlafdauer	0,001	0,000	0,474	0,003
Alter	0,013	0,005	0,400	0,011
$L_{ASeq}$ 1 min vor FLE	0,095	0,047	0,184	0,041
$L_{ASmax}$ * $L_{ASeq}$ 1 min vor FLE	-0,002	0,001	-0,380	0,069

\* Numerische Variablen werden zentriert und durch 2 Standardabweichungen dividiert. Kategoriale Variablen bleiben unverändert (Gelman, 2008). SF=Standardfehler,  $L_{ASmax}$ =maximaler Schalldruckpegel,  $L_{ASeq}$ =energieäquivalenter Dauerschallpegel in einer gegebenen Zeiteinheit, FLE=Fluglärmereignis.

Damit getrennte Expositions-Wirkungskurven für die Jahre 2011 und 2012 berechnet werden konnten, wurde eine Indikatorvariable für das Erhebungsjahr in das Modell mit den

verwendeten Fluglärmereignissen eingefügt (Abbildung 3-11). Die Wahrscheinlichkeit, aufzuwachen, unterschied sich nicht statistisch signifikant zwischen den beiden Jahren ( $p=0,328$ ), was auch durch die Überlappung der Konfidenzintervalle in Abbildung 3-11 verdeutlicht wird. Es wurde keine signifikante Interaktion mit dem Erhebungsjahr gefunden.

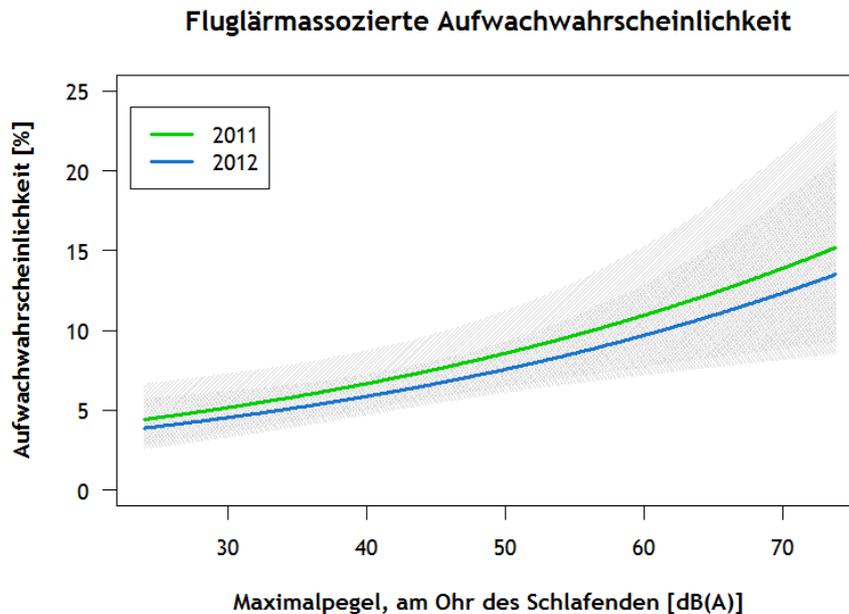


Abbildung 3-11: Expositions-Wirkungskurve zwischen maximalem Schalldruckpegel eines Fluglärmereignisses und der Aufwachwahrscheinlichkeit der Probanden am Flughafen Frankfurt in den Jahren 2011 und 2012. Schraffiert dargestellt sind die 95%-Konfidenzintervalle. Geräuschkdauer=68 s (Median), bisherige Anzahl an Schallereignissen=19 (Median),  $L_{Aseq}$  eine Minute vor dem Fluglärmereignis=28,8 dB(A) (Median), verstrichene Schlafdauer=814 Epochen, d.h. 407 min und entspricht ca. 5:30 Uhr, Alter=43 (Median).

Ob sich bei identischer Bettzeit die Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen den Jahren 2011 und 2012 unterschied, wurde dadurch überprüft, dass das gleiche Modell nur für diejenigen Probanden berechnet wurde, die im Jahr 2011 ( $N=48$ ) und im Jahr 2012 in der Bettzeitgruppe 1 ( $N=38$ ) teilnahmen. Aus dem Datensatz des Jahres 2011 standen 106 Nächte, aus dem Jahr 2012 der Bettzeitgruppe 1 standen 87 Nächte zur Verfügung. Insgesamt wurden 4085 Fluglärmereignisse für die Berechnung der Expositions-Wirkungsbeziehungen verwendet. Die Analyse zeigte, dass sich die Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen den Jahren bei identischen Bettzeiten nicht statistisch signifikant unterschied ( $p=0,304$ ).

Die Auswirkungen des verstärkten Flugverkehrs in den Randzeiten um die Kernruhezeit herum auf die Aufwachwahrscheinlichkeit wurde zusätzlich durch den Vergleich der beiden Bettzeitgruppen im Jahr 2012 ermöglicht. Die Probanden der Bettzeitgruppe 1 ( $N=38$ ) erhielten durch die zeitliche Lage ihrer Schlafperiode Fluglärm sowohl in der

Einschlafphase als auch in den Morgenstunden, während die Probanden der Bettzeitgruppe 2 (N=41) von Fluglärm lediglich in den Morgenstunden betroffen waren. Für die Modellierung standen 87 Nächte aus Bettzeitgruppe 1 und 82 Nächte aus Bettzeitgruppe 2 mit insgesamt 3089 Fluglärmereignissen zur Verfügung. Die beiden Bettzeitgruppen unterschieden sich hinsichtlich ihrer Aufwachwahrscheinlichkeit nicht statistisch signifikant voneinander ( $p=0,893$ ).

### 3.1.3 Vergleich der Flughäfen Frankfurt und Köln-Bonn

#### 3.1.3.1 Fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen

In Kapitel 3.1.3 ist eine Aufwachreaktion durch einen Wechsel in die Stadien Wach oder S1 aus einem tieferen Schlafstadium gekennzeichnet. Während der Schlafperiode der 79 Probanden wurden in der NORAH-Studie des Jahres 2012 2705 Überflüge aufgezeichnet, die für die Analysen verwendet werden konnten. Bei 7,6 % dieser Fluglärmereignisse kam es zu fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen, 6,9 % entfielen auf die Bettzeitgruppe 1 und 8,1 % auf die Bettzeitgruppe 2. Um den Vergleich zu einem anderen Flughafen zu ermöglichen, standen Daten aus einer Studie zu nächtlichem Fluglärm am Flughafen Köln-Bonn aus den Jahren 2001/2002 zur Verfügung, die mit gleicher Methodik durchgeführt wurde (Basner et al., 2006). Am Flughafen Köln-Bonn wurden bei 61 Probanden in jeweils 9 Nächten insgesamt 10658 Überflüge registriert, die für die Auswertung verwendet werden konnten. Diese führten in 9,8 % der Fälle zu fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen. Abbildung 3-12 stellt die Aufwachhäufigkeit in der Nacht in einen Zusammenhang mit der Anzahl der Überflüge, denen die Probanden pro Nacht ausgesetzt waren. Probanden am Flughafen Köln-Bonn waren in der Nacht signifikant mehr Fluglärmereignissen ausgesetzt und erwachten signifikant häufiger als die Probanden der Bettzeitgruppe 1 am Flughafen Frankfurt. Sie erwachten aber auch signifikant häufiger pro Nacht als die Probanden der Bettzeitgruppe 2. Des Weiteren unterschieden sich die Probanden der Bettzeitgruppe 1 und 2 signifikant voneinander in der Anzahl der Lärmereignisse und der Aufwachhäufigkeit pro Nacht.

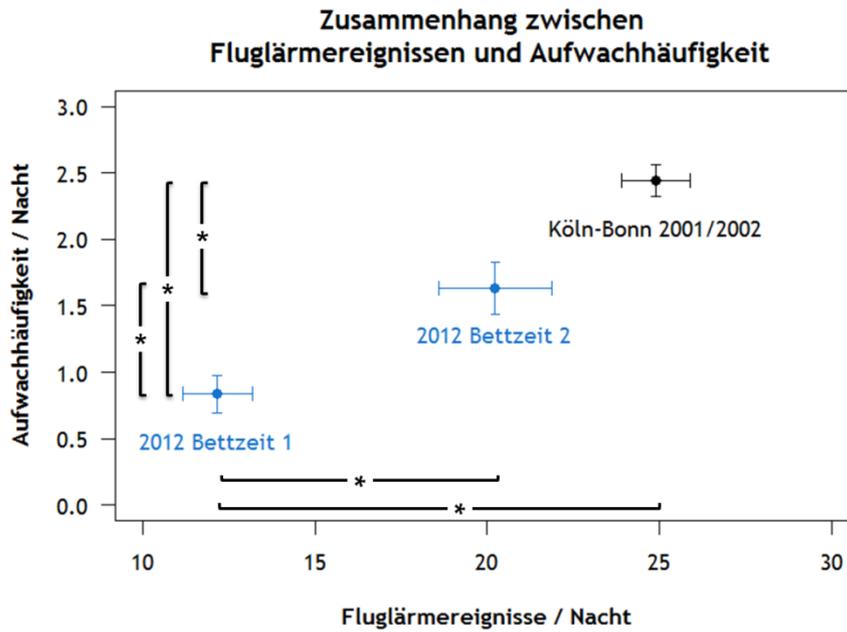


Abbildung 3-12: Zusammenhang zwischen Anzahl der nächtlichen Fluglärmereignisse und der fluglärmassoziierten Aufwachhäufigkeit jeweils pro Nacht für die Probanden im Untersuchungsjahr 2012 für Bettzeit 1 und Bettzeit 2 mit Standardfehler in x- und y- Richtung. \* bezeichnet signifikante Unterschiede der Mittelwerte ( $p < 0,05$ ), geprüft mittels GEE, adjustiert für multiples Testen nach Holm.

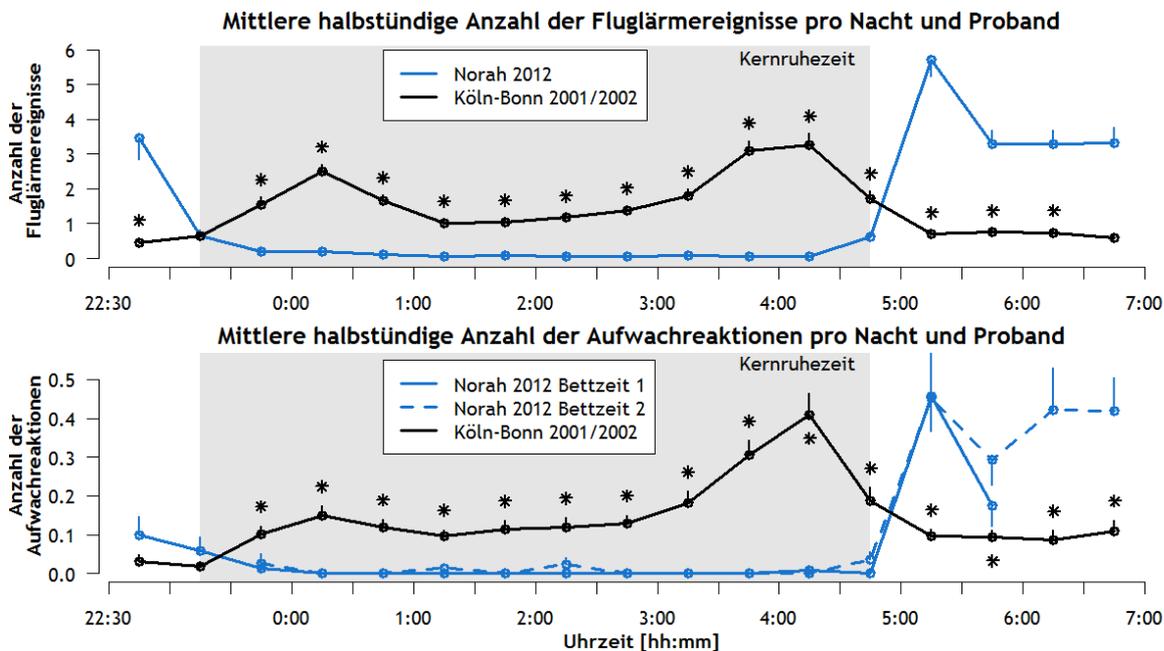


Abbildung 3-13: Nächtlicher Verlauf der mittleren Anzahl an Fluglärmereignissen (oberer Teil) und fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen (unterer Teil) in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht. \* bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2011 und 2012, adjustiert für multiple Tests nach Holm. Die Fehlerbalken entsprechen einem Standardfehler.

Abbildung 3-13 veranschaulicht das grundsätzlich andere Verkehrsmuster am Flughafen Köln-Bonn, das durch eine erhöhte Zahl an Überflügen insbesondere in den Zeitintervallen von etwa 23:30 Uhr bis 1:00 Uhr und von 3:30 Uhr bis 5:00 Uhr geprägt ist. Nach der Kernruhezeit am Morgen stieg die Anzahl an Überflügen am Flughafen Frankfurt und war höher als am Flughafen Köln-Bonn. Auch bei Betrachtung der halbstündigen Intervalle wird der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Überflügen und fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen deutlich.

### 3.1.3.2 Quantität und Qualität des Schlafs

Obwohl die Probanden am Flughafen Köln-Bonn andere Vorgaben hatten bezüglich ihrer einzuhaltenden Bettzeit (Bettzeit min. 6 Stunden) als die Probanden am Flughafen Frankfurt (Bettzeit zwischen 7,5 und 8,5 Stunden), verbrachten die Probanden am Flughafen Köln-Bonn im Mittel nur 6 min weniger Zeit im Bett als die Probanden der Bettzeit 1 am Flughafen Frankfurt und eine Minute weniger als die Probanden der Bettzeit 2 des Jahres 2012. Der Vergleich der Gesamtschlafdauer zeigte jedoch, dass die Probanden am Flughafen Köln-Bonn signifikant weniger schliefen mit im Mittel 6,8 Stunden als die Probanden am Flughafen Frankfurt im Jahr 2012 mit im Mittel 7,1 Stunden (Abbildung 3-8). Die Probanden am Flughafen Köln-Bonn hatten eine höhere Varianz in der Gesamtschlafdauer, die sich sowohl in deutlich längeren Schlafdauern bis maximal 533 min als auch in kürzeren Schlafdauern bis mindestens 219,5 min äußerte als die Probanden am Flughafen Frankfurt (Bettzeit 1: mindestens 342 min bis maximal 485,5 min; Bettzeit 2: mindestens 305 min bis maximal 479 min). Diese Varianz kann sowohl durch die weniger restriktiven Vorgaben der Bettzeiten für die Probanden am Flughafen Köln-Bonn begründet sein, als auch durch eine stärkere Beeinflussung des Schlafs durch Fluglärm.

Am Flughafen Köln-Bonn benötigten die Probanden signifikant mehr Zeit, um einzuschlafen (Abbildung 3-15). Die Einschlaf latenz lag mit im Mittel 18,6 min allerdings nicht in einem Bereich, der als ungewöhnlich lang anzusehen ist (Ohayon et al. 2004).

Neben der Schlafmenge sind auch die Schlafstruktur und die Schlafqualität von Bedeutung. Als Kennwerte für die Fragmentierung des Schlafs können verschiedene Parameter aus dem Polysomnogramm berechnet werden:

Vermehrte Wachphasen nach dem Einschlafen können auf eine Beeinträchtigung des Schlafs hinweisen. Sie zeigen eine starke Altersabhängigkeit in Form von längeren Wachphasen mit zunehmendem Alter. Ohayon et al. (2004) zeigten in ihrer Metaanalyse, dass im Alter von 45 Jahren die Wachdauer der Untersuchten knapp 30 min betrug. In Abbildung 3-16 ist die Wachdauer nach dem Einschlafen dargestellt, die sich statistisch an den Flughäfen nicht signifikant unterschied.

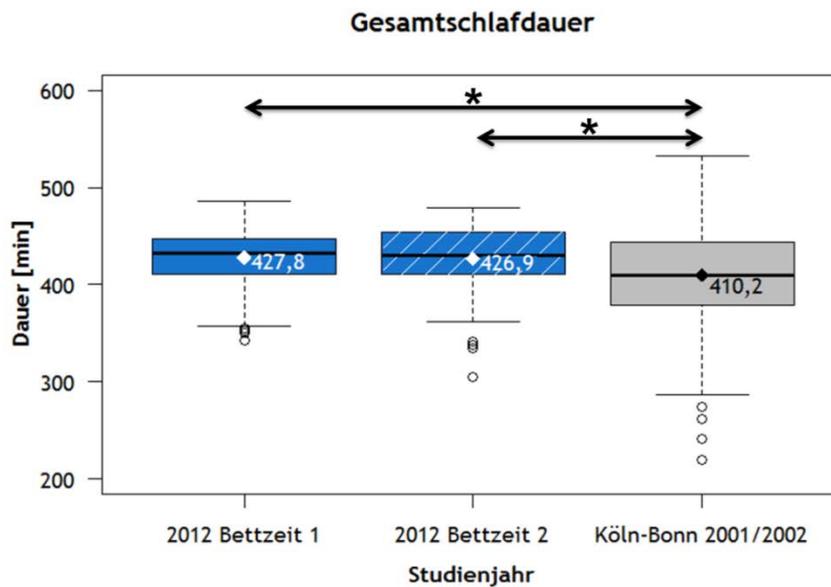


Abbildung 3-14: Gesamtschlafdauer (in Minuten) im Vergleich der Bettzeitgruppe 1 und der Bettzeitgruppe 2 am Flughafen Frankfurt mit den Probanden am Flughafen Köln-Bonn. Antennen entsprechen dem 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Die waagerechte Linie innerhalb der Boxplots zeigt die Lage des Medians an; mit einer Raute ist zusätzlich der Mittelwert abgebildet. Im Jahr 2012 sind Zubettgeh-Zeiten angegeben der Bettzeitgruppe 1: 40 Probanden, 98 Nächte sowie Bettzeitgruppe 2: 41 Probanden, 93 Nächte. Am Flughafen Köln-Bonn wurden 61 Probanden in 421 Nächten analysiert. \* bezeichnet signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) in den Mittelwerten, adjustiert für multiple Tests nach Holm.

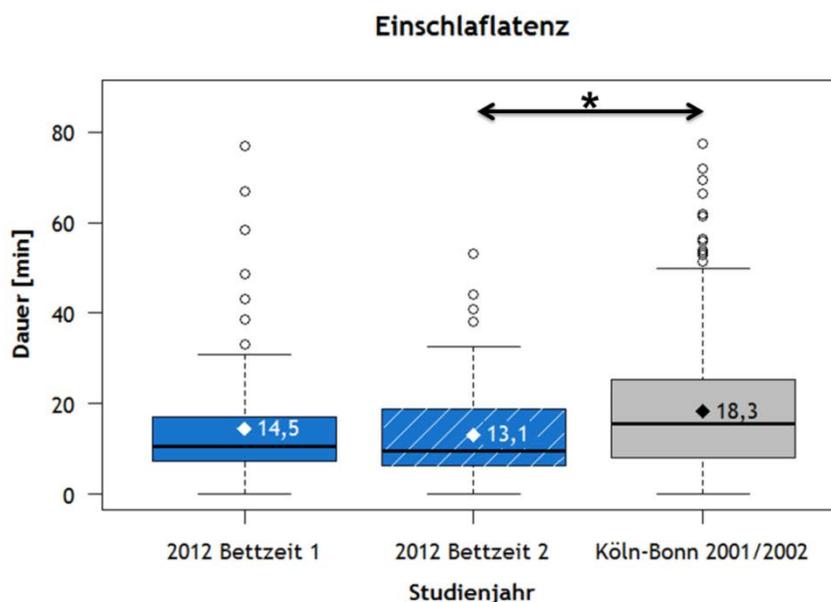


Abbildung 3-15: Dauer vom Zeitpunkt des Zubettgehens bis zum Erreichen eines jeglichen Schlafstadiums (in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.

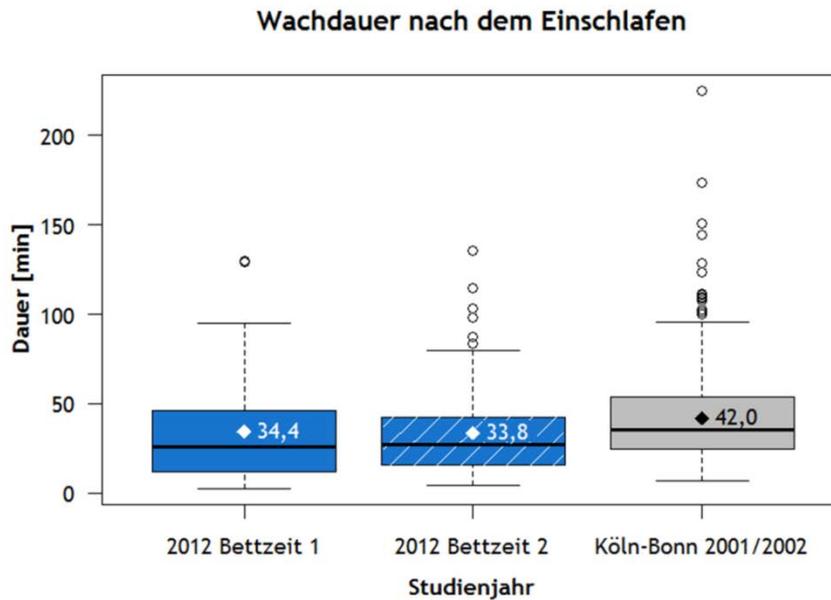


Abbildung 3-16: Wachdauer nach dem Einschlafen (Wake after Sleep onset=WASO in Minuten) bis zum Aufstehen. Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.

Die Schlaffeffizienz der Probanden am Flughafen Köln-Bonn war mit im Mittel 87 % signifikant schlechter als am Flughafen Frankfurt (Abbildung 3-17). Die Schlaffeffizienz vieler Probanden lag somit unter dem Wert von 87 %, so dass der Schlaf nicht mehr als ‚ziemlich gut‘ zu bewerten ist (Åkerstedt et al., 1994).

Die Schlafqualität kann weiterhin anhand der Anteile der einzelnen Schlafstadien an der Schlafperiode beurteilt werden. Für eine gute Schlafqualität sprechen insbesondere das Vorliegen von Tiefschlaf und REM-Schlaf.

Die Probanden am Flughafen Köln-Bonn verbrachten signifikant weniger Zeit im Tiefschlaf als die Probanden am Flughafen Frankfurt, wie in Abbildung 3-18 dargestellt ist. Um auszuschließen, dass es sich bei diesem Befund um eine Verzerrung durch die kürzere Gesamtschlafdauer am Flughafen Köln-Bonn handelt, wurde die Dauer des Tiefschlafs als Anteil an der Gesamtschlafdauer berechnet. Der signifikante Unterschied blieb weiter statistisch nachweisbar. Die Probanden verbrachten 14 % der Gesamtschlafdauer im Tiefschlaf, während die Probanden am Flughafen Frankfurt zwischen 24 % und 25 % der Gesamtschlafdauer im Tiefschlaf waren. Nach Steinberg et al. (2000) und Ohayon et al. (2004) entspricht dies etwa dem beim gesunden Menschen mittleren Alters beobachteten Bereich von 15 % bis 25 % Tiefschlaf in einer Schlafperiode.

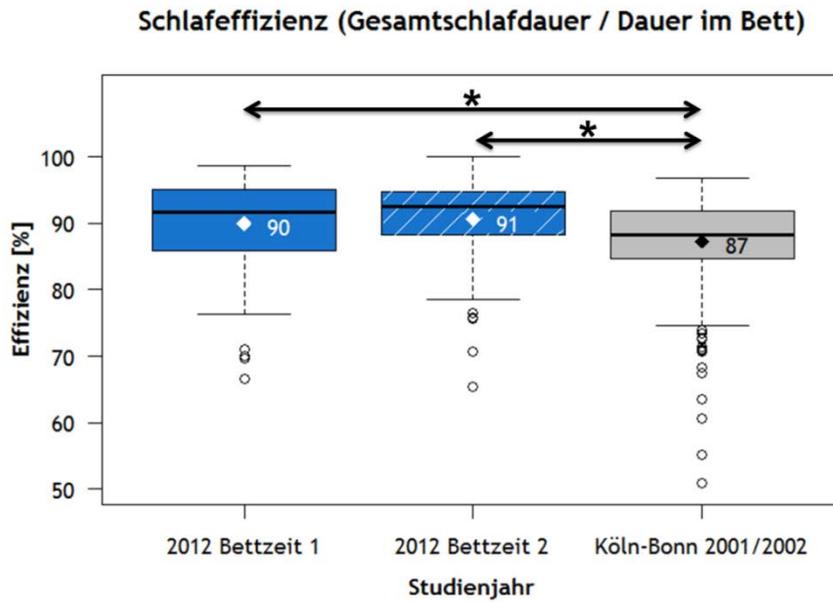


Abbildung 3-17: Schlafeffizienz (Total Sleep Time / Time in Bed): Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.

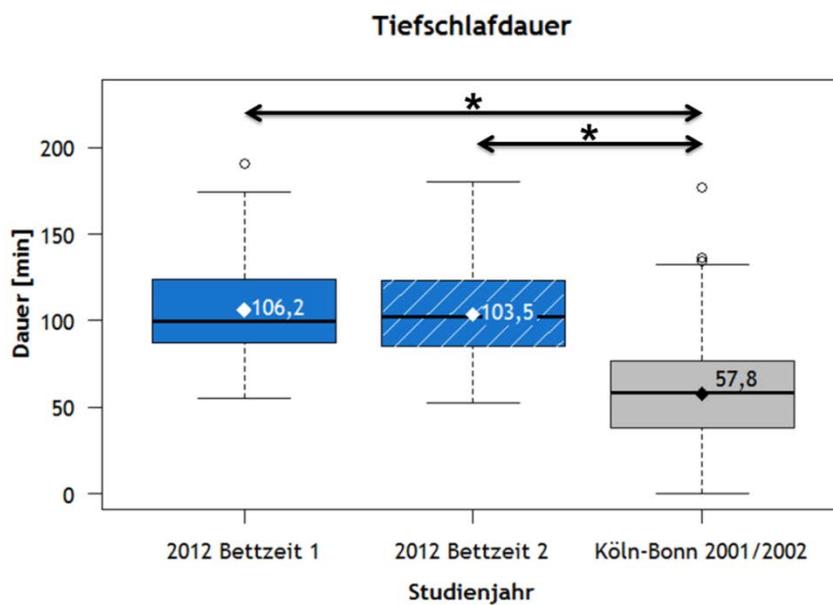


Abbildung 3-18: Dauer des Tiefschlafs (S3 + S4 in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.

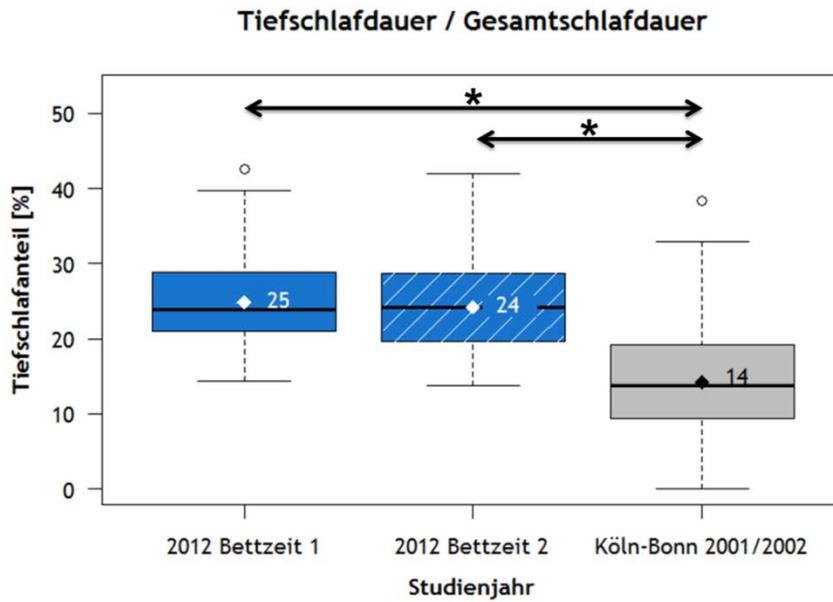


Abbildung 3-19: Anteil (in Prozent) der Dauer des Tiefschlafs (S3 + S4) in bezogen auf die Gesamtschlafdauer. Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.

Die Dauer, die im REM-Schlaf verbracht wurde, unterschied sich nicht signifikant zwischen den Flughäfen (Abbildung 3-20).

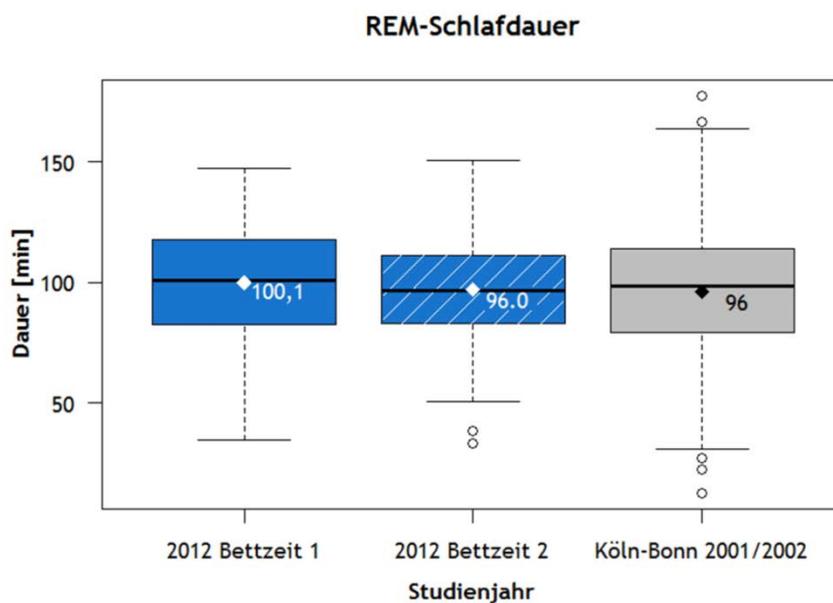


Abbildung 3-20: REM-Schlafdauer (in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.

### 3.1.3.3 Übertragbarkeit von Expositions-Wirkungskurven zwischen Flughäfen mit unterschiedlichen Verkehrsmustern

Zur vergleichenden Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit durch Fluglärm an den Flughäfen Frankfurt und Köln-Bonn wurden die Datensätze der NORAH-Studie aus dem Jahr 2012 mit den Daten aus der Untersuchung am Flughafen Köln-Bonn vereint. Da das Modell, das aus den Untersuchungen am Flughafen Köln-Bonn hervorgegangen ist, in den Frankfurter Nachtindex aufgenommen wurde, wurde im Folgenden dieses Modell zum Vergleich der beiden Flughäfen Frankfurt und Köln-Bonn ausgewählt. Das Modell (Tabelle 3-7) beinhaltet als Prädiktoren den  $L_{ASmax}$  des Fluglärmereignisses, mit dessen Anstieg sich die Aufwachwahrscheinlichkeit erhöht, den  $L_{ASeq}$  in der Minute vor dem Lärmereignis sowie deren Interaktion. Der Überflug führte dementsprechend umso wahrscheinlicher zu einem Aufwachen, desto mehr sich sein  $L_{ASmax}$  vom gegenwärtigen Umgebungslärm abhob. Die Aufwachwahrscheinlichkeit stieg mit der Zeit, die seit dem Einschlafzeitpunkt verstrichen war, als Ausdruck eines abnehmenden Schlafdrucks. Sie hing außerdem ab von dem Schlafstadium, in dem sich der Schlafende bei Eintreten des Fluglärmereignisses befand. Im Vergleich zu Stadium 2 als Referenzkategorie war die Wahrscheinlichkeit, aufzuwachen, aus dem Tiefschlaf (S3 + S4) erniedrigt, aus dem REM-Schlaf erhöht. Zur Unterscheidung der Flughäfen wurde dem Modell eine Indikatorvariable für den Flughafen Köln-Bonn und den Flughafen Frankfurt hinzugefügt. Es zeigte sich, dass sich die Aufwachwahrscheinlichkeit an den beiden Flughäfen signifikant voneinander unterschied. Es wurde keine signifikante Interaktion mit dem Erhebungsjahr gefunden.

*Tabelle 3-7: Modell der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Fluglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit für die Flughäfen Frankfurt und Köln-Bonn.*

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer*	p-Wert
Konstante	-7,530	0,787	-2,199	< 0,001
$L_{ASmax}$	0,104	0,017	0,322	< 0,001
verstrichene Schlafdauer	0,001	0,000	0,384	< 0,001
Aktuelles Schlafstadium				
Schlafstadium S2	0,000		Referenzgruppe	
Schlafstadium S3 + S4	-0,338	0,107	-0,338	0,002
Schlafstadium REM	0,374	0,067	0,374	< 0,001
$L_{ASeq}$ 1 min vor FLE	0,146	0,028	0,195	< 0,001
$L_{ASmax}$ * $L_{ASeq}$ 1 min vor FLE	-0,003	0,001	-0,732	< 0,001
Studie				
Köln-Bonn 2001/2002	0,000		Referenzgruppe	
NORAH 2012	-0,586	0,112	-0,586	< 0,001

\* Numerische Variablen werden zentriert und durch 2 Standardabweichungen geteilt. Kategoriale Variablen bleiben unverändert (Gelman, 2008). SF=Standardfehler,  $L_{ASmax}$ =maximaler Schalldruckpegel,  $L_{ASeq}$ =energieäquivalenter Dauerschallpegel in einer gegebenen Zeiteinheit, FLE=Fluglärmereignis.

Bei der grafischen Gegenüberstellung der Expositions-Wirkungskurven flossen die folgenden Prädiktoren ein: Der  $L_{ASeq}$  eine Minute vor dem Fluglärmereignis wurde mit 27,6 dB(A) festgesetzt (Median im gepoolten Datensatz). Als aktuelles Schlafstadium wurde das Stadium S2 gewählt bei einer verstrichenen Schlafzeit von 766 Epochen (entspricht 383 min, d.h. ca. 5:30 Uhr im NORAH-Datensatz). Abbildung 3-21 zeigt die Expositions-Wirkungskurven aus NORAH im Jahr 2012 und dem Flughafen Köln-Bonn. Bei gleichem  $L_{ASmax}$  war die Wahrscheinlichkeit, aufzuwachen, am Frankfurter Flughafen im Jahr 2012 mit Kernruhezeit geringer als am Flughafen Köln-Bonn.

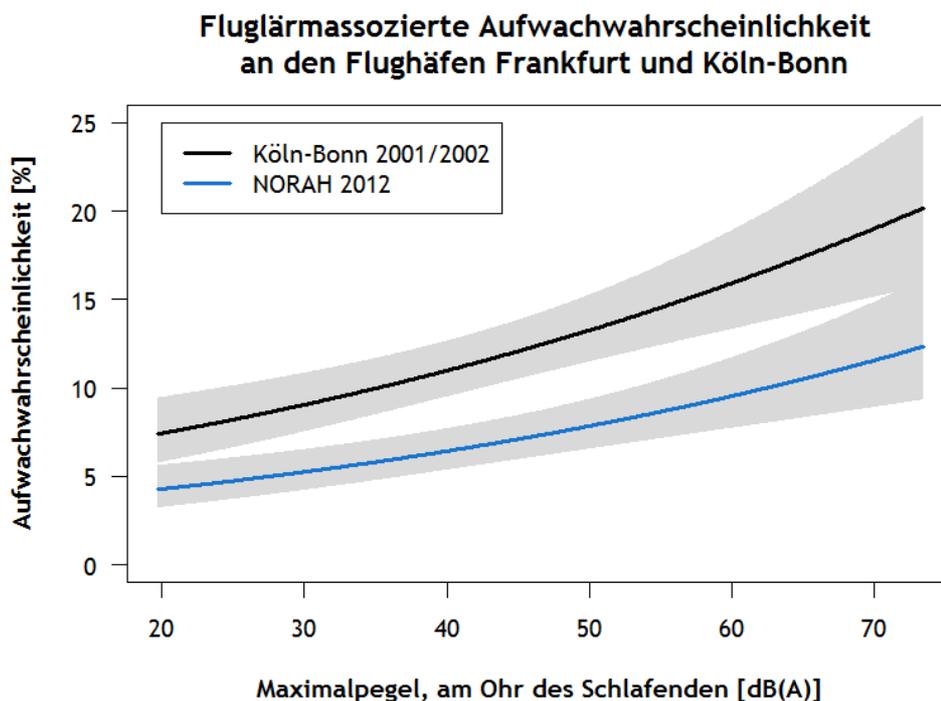


Abbildung 3-21: Expositions-Wirkungskurve zwischen maximalem Schalldruckpegel eines Fluglärmereignisses und der fluglärmassoziierten Aufwachwahrscheinlichkeit der Probanden aus NORAH im Jahr 2012 (N=41) sowie den Probanden am Flughafen Köln-Bonn (N=61) (Basner et al., 2006) beruhend auf dem Modell in Tabelle 3-7. Schraffiert dargestellt sind die 95%-Konfidenzintervalle der Köln-Bonner Studie und der NORAH-Studie des Jahres 2012.  $L_{ASeq}$  eine Minute vor dem Fluglärmereignis=27,6 dB(A) (Median), aktuelles Schlafstadium=S2, verstrichene Schlafdauer=766 Epochen, d.h. 383 min und entspricht ca. 5:30 Uhr in NORAH 2012.

### 3.1.4 Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung des Flugverkehrs und Störungen des Schlafs

Wie stark eine Person mit Störungen des Schlafs und Aufwachreaktionen auf nächtlichen Fluglärm reagiert, ist inter-individuell unterschiedlich (Basner et al., 2014). Es ist denkbar, dass ein Teil dieser Unterschiede in Zusammenhang mit der subjektiven Bewertung des Flugverkehrs durch die betroffene Person steht. Die Kausalität des Zusammenhangs, ob die

subjektive Bewertung die Schlafstörung begünstigt oder die Schlafstörung die subjektive Bewertung bedingt, ist dabei offen.

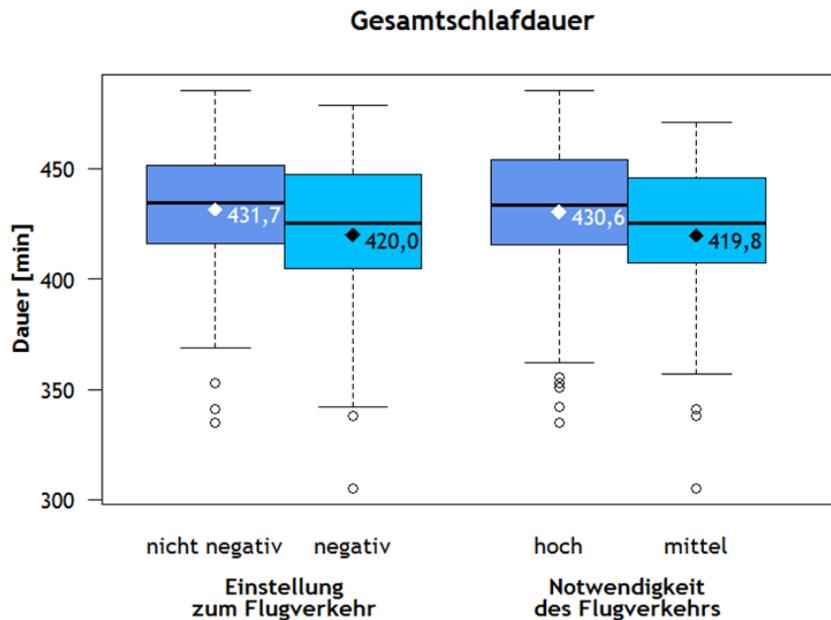


Abbildung 3-22: Gesamtschlafdauer (in Minuten) der Probanden, die ihre Einstellung zum Flugverkehr ‚nicht negativ‘ bzw. ‚negativ‘ bewerteten und die die Notwendigkeit des Flugverkehrs als ‚hoch‘ bzw. ‚mittel‘ einstufen in NORAH 2012. Weitere Details der Grafik sind in der Unterschrift zu Abbildung 3-14 beschrieben.

Zur Klärung eines möglichen Zusammenhangs mit Schlafstörungen wurden die Angaben zur ‚allgemeinen Einstellung zum Flugverkehr‘ und zur ‚Bewertung der Notwendigkeit des Flugverkehrs‘ der Probanden am Flughafen Frankfurt im Jahr 2012 herangezogen. Eine Bewertung lag von 81 der untersuchten Probanden mit insgesamt 191 Nächten vor, die in die Analyse eingingen (nicht jeder Proband ging mit gleich vielen Nächten in die Analyse ein). Die Bewertung der ‚allgemeinen Einstellung zum Flugverkehr‘ wurde auf einer 5-stufigen Skala erfasst von negativ (1), über neutral (3) bis positiv (5). Kategorie 1 (N=14) und 2 (N=14) wurden zur weiteren Analyse als ‚negative Einstellung‘, Kategorie 3 (N=23), 4 (N=17) und 5 (N=6) als ‚nicht negative Einstellung‘ zusammengefasst. 28 Probanden (18 Frauen, mittleres Alter 43,9 Jahre  $\pm$  15,9 Jahre (STD)) gaben Bewertungen in der Kategorie ‚negative Einstellung‘ ab und gingen mit 66 Nächten in die Berechnung der Schlafparameter ein; 46 Probanden (29 Frauen, mittleres Alter 43,9 Jahre  $\pm$  15,4 Jahre (STD)) entfielen auf die Kategorie der ‚nicht negativen Einstellung, so dass hier 108 Nächte zur Analyse zur Verfügung standen. Die Einordnung zur ‚Notwendigkeit des Flugverkehrs‘ erfolgte ebenfalls über eine 5-stufige Skala von nicht notwendig (1), über mittelmäßig notwendig (3) bis sehr notwendig (5). Hier wurden die Kategorien 1 (N=0), 2 (N=5) und 3 (N=17) als Bewertung des Flugverkehrs mit ‚mittlerer Notwendigkeit‘ und die Kategorien 4 (N=37) und 5 (N=15) mit ‚hoher Notwendigkeit‘ zusammengefasst. 22 Probanden (15 Frauen, mittleres Alter 45,2 Jahre  $\pm$  10,3 Jahre (STD)) und 54 Nächte befanden sich in der Kategorie der ‚mittleren Notwendigkeit‘, 52 Probanden (32 Frauen, mittleres Alter 43,1

Jahre  $\pm$  17,2 Jahre (STD)) und 120 Nächte in der Kategorie der ‚hohen Notwendigkeit‘. Da die Alters- und Geschlechtsstruktur im Vergleich der beiden Gruppen nicht durchweg homogen war, wurde zusätzlich zum Mittelwertvergleich mittels GEE, der von Abbildung 3-22 bis Abbildung 3-27 dargestellt ist, überprüft, ob sich das Alter und das Geschlecht signifikant auf den untersuchten Zusammenhang zwischen subjektiver Einstellung zum Flugverkehr und den Schlafparametern auswirkten. Das Alter hatte einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtschlafdauer, die Schlafeffizienz, die Wachdauer und die REM-Schlafdauer. Das Geschlecht hatte einen signifikanten Effekt auf die Tiefschlafdauer. Trotz Adjustierung für Alter und Geschlecht blieben die im Folgenden beschriebenen, signifikanten Unterschiede in den Schlafparametern zwischen den Gruppen bestehen.

Wie Abbildung 3-22 illustriert, unterschieden sich die beiden Gruppen jeweils nicht in ihrer Gesamtschlafdauer. Dagegen zeigten die Probanden, deren Einstellung zum Flugverkehr negativ war, eine signifikant längere Einschlafzeit (Abbildung 3-23), eine signifikant geringere Schlafeffizienz (Abbildung 3-24) sowie eine signifikant längere Wachdauer (Abbildung 3-25) als die Probanden, deren Einstellung zum Flugverkehr nicht negativ war. In beiden Gruppen befanden sich dennoch die Einschlafzeit in einem normalen Bereich und die Schlafeffizienz mit im Mittel 88 % bzw. 91 % auf einem hohen Niveau.

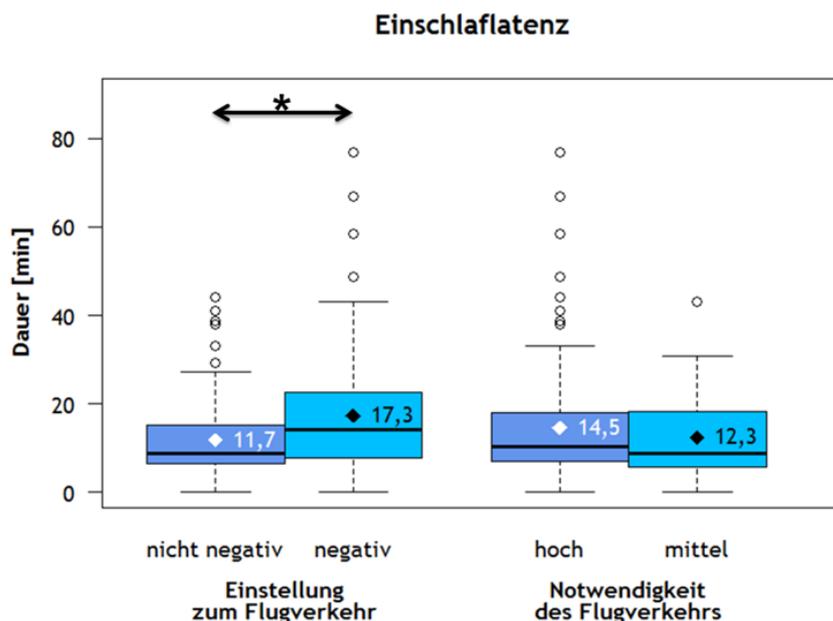


Abbildung 3-23: Dauer vom Zeitpunkt des Zubettgehens bis zum Erreichen eines Schlafstadiums (in Minuten) gruppiert nach der subjektiven Einstellung zum Flugverkehr.

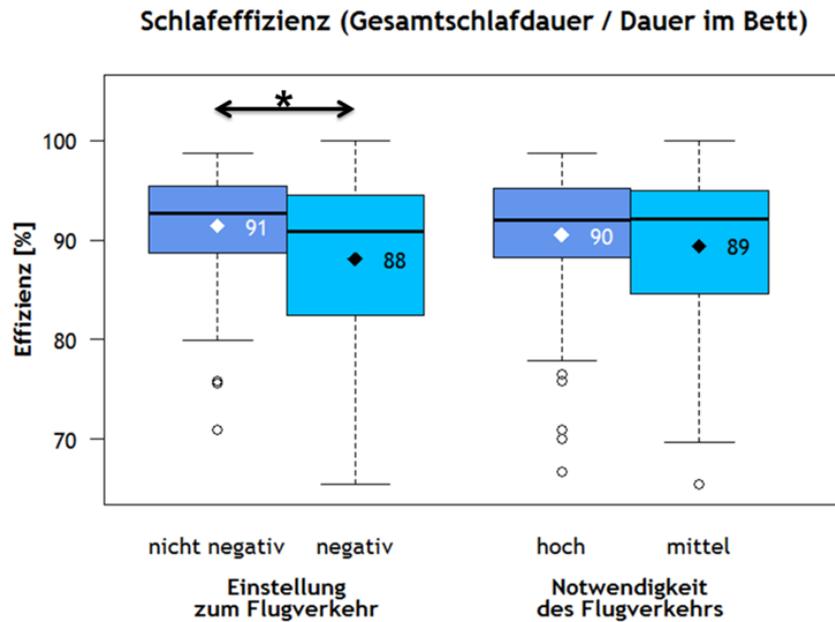


Abbildung 3-24: Schlafeffizienz (in Prozent) im Vergleich der subjektiven Bewertung des Flugverkehrs.

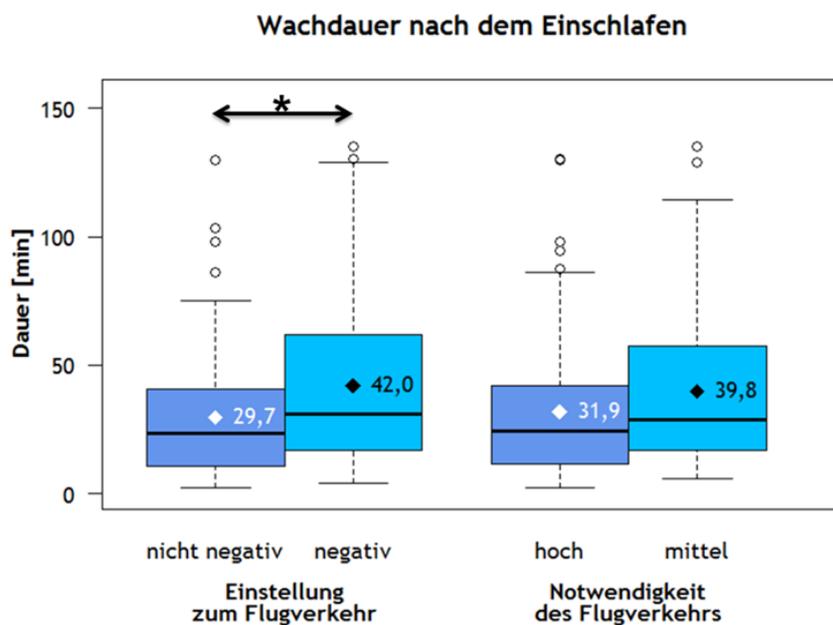


Abbildung 3-25: Kumulierte Wachdauer nach dem Einschlafen bis zum Aufstehen (in Minuten) im Vergleich der subjektiven Einstellung zum Flugverkehr.

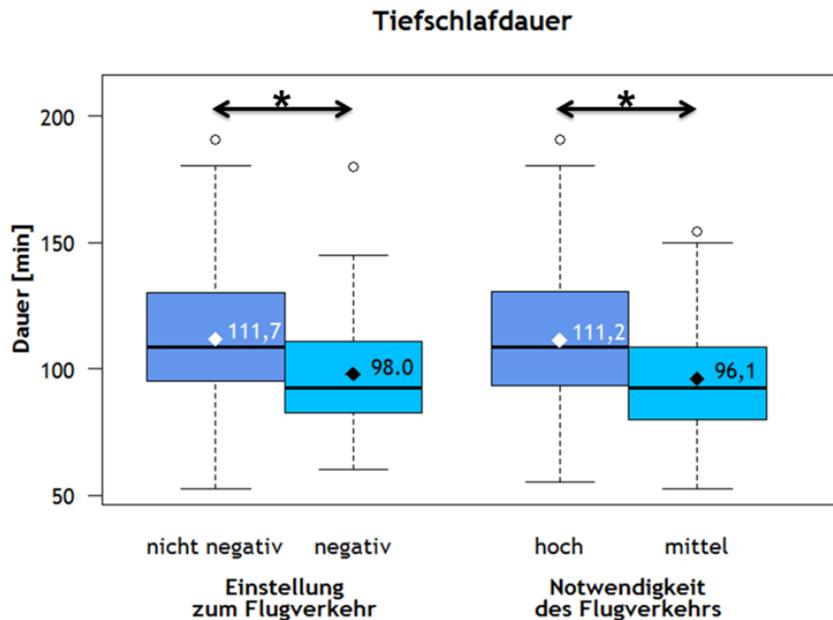


Abbildung 3-26: Dauer, die die Probanden im Tiefschlaf verbrachten (in Minuten), im Vergleich der Gruppen mit unterschiedlicher Einstellung zum Flugverkehr.

Die Tiefschlafdauer (Abbildung 3-26) war bei den Probanden signifikant vermindert, bei denen die Einstellung zum Flugverkehr negativ war bzw. die dem Flugverkehr lediglich eine mittlere Notwendigkeit beimaßen. Die REM-Schlafdauer zeigte sich unbeeinflusst (Abbildung 3-27).

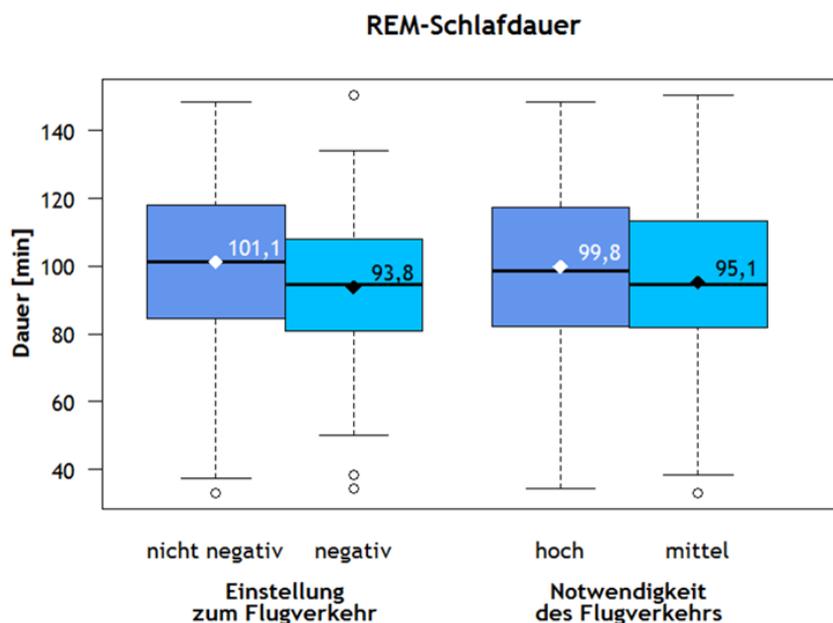


Abbildung 3-27: Dauer, die die Probanden im REM-Schlaf verbrachten (in Minuten), im Vergleich der Gruppen mit unterschiedlicher Einstellung zum Flugverkehr.

Bezogen auf die mittlere Aufwachhäufigkeit pro Nacht gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probanden, die eine negative ( $1,4 \pm 1,5$  (STD)) bzw. eine nicht-negative ( $1,1 \pm 1,6$  (STD)) Einstellung zum Flugverkehr hatten, oder denjenigen, die eine hohe ( $1,2 \pm 1,7$  (STD)) bzw. mittlere ( $1,3 \pm 1,3$  (STD)) Notwendigkeit des Flugverkehrs angaben.

### 3.1.5 Längsschnittvergleich der Jahre 2011, 2012 und 2013 mittels vegetativ-motorischer Methode

Im Jahr 2013 wurden mit Hilfe der vegetativ-motorischen Methode (Kapitel 2.6) 187 Versuchspersonen untersucht. Da bei diesen Versuchspersonen im Vorfeld keine Pulsoxymetrie durchgeführt wurde, waren in diesem Kollektiv 30 Probanden, die durch Sauerstoffentsättigungen in der Nacht auffielen, und dementsprechend von den weiteren Analysen ausgeschlossen wurden. Zusätzlich konnten 17 Probanden nicht in die Analysen aufgenommen werden, da die akustischen Aufzeichnungen durch defektes Messequipment ausgefallen waren. In einem dieser Fälle trat zusätzlich ein Datenverlust durch Artefakte im EKG auf. Bei zwei Versuchspersonen traten sowohl nächtliche Sauerstoffentsättigungen als auch Fehler bei der akustischen Messung auf. Zwei weitere Versuchspersonen hatten keine Überflüge und drei Versuchspersonen lediglich gestörte Fluglärmereignisse in der Schlafperiode. Auf diese Weise konnten 29 % der untersuchten Versuchspersonen nicht für die Analysen verwendet werden. Das selbständige Anbringen der Elektroden für die vegetativ-motorische Methode stellte keine Quelle für einen erhöhten Datenverlust dar. Für zukünftige Studien sollte allerdings für ein frühzeitiges Erkennen von an schlafbezogenen Atemstörungen erkrankten Personen Sorge getragen werden, indem beispielsweise im Vorfeld eine ebenfalls personal- und kostengünstige Pulsoxymetrie durchgeführt wird.

Tabelle 3-8: Überblick über Anzahl der Probanden, der Fluglärmereignisse und der vegetativ-motorischen Reaktionen.

	NORAH 2011	NORAH 2012	NORAH 2013	Gesamt
verwendete Fluglärmereignisse	3311	3349	4102	10862
Probanden	48*	78**	132***	168
Fluglärmassoziierte vegetativ-motorische Reaktionen	Ja: 354 (10,7%) Nein: 2957 (89,3%)	Ja: 560 (16,2%) Nein: 2889 (83,8%)	Ja: 534 (13,0%) Nein: 3568 (87,0%)	Ja: 1448 (13,3%) Nein: 9414 (86,7%)

\* Keine verwendeten Fluglärmereignisse bei einem Probanden.

\*\* Wegen schlechter Datenqualität bei der vegetativ-motorischen Methode wurde ein Proband ausgeschlossen.

\*\*\* Keine verwendeten Fluglärmereignisse für drei Probanden.

Da Einschlaf- und Aufwachzeitpunkt sowie Wachphasen während der Nacht, die auf Grundlage der vegetativ-motorischen Methode ermittelt wurden, leicht von den durch die

Polysomnografie bestimmten abwichen, kam es zu einer höheren Anzahl an Fluglärmereignissen, die für die Analyse verwendet wurden (Tabelle 3-8). Im Jahr 2011 waren dies 422 und im Jahr 2012 360 (Stadium Wach ausgeschlossen) bzw. 744 (Stadium Wach und S1 ausgeschlossen) verwendete Fluglärmereignisse mehr. 10,7 % der Fluglärmereignisse führten im Jahr 2011 zu fluglärmassoziierten vegetativ-motorischen Reaktionen; im Jahr 2012 waren es 16,2 % und im Jahr 2013 13,0 %.

Die Daten der Untersuchungen zu den vegetativ-motorischen Reaktionen der Jahre 2011, 2012 und 2013 wurden in einem Datensatz vereint, und die Prädiktoren für das Modell mit der besten Anpassungsgüte gemäß AIC ermittelt (Kapitel 2.8.3). Das Modell, welches in Tabelle 3-9 dargestellt ist, zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion im Untersuchungsjahr 2012 signifikant höher war als im Jahr 2011, während sich die Wahrscheinlichkeit im Jahr 2013 nicht mehr von derjenigen im Jahr 2011 unterschied (Abbildung 3-28). Wie auch die Wahrscheinlichkeit durch Fluglärm zu erwachen, stieg die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion mit zunehmendem  $L_{ASmax}$  und mit der verstrichenen Schlafdauer an. Sie sank mit der Dauer des Geräuschs. Interessanterweise nahm die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion mit zunehmendem Alter ab. Ein Modell, das zusätzlich die unterschiedlichen Bettzeiten berücksichtigte, ergab keinen signifikanten Unterschied in der Reaktionswahrscheinlichkeit für Bettzeit 1 versus Bettzeit 2 ( $p=0,8691$ ). Dies verdeutlicht Abbildung 3-29.

*Tabelle 3-9: Modell der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen Lärm und der Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion mit der besten Anpassungsgüte*

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer*	p-Wert
Konstante	-2,441	0,244	-2,096	< 0,001
$L_{ASmax}$	0,028	0,004	0,486	< 0,001
Geräuschkdauer	-0,009	0,002	-0,416	< 0,001
Studienjahr				
2011	0,000	Referenzgruppe		
2012	0,259	0,093	0,259	0,005
2013	-0,044	0,099	-0,044	0,658
verstrichene Schlafdauer	0,001	0,000	0,550	< 0,001
Alter	-0,018	0,004	-0,538	< 0,001

SF=Standardfehler,  $L_{ASmax}$ =maximaler Schalldruckpegel; \* Numerische Variablen werden zentriert und durch 2 Standardabweichungen geteilt. Kategoriale Variablen bleiben unverändert (Gelman, 2008).

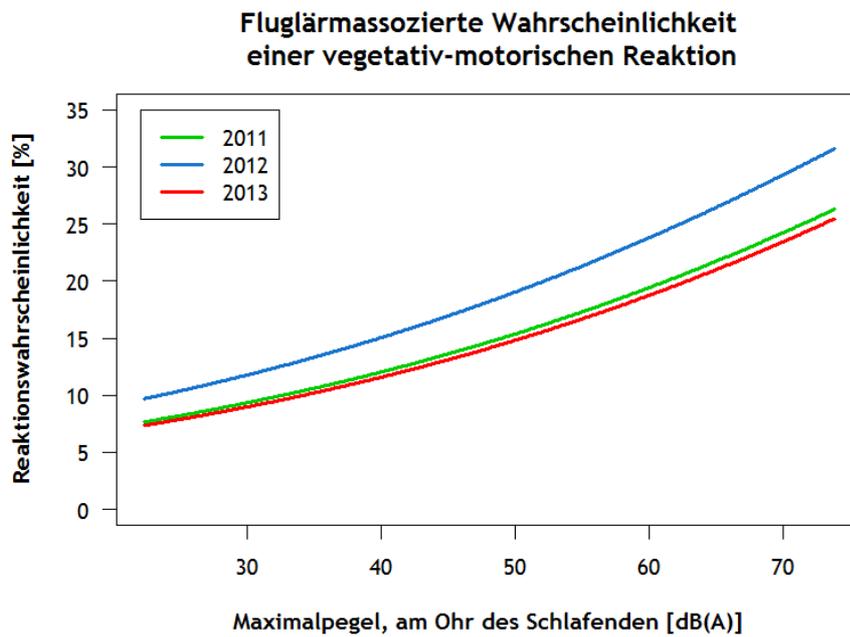


Abbildung 3-28: Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen maximalem Schalldruckpegel und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer vegetativ-motorischen Reaktion im Vergleich der Jahre 2011-2013 beruhend auf dem Modell in Tabelle 3-9. Geräushdauer=67 s (Median), Alter=42 Jahre (Median); verstrichene Schlafdauer=837 Epochen entspricht ca. 5:30 Uhr.

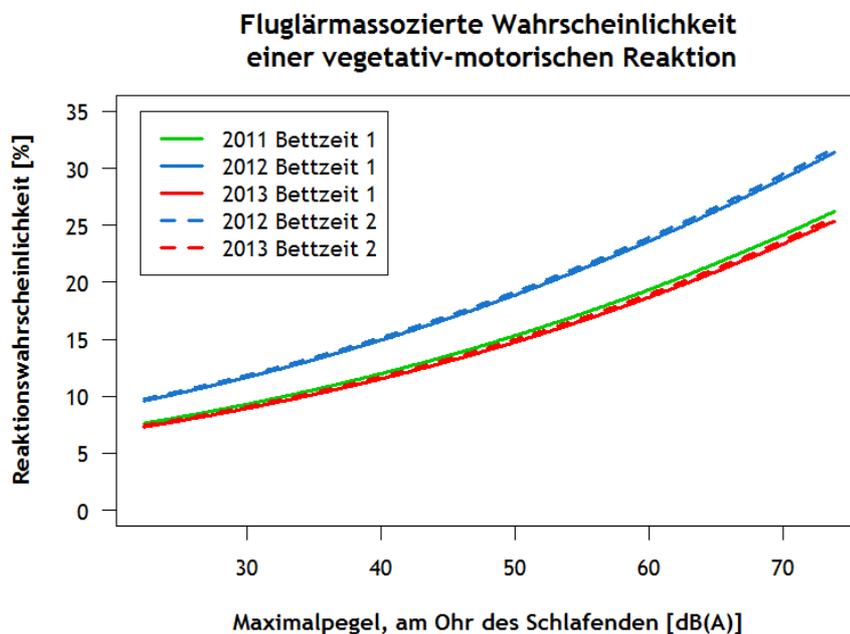


Abbildung 3-29: Expositions-Wirkungsbeziehung wie in Abbildung 3-28 mit zusätzlicher Unterscheidung nach Bettzeitgruppen.

### 3.1.6 Explorative Analyse der Unterschiede in den Expositions-Wirkungsbeziehungen der Polysomnografie im Vergleich zur vegetativ-motorischen Methode

Um die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion bei gleichem  $L_{ASmax}$  mit der Wahrscheinlichkeit einer Aufwachreaktion vergleichen zu können, wurde das Modell aus Tabelle 3-9 auch auf die Schlafdaten aus dem Jahr 2012 angewendet (ohne Indikatorvariable für das Studienjahr), für das alle Informationen aus der Polysomnografie zur Verfügung standen. Beim Vergleich der Schätzer des Modells der vegetativ-motorischen Reaktionen mit den Schätzern des Modells der Aufwachwahrscheinlichkeit fiel auf, dass diese für die meisten Prädiktoren ähnlich waren: Die Schätzer des  $L_{ASmax}$  und der verstrichenen Schlafdauer waren identisch. Für die Aufwachwahrscheinlichkeit war der Schätzer der Geräuschkdauer um 0,001 geringer, die Konstante betrug -4,690. Das Alter hingegen hatte einen gegenläufigen Einfluss in den Modellen. Während die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion mit zunehmendem Alter abnahm, hatte das Alter keinen signifikanten Effekt auf die Aufwachwahrscheinlichkeit.

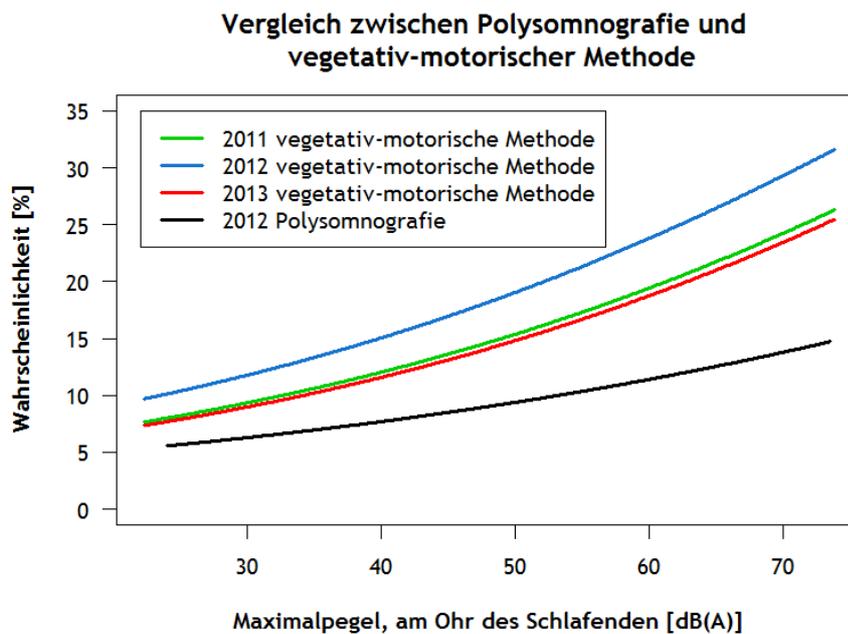


Abbildung 3-30: Expositions-Wirkungsbeziehung aus Abbildung 3-28 und Expositions-Wirkungsbeziehung beruhend auf der Polysomnografie des Jahres 2012.

In einem explorativen Ansatz wurde die Ursache für die beobachteten Unterschiede eingegrenzt:

Die Expositions-Wirkungsbeziehungen, die auf Grundlage der Polysomnografie bestimmt wurden, berücksichtigten nur diejenigen Lärmereignisse, die eintraten, wenn ein Proband schlief (S2-S4 und REM). In der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion während einer Wachphase und im Stadium S1 zur beobachteten Diskrepanz beitragen könnte, wurden Lärmereignisse, die auftraten, wenn sich ein Proband

im Jahr 2012 im Stadium Wach bzw. S1 befand, für eine erneute Modellierung der Wahrscheinlichkeit vegetativ-motorischer Reaktionen ausgeschlossen. Die verwendeten Fluglärmereignisse reduzierten sich ausgehend von 3449 auf 2466. Diese führten in 14,2 % der Fälle zu fluglärmassoziierten Reaktionen im Vergleich zu 16,2 % im gesamten Datensatz. Wie in Abbildung 3-31 grafisch veranschaulicht ist, sank durch dieses Vorgehen die modellierte Reaktionswahrscheinlichkeit. Des Weiteren sind Herzfrequenzbeschleunigungen und kurzzeitige Aktivierungen der Muskulatur typisch für den REM-Schlaf. In einem nächsten Analyseschritt wurden diejenigen Lärmereignisse ausgeschlossen, die im REM-Schlaf auftraten. Hierdurch reduzierte sich die Anzahl der verwendeten Fluglärmereignisse auf 1734, und eine vegetativ-motorische Reaktion trat in 11,1 % der Fälle auf. Die erneute Modellierung der vegetativ-motorischen Reaktionen (Abbildung 3-31) zeigt, dass sich hierdurch die Expositions-Wirkungskurven der vegetativ-motorischen Reaktionen und der Polysomnografie stark annähern.

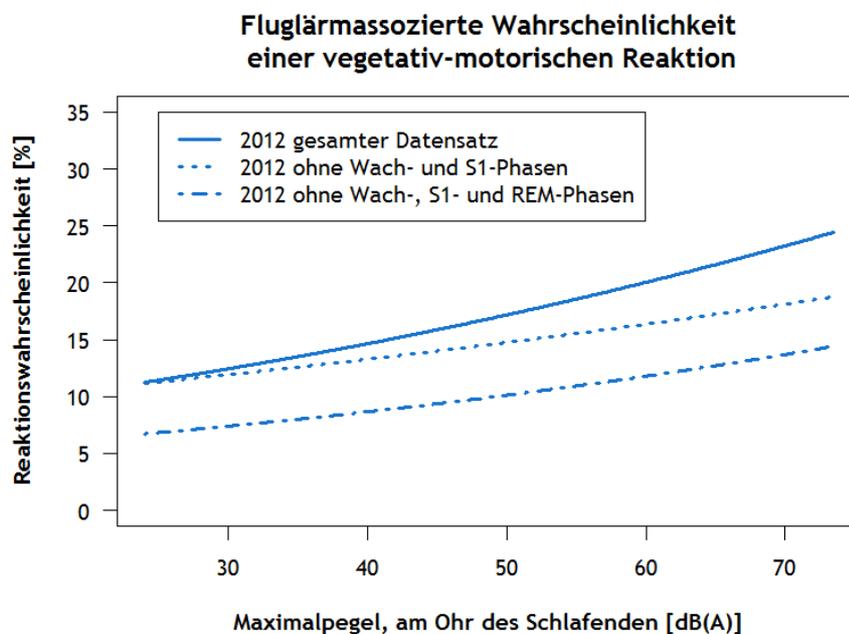


Abbildung 3-31: Expositions-Wirkungskurven der vegetativ-motorischen Reaktionswahrscheinlichkeit im Jahr 2012, für die der Datensatz um unterschiedliche Stadien (Wach und S1 bzw. Wach, S1 und REM reduziert und mit dem Gesamtdatensatz verglichen wurde.

Des Weiteren wurde untersucht, wie häufig der Algorithmus eine vegetativ-motorische Reaktion detektierte, ohne dass wirklich ein Arousal in Form einer EEG-Beschleunigung oder einer Bewegung vorlag. Im Jahr 2011 wurden 224 von insgesamt 3722 Reaktionen fehlerhaft klassifiziert (6,0 %), im Jahr 2012 wurden 9,3 % Reaktionen (insgesamt 3983 Reaktionen) ohne Korrelat in Herzfrequenz oder Bewegung detektiert. Diesen Fehlklassifikationen lagen häufig Artefakte im EKG zugrunde.

## 3.2 Subjektive Reaktionen

### 3.2.1 Deskriptive Statistik

In Abbildung 3-32 findet sich die Häufigkeitsverteilung für die Einschätzung der subjektiven Aufwachhäufigkeit im Sinne der Anzahl des erinnerten Aufwachens. Im Jahr 2011 geben etwa 65 % der Befragten an 1- bis 2-mal aufgewacht zu sein, weitere 16 % erinnern sich an ein dreimaliges Aufwachen in der Nacht, 19 % an mindestens 4-maliges Aufwachen. 2012 berichten etwa 55 % der Untersuchten 1- bis 2-mal aufgewacht zu sein, weitere 26 % geben an, dreimal in der Nacht aufgewacht, 19 % viermal oder häufiger aufgewacht zu sein. Im letzten Untersuchungsjahr sind 58 % der Probanden 1- bis 2-mal aufgewacht, 22 % dreimal und etwa 20 % viermal oder häufiger.

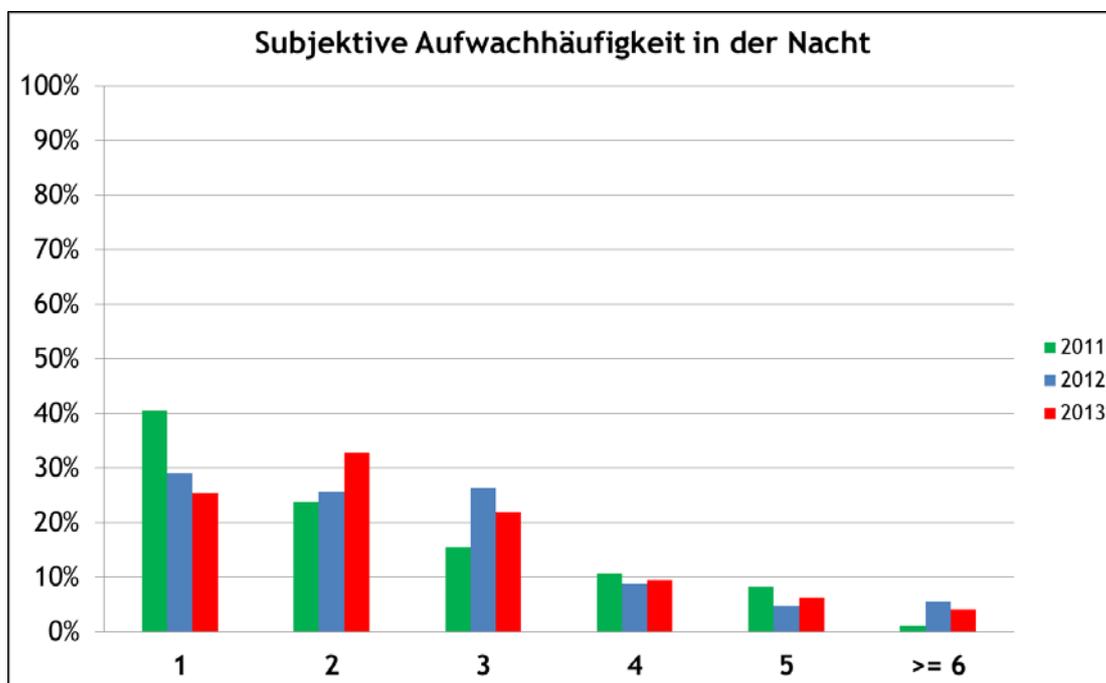


Abbildung 3-32: Prozentuale Verteilung der subjektiven Aufwachhäufigkeit (Anzahl) in der Nacht in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie oft sind Sie heute Nacht aufgewacht?“).

Die Probanden hatten die Möglichkeit anzugeben, warum sie in der Nacht aufgewacht sind. Als Antwortmöglichkeiten standen ihnen die Kategorien „Geräusche von draußen“, „andere Gründe“ und „weiß nicht“ zur Verfügung, Mehrfachantworten waren dabei möglich. 2011 geben 11 % als Ursache „Geräusche von draußen“ an, 32 % keinen Grund („weiß nicht“) und 35 % „andere Gründe“. 2012 benennen 10 % die „Geräusche von draußen“ als Ursache für ihr Aufwachen, 38 % wissen keinen Grund, 22 % nennen „andere Gründe“. 2013 sind für 10 % „Geräusche von draußen“ für ihr Aufwachen verantwortlich, 46 % geben an „weiß nicht“, für 27 % spielen „andere Gründe“ eine Rolle. Die „fehlenden Prozente“ in den drei Untersuchungsjahren verteilen sich auf verschiedene Kombinationen der genannten drei Kategorien im Sinne von Mehrfachnennungen.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse zu den subjektiven schlafbezogenen Sekundärreaktionen werden die Bewertungen in den drei Untersuchungsjahren mittels KSS, FAT und VAS im Folgenden anhand von Boxplots grafisch dargestellt, die die Streuung der Antworten anschaulich illustrieren (Abbildung 3-33 bis Abbildung 3-37). Die unterste Grenze zeigt die Grenze des 1. Quartils und die obere Linie die Grenze des 3. Quartils. Die Kästchen im Boxplot umfassen demnach die mittleren 50 % der Verteilung. Die mittlere horizontale Linie zeigt den Median. Die vertikalen Linien ober- und unterhalb der Kästchen zeigen den Bereich an, in dem weitere Antworten vorkommen, sofern sie höchstens innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands liegen. Ein Interquartilsabstand ist die Distanz zwischen dem 1. und 3. Quartil. Jede extremere Abweichung wird mit einem Kreis gekennzeichnet, falls sie innerhalb eines Bereichs des 3-fachen Interquartilsabstands liegen.

Abbildung 3-33 veranschaulicht die eingeschätzte Schläfrigkeit für die drei Messzeitpunkte 2011 bis 2013. Je höher der Wert, desto schläfriger beurteilen sich die Probanden. Es deutet sich eine Zunahme im Verlauf der drei Studienjahre an, d.h. dass die Schläfrigkeit von 2011 bis 2013 zugenommen hat. Ein statistischer Längsschnittvergleich der Schläfrigkeitsbeurteilungen befindet sich in Kapitel 3.2.6.1.

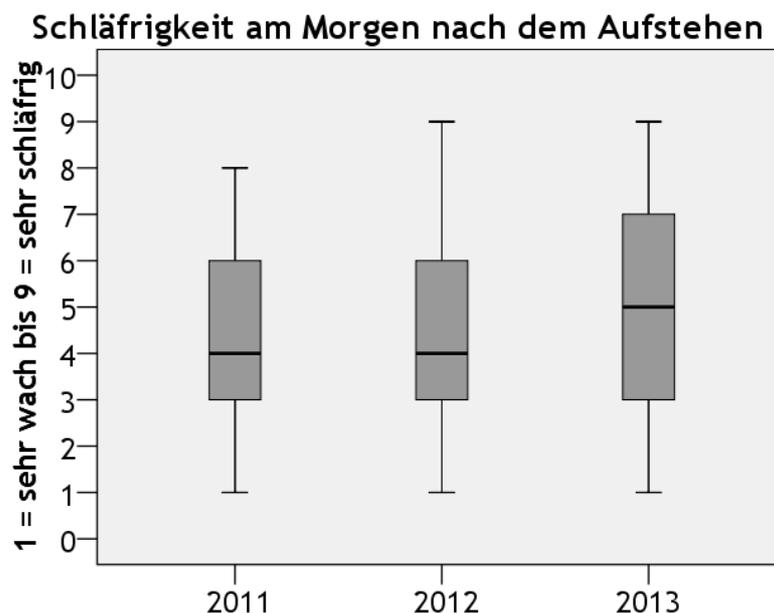


Abbildung 3-33: Boxplot zur Einstufung der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen anhand der Karolinska Sleepiness Scale (KSS) in den Stichproben 2011 bis 2013.

Abbildung 3-34 zeigt die eingestufte Müdigkeit für die Untersuchungsjahre 2011 bis 2013. Je höher der Wert, desto müder schätzen sich die Probanden ein. Für die subjektive Müdigkeit zeigt sich eine Zunahme im dreijährigen Studienverlauf, insbesondere im Jahr 2013 deutet sich ein Anstieg der Müdigkeit im Vergleich zu den ersten zwei Untersuchungsjahren an. Ein statistischer Längsschnittvergleich der Müdigkeitsbewertungen findet sich in Kapitel 3.2.6.1.

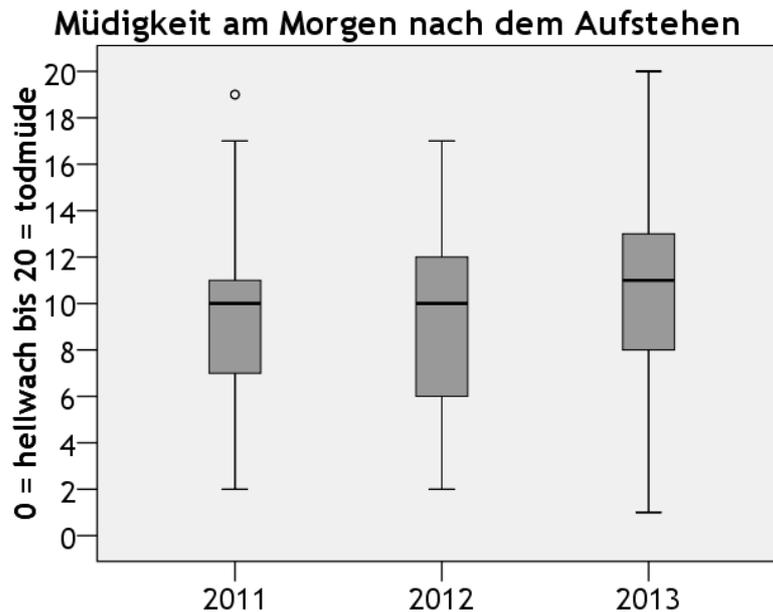


Abbildung 3-34: Boxplot zur Einstufung der subjektiven Müdigkeit am Morgen anhand des Fatigue-Fragebogens (FAT) in den Stichproben 2011 bis 2013.

Abbildung 3-35 bis Abbildung 3-37 beleuchten die subjektiven Schlafbewertungen mittels VAS getrennt für die Jahre 2011 bis 2013. Mittels der VAS wurde der Vorgang des Einschlafens am Abend (leicht - schwer), die empfundene Schlaftiefe (tief - leicht) und Schlafdauer (zu kurz - zu lang), der Erholungswert des Schlafs (groß - gering), die Bewegungshäufigkeit (gering - groß) und motorische Unruhe während der Nacht (ruhig - unruhig) bewertet. Die Markierung der VAS mittels eines Schiebereglers wurde in Prozentwerte umgewandelt. Je höher der Wert, desto schlechter ist dieser im Hinblick auf die Schlafbeurteilung bzw. Schlafqualität einzustufen. Die Werte bewegen sich für alle drei Untersuchungsjahre im unteren bis mittleren Bereich (d.h. eher positiv bis neutral).

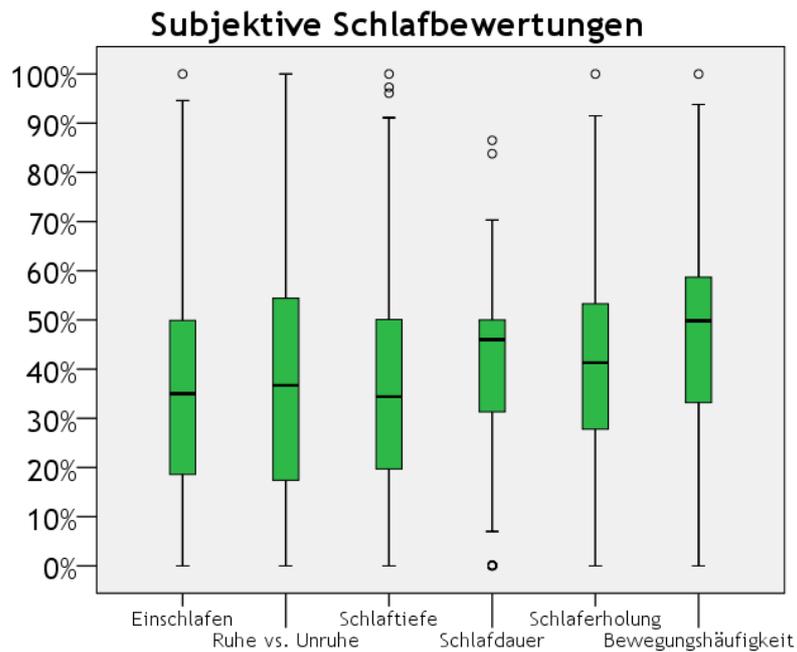


Abbildung 3-35: Boxplot zur subjektiven Schlafbewertung anhand visueller Analogskalen (VAS) in der Stichprobe 2011.

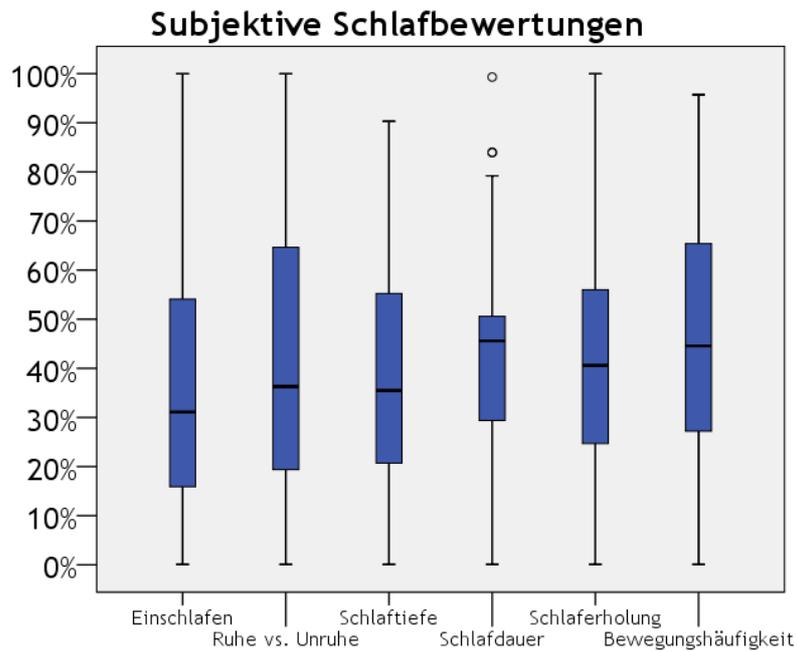


Abbildung 3-36: Boxplot zur subjektiven Schlafbewertung anhand visueller Analogskalen (VAS) in der Stichprobe 2012.

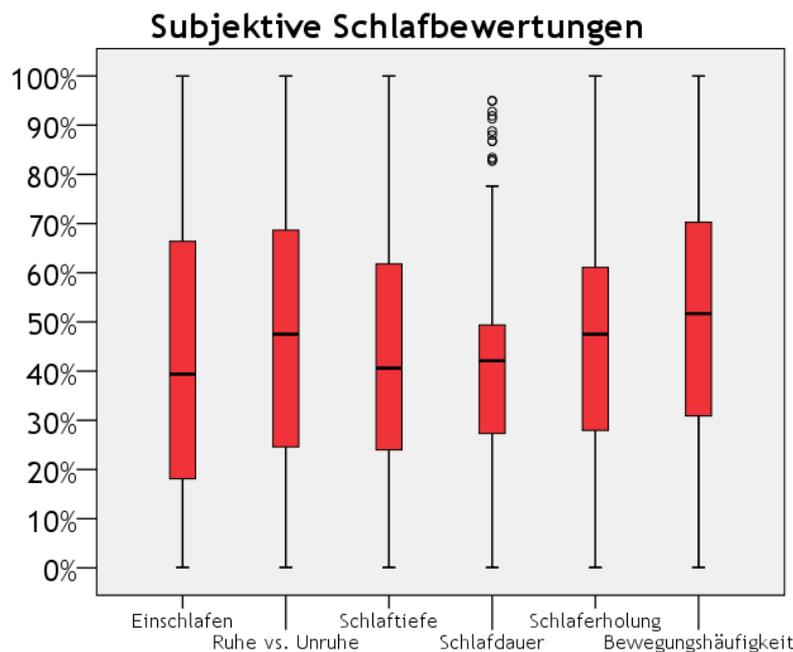


Abbildung 3-37: Boxplot zur subjektiven Schlafbewertung anhand visueller Analogskalen (VAS) in der Stichprobe 2013.

### 3.2.2 Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2011

Die Ermittlung der Expositions-Wirkungskurven zwischen subjektiven Schlafstörungen und objektiver akustischer Fluglärmbelastung basiert auf der grundlegenden Hypothese, dass sich mit wachsender nächtlicher Fluglärmbelastung das individuelle und selbst berichtete Schlaferleben signifikant verschlechtert (z.B. abnehmende Schlaferholung, zunehmende subjektive Aufwachhäufigkeit nachts, erhöhte Müdigkeit und Schläfrigkeit). Da in der Literatur sowohl der Mittelungspegel  $L_{ASeq}$  als auch die Anzahl an Schallereignissen als valide akustische Indikatoren zur Vorhersage lärminduzierter Sekundärreaktionen beschrieben werden, wurden für die Variablen jeweils zwei getrennte Regressionsmodelle berechnet, nämlich eines mit der Anzahl der Überflüge und eines mit dem  $L_{ASeq}$ . Die einzelnen Analyseschritte zur Ableitung der Kurven sind in Kapitel 2.8.3 ausführlich beschrieben. Der Übersicht halber werden im Folgenden stets nur die statistisch signifikanten Ergebnisse der Auswertungen im Detail beschrieben.

Im ersten Untersuchungsjahr mit  $N=49$  Probanden ergeben die Analysen lediglich für die Schläfrigkeit einen signifikanten Einfluss des nächtlichen Fluglärms. In den beiden Regressionsmodellen „KSS-Anzahl-2011“ und „KSS- $L_{ASeq}$ -2011“ werden durch das Modellselektionsverfahren die Variablen „allgemeines Lautstärkeempfinden in der Wohngegend“ und der „Chronotyp“ ausgewählt (Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11).<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Bei den nicht-akustischen personenbezogenen und psychologischen Parametern lagen bei wenigen Probanden teilweise Datenlücken vor. Der Prozentsatz war relativ gering, beispielsweise gab es in 2011 bei 49 Probanden insgesamt nur 6 Personen (12.2 %), für die es keine Angaben zum Lautstärkeempfinden gab. Für alle anderen Parameter (d.h. die Fluglärmgewöhnung, die

Tabelle 3-10: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell KSS-Anzahl-2011).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	4,239	0,684	3,650	< 0,001
Anzahl der Überflüge	0,013	0,007	0,612	0,041
Lautstärkeempfinden in der Wohngegend	-0,460	0,204	-0,877	0,024
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	0,755	0,683	0,755	0,269
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	1,376	0,507	1,376	0,007

Tabelle 3-11: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell KSS- $L_{ASeq}$ -2011).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	4,780	0,761	3,593	< 0,001
$L_{ASeq}$	-0,007	0,017	-0,116	0,673
Lautstärkeempfinden in der Wohngegend	-0,381	0,210	-0,726	0,070
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	0,906	0,700	0,906	0,198
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	1,404	0,496	1,404	0,005

Die folgende Beschreibung ist als Interpretationshilfe für alle in diesem Kapitel aufgeführten Tabellen gedacht. Die bei der Interpretation zugrunde gelegten Werte sind in Tabelle 3-10 farblich gekennzeichnet. Für alle folgenden Analysen wird ein Signifikanzniveau von 0,05 angenommen. Es ist zu entnehmen, dass die Anzahl an Fluglärmereignissen einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Schläfrigkeit hat ( $p$ -Wert  $\leq 0,05$ ). In diesem Fall bedeutet dies, dass jedes zusätzliche Überflugeräusch in der Nacht

Fluglärmvorbelastung und der Chronotyp) in 2011 und in den Folgejahren war der prozentuale Anteil an fehlenden Werten noch geringer. Da die psychologischen Parameter in allen drei Untersuchungsjahren erfasst wurden, konnten für die Probanden, die mehrmals untersucht wurden, die fehlenden Werte unter der Annahme, dass die Parameter über die Jahre konstant geblieben sind, durch die Angaben aus den anderen Studienjahren ergänzt werden. Dementsprechend wurden fehlende Angaben in 2011 mit Werten aus 2012 ersetzt. Fehlende Angaben aus 2012 wurden durch Werte aus 2011 oder 2013 ersetzt, fehlende Angaben aus 2013 durch Werte aus 2012. Nach dieser Ersetzungsmethode konnte die Anzahl an fehlenden Werten reduziert werden (unter 3.5 %). Für die verbleibenden fehlenden Werte wurde anhand des Little's MCAR-Test belegt, dass diese „missing completely at random“ (MCAR) sind (Little & Rubin 2002; Little 1988). Die MCAR-Werte wurden vor der Modellbildung durch singuläre Regressionsimputation ersetzt, eine angemessene Imputationsmethode bei einer geringen Anzahl an fehlende Werten (Scheffer 2002; Shrive et al. 2006).

den KSS-Skalenwert um 0,013 Punkte ansteigen lässt, bei 10 zusätzlichen Flugzeugen pro Nacht wären dies 0,13 Punkte (dies entspricht etwa einer zehntel Skalenstufe). In Bezug auf die Variable „Lautstärkeempfinden in der Wohngegend“ ist zu erkennen, dass diese ebenfalls einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Schläfrigkeit hat (p-Wert kleiner 0,05). Eine Zunahme des Lautstärkeempfindens um eine Kategorie bewirkt eine Abnahme des KSS-Skalenwerts um 0,460 Punkte (dies entspricht etwa einer halben Skalenstufe). Demgemäß sind Personen mit einem subjektiv höheren Lautstärkeempfinden weniger schläfrig als Personen mit einem geringeren Lautstärkeempfinden. Die Variable „Chronotyp“ ist eine kategoriale Variable, die eine beschränkte Anzahl an Kategorien hat. Die verschiedenen Kategorien sind in Tabelle 3-10 aufgeführt: „definitiver Morgentyp“, „moderater Morgentyp“, „Neutraltyp“ und „moderater Abendtyp“. Der „Neutraltyp“ und „moderate Abendtyp“ wurden zu einer Kategorie zusammengefasst, da der moderate Abendtyp in der NORAH-Schlafstudie aufgrund des Studiendesigns selten vorkam. Bei einer kategorialen Variable ist der Effekt der jeweiligen Kategorien immer in Relation zur Referenzkategorie zu setzen. In Tabelle 3-10 ist die Referenzkategorie der „definitive Morgentyp“. Dies bedeutet beispielsweise, dass der moderate Morgentyp im Vergleich zum definitiven Morgentyp 0,755 mehr Skalenpunkte auf der KSS-Skala hat (dies entspricht 75 % einer Skalenstufe). Dieser Unterschied ist jedoch nicht statistisch signifikant (p-Wert > 0,05). Andererseits ist der Unterschied zwischen dem Neutraltyp und dem definitiven Morgentyp statistisch signifikant (p-Wert  $\leq$  0,05). Der Neutraltyp hat einen Skalenwert, der um 1,376 Punkte höher ist als der definitive Morgentyp. Das heißt, dass der Neutraltyp morgens fast anderthalb Kategorien schläfriger ist als der definitive Morgentyp. Die Aussagen zum Lautstärkeempfinden und zum Chronotyp sind jeweils unabhängig von der Anzahl der Überflüge in der Nacht zu betrachten.

Abbildung 3-38 veranschaulicht die durch das Regressionsmodell „KSS-Anzahl-2011“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl an nächtlichen Fluglärmereignissen. Die in der Abbildung angenommenen Werte der individuellen Einflussgrößen entsprechen dem Median (Lautstärkeempfinden = 3) bzw. der häufigsten Nennung der Chronotypkategorie in der untersuchten Stichprobe (d.h. der Neutraltyp/moderate Abendtyp). Es ist zu entnehmen, dass die Schläfrigkeit mit der Häufigkeit von nächtlichen Schallereignissen ansteigt. Nach dem Regressionsmodell „KSS-Anzahl-2011“ hat also die Schläfrigkeit als Ausdruck lärmbedingter subjektiver Schlafstörungen in Abhängigkeit vom Ausmaß der nächtlichen Fluglärmbelastung (hier operationalisiert anhand der Anzahl der Überflüge in der Nacht bei durchgängigem Flugbetrieb) signifikant zugenommen. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit Hypothese (A). Es ist zu beachten, dass sich die Schläfrigkeit insgesamt auf einem mittleren Niveau im Wertebereich zwischen 4 und 5 bewegt. Die KSS misst den aktuellen Schläfrigkeitsgrad mit einer Abstufung von 1 (sehr wach) bis 9 (sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend). Dies bedeutet, dass die Probanden zu keiner Zeit morgens nach dem Aufstehen „sehr wach“ (Skalenwert = 1) oder „wach“ (Skalenwert = 3) gewesen sind.

Da im Regressionsmodell „KSS- $L_{ASeq}$ -2011“ kein statistisch signifikanter Einfluss des energieäquivalenten Dauerschallpegels auf die Schläfrigkeit nachgewiesen werden konnte, wird auf eine entsprechende grafische Darstellung der Beziehung verzichtet.

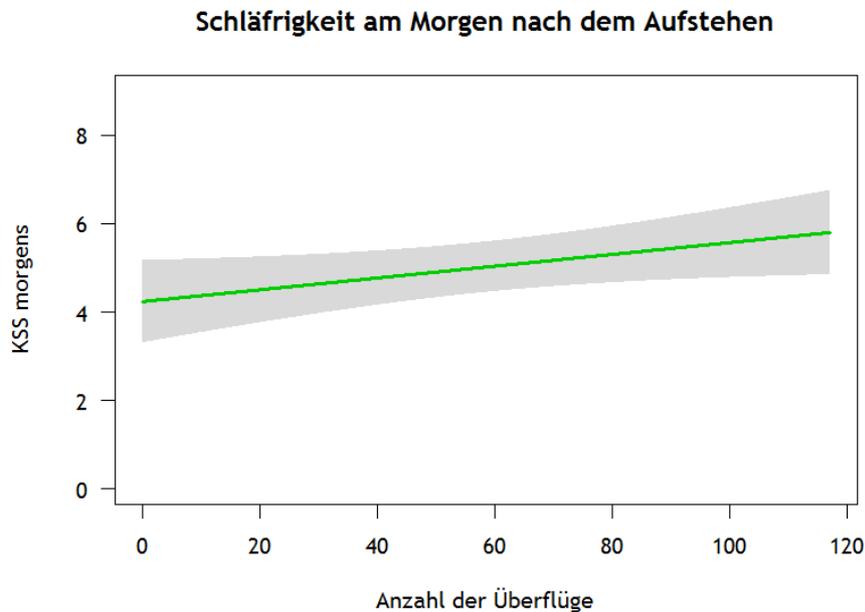


Abbildung 3-38: Durch das Regressionsmodell „KSS-Anzahl-2011“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in der Stichprobe 2011. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an.

### 3.2.3 Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2012

Im zweiten Untersuchungsjahr mit N=78 Teilnehmern zeigt sich nur für die nächtliche Schlaferholung (gemessen mit einer VAS) ein statistisch signifikanter Effekt des nächtlichen Fluglärms und hierbei auch nur ähnlich wie in 2011 in Bezug auf die Anzahl der nächtlichen Fluglärmereignisse. Der Einfluss des energieäquivalenten Dauerschallpegels  $L_{ASeq}$  ist nicht statistisch signifikant.

Anhand des Modellselektionsverfahrens wird für die Regressionsmodelle „Schlaferholung-Anzahl-2012“ und „Schlaferholung- $L_{ASeq}$ -2012“ die personenbezogene Variable „Chronotyp“ ausgewählt (Tabelle 3-12 und Tabelle 3-13).

Tabelle 3-12: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der nächtlichen Schlaferholung in der Vorhersage der nächtlichen Schlaferholung in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell Schlaferholung-Anzahl-2012).

	Schätzer	SF	Standard Schätzer	p-Wert
Konstante	40,445	5,523	48,170	< 0,001
Anzahl der Überflüge	0,213	0,080	9,530	0,008
<b>Chronotyp</b>				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	-13,316	6,161	-13,316	0,031
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	-2,450	6,119	-2,450	0,689

Tabelle 3-13: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der nächtlichen Schlaferholung in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell Schlaferholung- $L_{ASeq}$ -2012).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	38,402	7,758	46,720	< 0,001
$L_{ASeq}$	0,303	0,188	5,580	0,107
<b>Chronotyp</b>				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	-11,873	6,263	-11,873	0,058
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	-0,310	6,283	-0,310	0,961

Abbildung 3-45 untermauert die durch das Modell „Schlaferholung-Anzahl-2012“ prognostizierte nächtliche Erholung im Schlaf in Abhängigkeit von der Anzahl der Fluglärmereignisse. Der in der Abbildung angenommene Wert der personenbezogenen Größe entspricht der häufigsten Kategorie des Chronotyps (d.h. der Neutraltyp/moderate Abendtyp). Es ist ersichtlich, dass mit steigender Anzahl an Überflügen die nächtliche Schlaferholung abnimmt. Dabei ist zu beachten, dass mit steigender Höhe des VAS-Werts die Schlaferholung sinkt. Auch mit Einführung der Kernruhezeit wird der Erholungswert des nächtlichen Schlafs entsprechend Hypothese (A) in Abhängigkeit vom Ausmaß der nächtlichen Fluglärmexposition (hier gemessen anhand der Anzahl der Flugbewegungen in der Nacht) gemäß dem Regressionsmodell „Schlaferholung-Anzahl-2012“ signifikant beeinträchtigt.

Da im Modell „Schlaferholung- $L_{ASeq}$ -2012“ kein statistisch signifikanter Effekt des Fluglärms besteht, erfolgt keine grafische Darstellung des Zusammenhangs.

### Bewertung der Schlaferholung in der Nacht

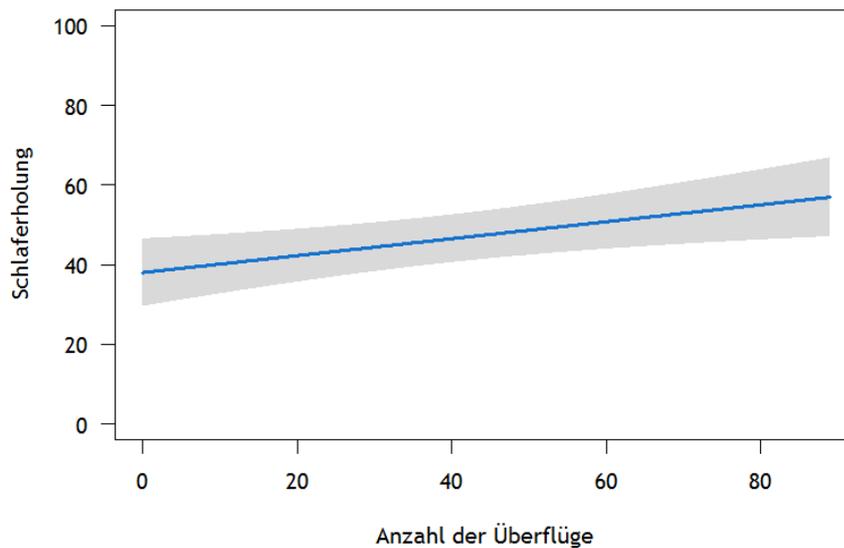


Abbildung 3-39: Durch das Regressionsmodell „Schlaferholung-Anzahl-2012“ vorhergesagte nächtliche Schlaferholung in der Stichprobe 2012. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an.

#### 3.2.4 Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2013

Im dritten Jahr mit N=156 Probanden liegt ein statistisch signifikanter Einfluss der nächtlichen Fluglärmbelastung auf die subjektive Müdigkeit und Schläfrigkeit vor.

Die Modelle „FAT-Anzahl-2013“ und „FAT-L<sub>ASeq</sub>-2013“ beinhalten die nicht-akustischen Variablen „Chronotyp“, „Alter“ und „Gewöhnung an Fluglärm“ (Tabelle 3-14 und Tabelle 3-15).

Tabelle 3-14: GEE-Regressionmodell zur Vorhersage der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell FAT-Anzahl-2013).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	11,389	1,540	8,864	0,000
Anzahl der Überflüge	0,012	0,009	0,397	0,194
Gewöhnung an Fluglärm	-0,639	0,229	-1,307	0,005
Alter	-0,028	0,016	-0,863	0,088
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	1,339	0,860	1,339	0,120
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	2,005	0,857	2,005	0,019

Tabelle 3-15: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell FAT- $L_{ASeq}$ -2013).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	11,188	1,559	8,836	0,000
$L_{ASeq}$	0,035	0,018	0,664	0,061
Gewöhnung an Fluglärm	-0,674	0,231	-1,378	0,004
Alter	-0,032	0,017	-0,984	0,054
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	1,355	0,872	1,355	0,121
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	2,044	0,869	2,044	0,019

Da in den Modellen „FAT- $L_{ASeq}$ -2013“ und „FAT-Anzahl-2013“ kein statistisch signifikanter Einfluss des Fluglärms vorliegt, wird auf eine grafische Darstellung verzichtet. In den Regressionsmodellen „KSS-Anzahl-2013“ und „KSS- $L_{ASeq}$ -2013“ verbleibt der Parameter „Chronotyp“ (Tabelle 3-16 und Tabelle 3-17).

Tabelle 3-16: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell KSS-Anzahl-2013).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	3,705	0,313	3,875	< 0,001
Anzahl der Überflüge	0,009	0,006	0,286	0,134
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	0,839	0,358	0,839	0,019
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	1,378	0,347	1,378	< 0,001

Tabelle 3-17: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell KSS- $L_{ASeq}$ -2013).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	3,454	0,376	3,831	< 0,001
$L_{ASeq}$	0,020	0,010	0,383	0,046
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	0,866	0,372	0,866	0,020
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	1,438	0,360	1,438	< 0,001

Abbildung 3-45 und Abbildung 3-41 veranschaulichen den durch die Modelle „KSS-Anzahl-2013“ und „KSS-L<sub>ASeq</sub>-2013“ beschriebene Schläfrigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Fluglärmereignisse und dem energieäquivalenten Dauerschallpegel. Die berücksichtigte personenbezogene Variable entspricht der häufigsten Antwortkategorie des Chronotyps (d.h. der Neutraltyp/moderate Abendtyp). Es ist zu entnehmen, dass die Schläfrigkeit in Abhängigkeit von der Häufigkeit an nächtlichen Flugbewegungen sowie dem durchschnittlichen Lärmpegel in der Nacht (L<sub>ASeq</sub>) zunimmt. Die Regressionsmodelle „KSS-Anzahl-2013“ und „KSS-L<sub>ASeq</sub>-2013“ bestätigen Hypothese (A). Ähnlich wie in 2011 liegt die aktuelle Schläfrigkeit auf einem mittleren Niveau (Skalenwerte zwischen 4 und 5), d.h. dass die Probanden nach dem Aufstehen nie „sehr wach“ (Skalenwert = 1) oder „wach“ (Skalenwert = 3) sind.

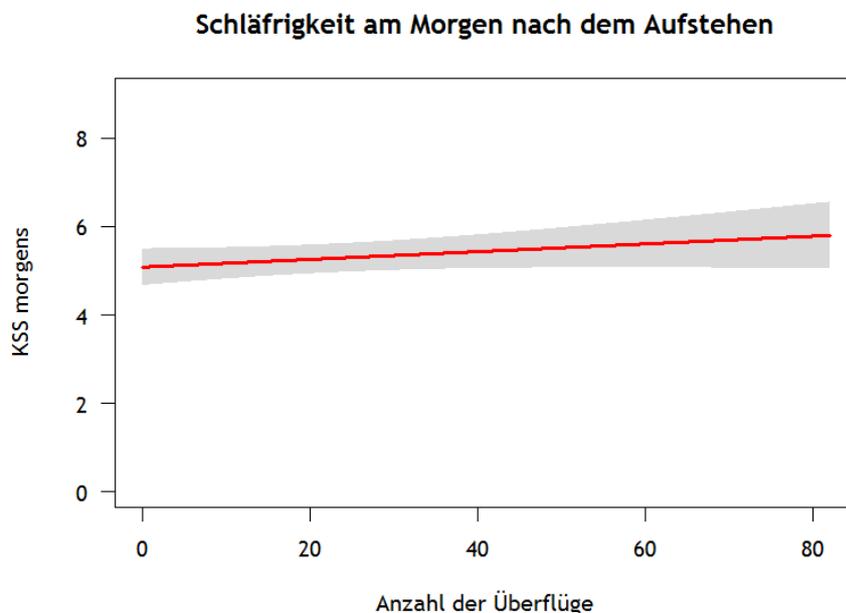


Abbildung 3-40: Durch das Regressionsmodell „KSS-Anzahl-2013“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 %-Konfidenzintervall an.

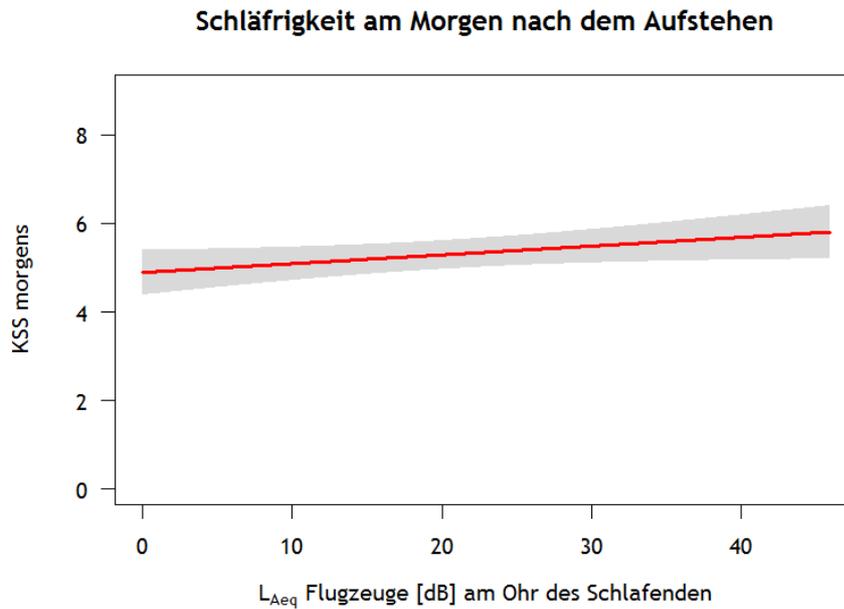


Abbildung 3-41: Durch das Regressionsmodell „KSS- $L_{ASeq}$ -2013“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 %-Konfidenzintervall an.

### 3.2.5 Ergebnisse zur akuten Belästigung durch Fluglärm in der Nacht

#### 3.2.5.1 Deskriptive Statistik

Im letzten Untersuchungsjahr wurden während der Studie Befragungen zur Fluglärmbelästigung der Anwohner retrospektiv bezogen auf die Lärmexposition der vorausgegangen Nacht (im Sinne einer akuten Belästigung) durchgeführt, da angenommen wurde, dass die Belastungssituation im Jahr 2013 mutmaßlich einer von den Probanden als stabil wahrgenommenen statischen Situation nach Einführung der Kernruhezeit entspricht. Abbildung 3-42 zeigt die prozentuale Häufigkeitsverteilung der Antwort auf die Frage „Wie stark wurden Sie durch den Fluglärm der vergangenen Nacht belästigt?“, die auf einer 5-stufigen Ratingskala erhoben wurde. Wie dargestellt, fühlt sich der überwiegende Teil der Befragten (ca. 70 %) „nicht“ oder nur „wenig“ belästigt. 12 % geben an, „ziemlich“ bzw. „sehr“ belästigt zu sein, weitere 18 % fühlen sich „mittelmäßig“ belästigt.

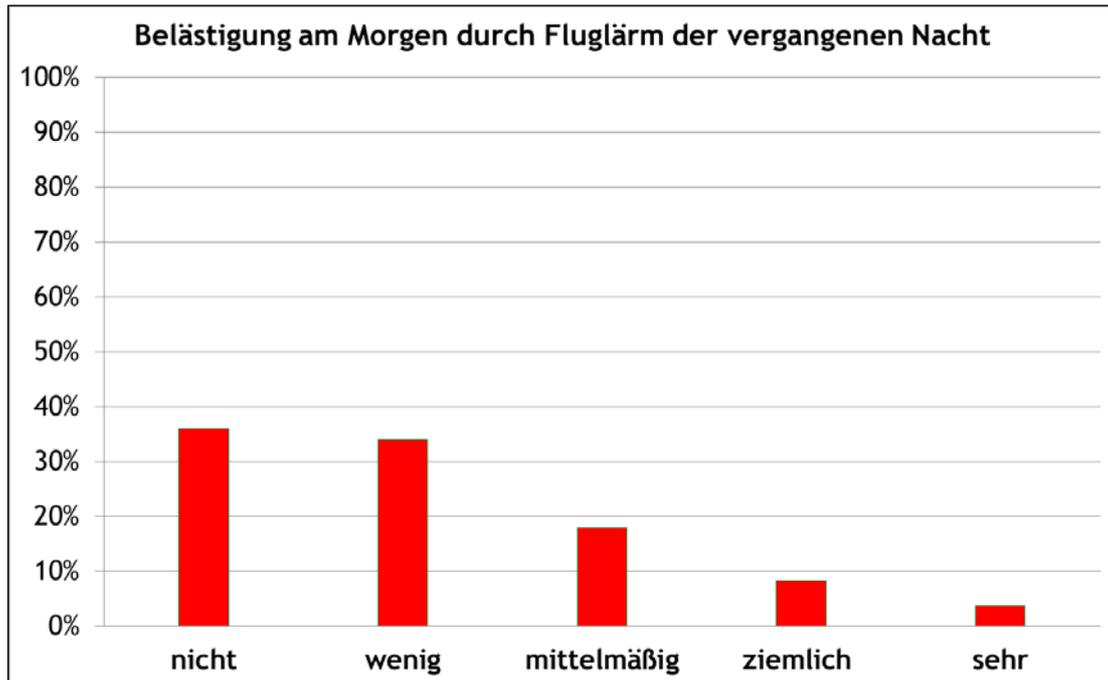


Abbildung 3-42: Prozentuale Verteilung der Belästigung am Morgen in der Stichprobe 2013 (Frage: „Wie stark wurden Sie durch den Fluglärm der vergangenen Nacht belästigt?“).

### 3.2.5.2 Expositions-Wirkungskurven zur akuten Fluglärmbelästigung 2013

Im Gegensatz zu den Müdigkeits- und Schläfrigkeitsbewertungen wurde die erfragte akute Belästigung durch Fluglärm in der NORAH-Schlafstudie 2013 in der Auswertung als dichotome Größe behandelt (belästigt ja/nein). Zur Dichotomisierung wurden die Stufen 3, 4 und 5 (Vorliegen einer Belästigung durch Fluglärm) bzw. die Stufen 1 und 2 (keine Belästigung durch Fluglärm) zusammengefasst.

Für die von N=157 Probanden auswertbaren Daten liegt eine statistisch signifikante durch Fluglärm in der vorausgegangenen Nacht bedingte Belästigung vor.

Durch das Modellselektionsverfahren werden für die Modelle „Bel-Anzahl-2013“ und „Bel- $L_{ASeq}$ -2013“ die psychologischen Größen „Lautstärkeempfinden in der Wohngegend“ und „Gewöhnung an Fluglärm“ ausgewählt (Tabelle 3-18 und Tabelle 3-19).

Tabelle 3-18: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell Bel-Anzahl-2013).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	-2,176	1,001	-1,669	0,030
Anzahl der Überflüge	0,058	0,011	1,924	< 0,001
Lautstärkeempfinden in der Wohngegend	0,749	0,294	1,109	0,011
Gewöhnung an Fluglärm	-0,993	0,231	-2,041	< 0,001

Tabelle 3-19: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell Bel-L<sub>ASeq</sub>-2013).

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	-3,036	1,044	-1,667	0,004
L <sub>ASeq</sub>	0,086	0,020	1,653	< 0,001
Lautstärkeempfinden in der Wohngegend	0,887	0,293	1,313	0,002
Gewöhnung an Fluglärm	-0,987	0,233	-2,028	< 0,001

Die in Abbildung 3-43 und Abbildung 3-44 angenommenen Werte der psychologischen Parameter entsprechen dem Median der untersuchten Stichprobe (Gewöhnung an Fluglärm= 3, Lautstärkeempfinden = 3). Es ist ersichtlich, dass die Belästigungswahrscheinlichkeit sowohl mit der Zunahme des Mittelungspegels als auch mit der Häufigkeit von Flugereignissen ansteigt. Diese Effekte sind erheblich. Die Regressionsmodelle „Bel-Anzahl-2013“ und „Bel-L<sub>ASeq</sub>-2013“ bestätigen Hypothese (A), die davon ausgeht, dass die Belästigung mit wachsender nächtlicher Fluglärmbelastung signifikant zunimmt.

In einem weiteren Analyseschritt wurde für die Modelle „Bel-Anzahl-2013“ und „Bel-L<sub>ASeq</sub>-2013“ eine Differenzierung für die Belastungsänderung vorgenommen, d.h. es wurde in die Modelle der zusätzliche Parameter der Belastungsänderung integriert, um eine Unterscheidung zwischen alt (N=139) und neu belasteten (N=18) Anwohnern vornehmen zu können (Tabelle 3-20 und Tabelle 3-21). Die Gruppe der alt belasteten Probanden ist gegenüber den neu belasteten Personen statistisch signifikant stärker belästigt, dieser Effekt ist unabhängig von der Fluglärmbelastung zu sehen. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu den Befunden aus dem NORAH-Belästigungsmodul, denen zufolge diejenigen, die eine Belastungszunahme erfahren haben, statistisch signifikant belästigter sind. Es ist zu berücksichtigen, dass im vorliegenden Fall die Gruppe der alt belasteten mit N=139 deutlich größer ist als die Gruppe der im Jahr 2013 neu belasteten (N=18).

### Belästigung am Morgen durch Fluglärm der vergangenen Nacht

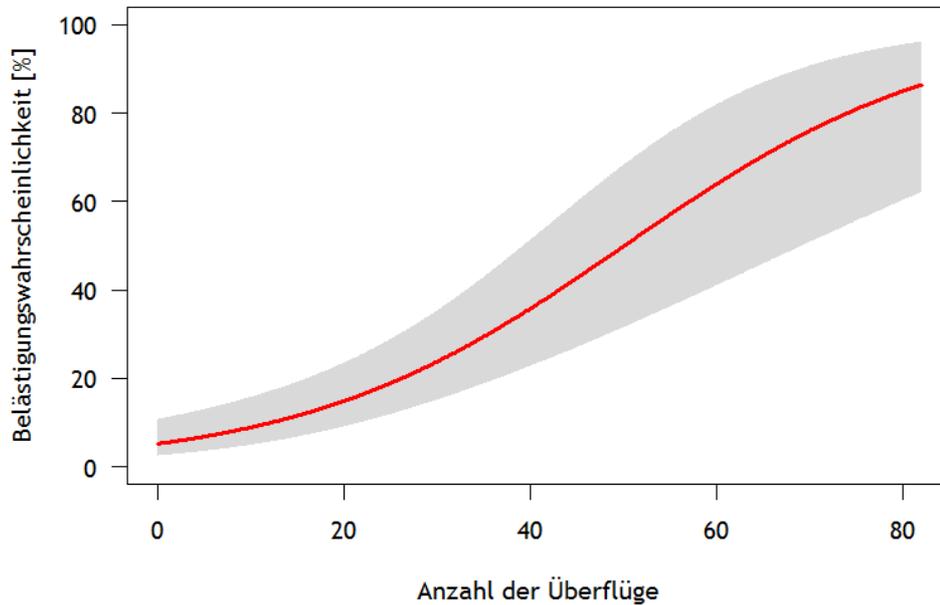


Abbildung 3-43: Durch Regressionsmodell „Bel-Anzahl-2013“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an.

### Belästigung am Morgen durch Fluglärm der vergangenen Nacht

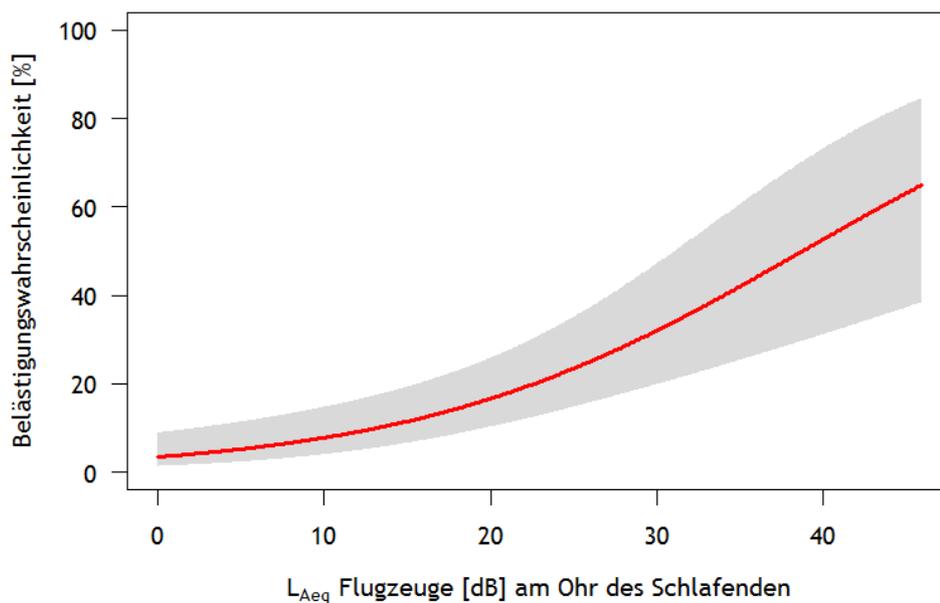


Abbildung 3-44: Durch Regressionsmodell „Bel-L<sub>ASeq</sub>-2013“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an.

Die entsprechenden Illustrationen sind Abbildung 3-45 und Abbildung 3-46 mit den gleichen Modellannahmen wie für die Regressionsmodelle Modelle „Bel-Anzahl-2013“ und „Bel-L<sub>ASeq</sub>-2013“.

*Tabelle 3-20: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge der vergangenen Nacht und einer zusätzlichen Differenzierung zwischen alt und neu belasteten Anwohnern (Modell Bel-Anzahl+Belastungsdauer-2013).*

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	-1,764	0,976	-1,445	0,071
Anzahl der Überflüge	0,057	0,011	1,878	< 0,001
Lautstärkeempfinden in der Wohngegend	0,726	0,285	1,075	0,011
Gewöhnung an Fluglärm	-1,032	0,227	-2,121	< 0,001
Belastungsänderung				
alt belastet	0,000	Referenzgruppe		
neu belastet	-1,806	0,774	-1,806	0,020

*Tabelle 3-21: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf den nächtlichen Fluglärm und einer zusätzlichen Differenzierung zwischen alt und neu belasteten Anwohnern (Modell Bel-L<sub>ASeq</sub>+Belastungsänderung-2013).*

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	-2,588	1,018	-1,448	0,011
L <sub>ASeq</sub>	0,082	0,019	1,584	< 0,001
Lautstärkeempfinden in der Wohngegend	0,865	0,284	1,279	0,002
Gewöhnung an Fluglärm	-1,027	0,229	-2,110	< 0,001
Belastungsänderung				
alt belastet	0,000	Referenzgruppe		
neu belastet	-1,736	0,759	-1,736	0,022

### Belästigung am Morgen durch Fluglärm der vergangenen Nacht

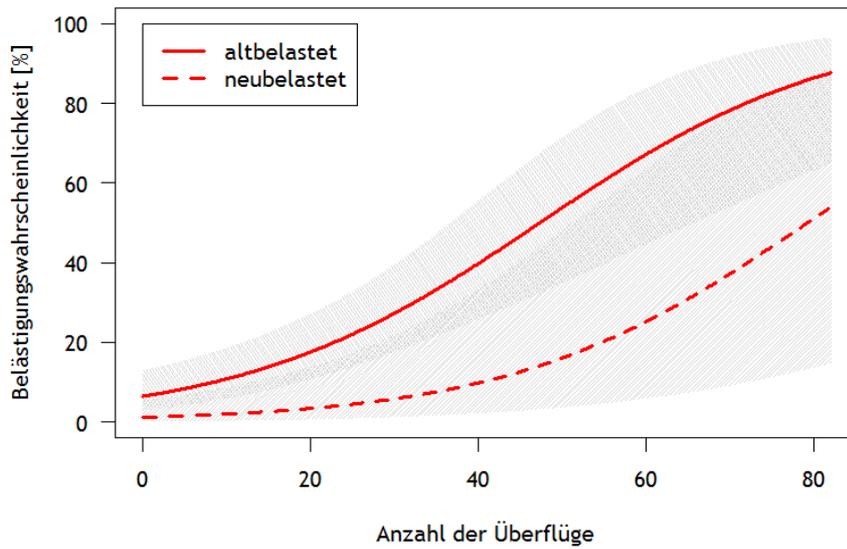


Abbildung 3-45: Durch Regressionsmodell „Bel-Anzahl+Belastungsänderung-2013“ vorhergesagter Anteil durch nächtlichen Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013, differenziert nach alt und neu belasteten Anwohnern. Die schraffierten Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an.

### Belästigung am Morgen durch Fluglärm der vergangenen Nacht

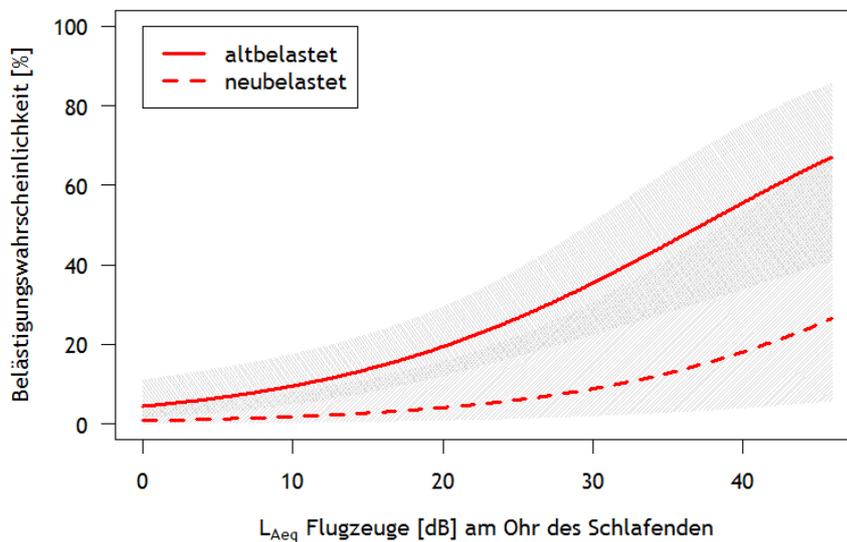


Abbildung 3-46: Durch Regressionsmodell „Bel-L<sub>Aeq</sub>-Belastungsänderung-2013“ vorhergesagter Anteil durch nächtlichen Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013, differenziert nach alt und neu belasteten Anwohnern. Die schraffierten Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an.

### 3.2.5.3 Vergleich der akuten Fluglärmbelästigung aus der NORAH-Schlafstudie 2013 mit der Köln-Bonner-Schlafstudie des DLR

Die akute Belästigung durch nächtlichen Fluglärm während der NORAH-Schlafstudie 2013 wurde verglichen mit der Belästigung, die in ähnlicher Weise in einer Feldstudie des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin zur Wirkung nächtlichen Fluglärms auf Anwohner des Flughafens Köln-Bonn in den Jahren 2001/2002 bei N=64 Probanden erfragt wurde.<sup>13</sup> Dazu wurden die Daten aus der Köln-Bonner-Schlafstudie mit denen aus der NORAH-Schlafstudie 2013 zu einem Datensatz kombiniert. Anhand des kombinierten Datensatzes wurden für beide Datensätze jeweils Expositions-Wirkungskurven (Regressionsmodell in Kapitel 2.8.3 beschrieben).

Tabelle 3-22 und Tabelle 3-23 sind die regressionsbasierten Vergleiche der akuten Belästigung aus der NORAH-Schlafstudie 2013 und der Köln-Bonner-Schlafstudie für die akustischen Parameter „Anzahl der Überflüge“ und „Mittelungspegel  $L_{ASeq}$ “ zu entnehmen. Der Unterschied zwischen den Studien ist für beide akustischen Kenngrößen statistisch signifikant. Dieser Unterschied wird in der Abbildung 3-47 und in der Abbildung 3-48 grafisch unterlegt. Die in den Abbildungen angenommenen Werte der nicht-akustischen Einflussgrößen entsprechen dem Median der untersuchten Stichproben (Alter = 38 Jahre, Vorbelastung durch Fluglärm = 3, Gewöhnung an Fluglärm = 3). Es ist deutlich, dass die Belästigungswahrscheinlichkeit mit der Zunahme des „ $L_{ASeq}$ “ und der Häufigkeit von Schallereignissen ansteigt, wobei die akute Belästigung in der NORAH-Schlafstudie 2013 für beide akustischen Größen über der akuten Belästigung in der Köln-Bonner-Schlafstudie liegt. Dieser Unterschied ist erheblich.

*Tabelle 3-22: Logistisches Regressionsmodell „Bel-Studie 1“ mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht.*

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	-2,911	1,065	-1,106	0,006
Studie				
NORAH - Schlafstudie 2013	0,000		Referenzgruppe	
Köln-Bonner - Schlafstudie 2001/2002	-2,483	0,398	-2,483	< 0,001
Anzahl der Überflüge	0,046	0,006	2,228	< 0,001
Gewöhnung an Fluglärm	-0,751	0,190	-1,538	< 0,001
Vorbelastung	0,030	0,012	0,833	0,013
Alter	0,382	0,147	0,864	0,009

<sup>13</sup> Am Köln-Bonner - Flughafen werden nachts vorwiegend zahlreiche Frachtflüge abgewickelt.

Tabelle 3-23: Logistisches Regressionsmodell „Bel-Studie 2“ mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm.

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	-3,708	1,137	-1,422	0,001
Studie				
NORAH - Schlafstudie 2013	0,000	Referenzgruppe		
Köln-Bonner - Schlafstudie 2001/2002	-1,913	0,377	-1,913	< 0,001
$L_{Aeq}$	0,096	0,015	1,960	< 0,001
Gewöhnung an Fluglärm	-0,789	0,200	-1,615	< 0,001
Vorbelästigung	0,465	0,155	1,051	0,003
Alter	0,021	0,013	0,588	0,095

Belästigung am Morgen durch Fluglärm der vergangenen Nacht

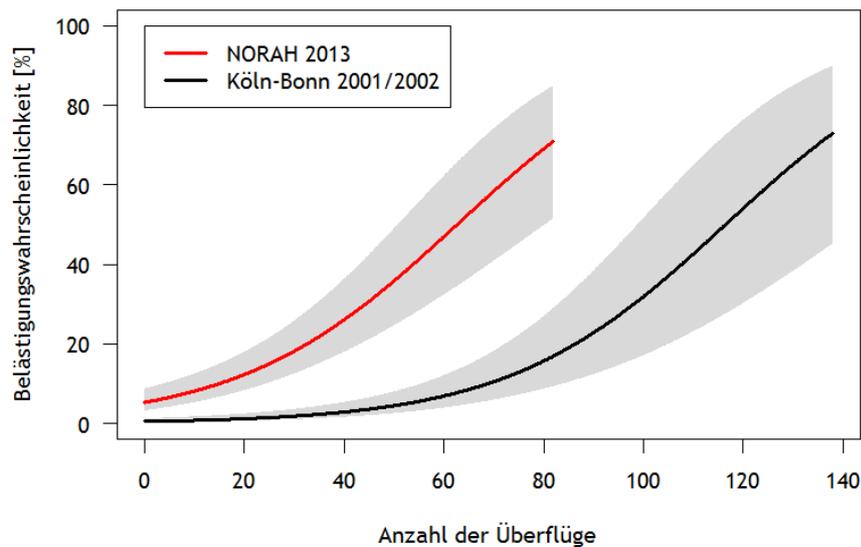


Abbildung 3-47: Durch Regressionsmodell „Bel-Studie 1“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie. Die grauen Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an.

### Belästigung am Morgen durch Fluglärm der vergangenen Nacht

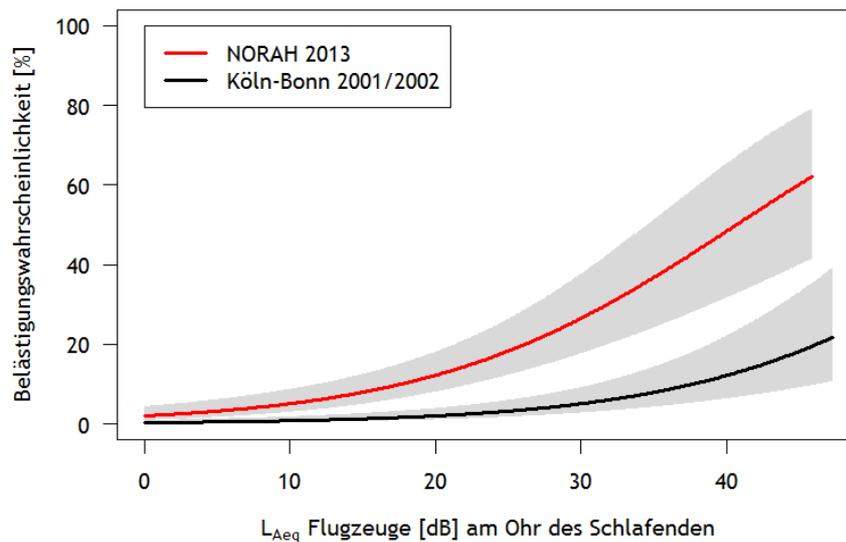


Abbildung 3-48: Durch Regressionsmodell „Bel-Studie 2“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie. Die grauen Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an.

## 3.2.6 Längsschnittanalysen von 2011 bis 2013

### 3.2.6.1 Subjektive Müdigkeit und Schläfrigkeit

Tabelle 3-24 und Tabelle 3-27 sind die regressionsbasierten Vergleiche aus den NORAH-Schlafstudien 2011 bis 2013 im Sinne einer Längsschnittanalyse zu entnehmen. Die Analysen begrenzen sich auf die Variablen Müdigkeit und Schläfrigkeit. Wie in den Auswertungen zuvor wurden getrennte Modelle für den energieäquivalenten Dauerschallpegel und die Anzahl an nächtlichen Fluglärmereignissen berechnet.

Der Unterschied zwischen den Expositions-Wirkungskurven für die Stichproben aus den drei Untersuchungsjahren ist für beide akustischen Parameter statistisch signifikant.

Die Regressionsmodelle „KSS-Längs-Anzahl“ und „KSS-Längs-L<sub>ASeq</sub>“ beinhalten den „Chronotyp“ als Einflussgröße (Tabelle 3-24 und Tabelle 3-25). In den Modellen „FAT-Längs-Anzahl“ und „FAT-Längs-L<sub>ASeq</sub>“ sind die Parameter „Alter“ und „Gewöhnung an Fluglärm“ enthalten (Tabelle 3-26 und Tabelle 3-27). Die beiden akustischen Parameter Anzahl und Dauerschallpegel sind in den Modellen nicht statistisch signifikant, d.h. dass die Müdigkeit und die Schläfrigkeit nicht in direkten Zusammenhang mit der akustischen Belastung gebracht werden können.

Tabelle 3-24: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell KSS-Längs-Anzahl) in den Jahren 2011 bis 2013.

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	3,357	0,336	3,521	< 0,001
Jahr				
2011	0,000	Referenzgruppe		
2012	0,299	0,250	0,299	0,231
2013	0,873	0,247	0,873	0,000
Anzahl der Überflüge	0,006	0,004	0,258	0,137
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	0,339	0,295	0,339	0,250
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	0,967	0,284	0,967	0,001

Tabelle 3-25: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell KSS-Längs- $L_{ASeq}$ ) in den Jahren 2011 bis 2013.

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	3,282	0,362	3,539	< 0,001
Jahr				
2011	0,000	Referenzgruppe		
2012	0,257	0,242	0,257	0,290
2013	0,804	0,232	0,804	0,001
$L_{ASeq}$	0,011	0,008	0,235	0,156
Chronotyp				
definitiver Morgentyp (1)	0,000	Referenzgruppe		
moderater Morgentyp (2)	0,375	0,294	0,375	0,202
Neutraltyp / moderater Abendtyp (3,4)	1,020	0,283	1,020	< 0,001

Tabelle 3-26: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (FAT-Längs-Anzahl) in den Jahren 2011 bis 2013.

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	11,823	0,951	9,264	< 0,001
Jahr				
2011	0,000	Referenzgruppe		
2012	0,009	0,380	0,009	0,980
2013	1,235	0,381	1,235	0,001
Anzahl der Überflüge	0,005	0,006	0,223	0,392
Gewöhnung an Fluglärm	-0,499	0,204	-1,001	0,015
Alter	-0,034	0,014	-1,066	0,015

Tabelle 3-27: GEE-Regressionsmodell zur der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell FAT-Längs- $L_{ASeq}$ ) in den Jahren 2011 bis 2013.

	Schätzer	SF	Standard. Schätzer	p-Wert
Konstante	11,680	0,960	9,269	< 0,001
Jahr				
2011	0,000	Referenzgruppe		
2012	-0,012	0,370	-0,012	0,975
2013	1,256	0,373	1,256	0,001
$L_{ASeq}$	0,021	0,015	0,430	0,156
Gewöhnung an Fluglärm	-0,529	0,208	-1,060	0,011
Alter	-0,037	0,014	-1,146	0,009

Die Ergebnisse zum Längsschnittvergleich der Müdigkeits- und Schläfrigkeitsbewertungen werden in Abbildung 3-49 und in Abbildung 3-50 für die Schläfrigkeit und in Abbildung 3-51 und in Abbildung 3-52 für die Müdigkeit illustriert. Die in den Abbildungen angenommenen Werte der berücksichtigten Einflussgrößen entsprechen dem Median bzw. der häufigsten Antwortkategorie (Chronotyp = Neutraltyp/moderate Abendtyp, Alter = 42 Jahre, Gewöhnung an Fluglärm = 3). Für die subjektive Schläfrigkeit (KSS) zeigt sich eine Zunahme im Verlauf der Studienjahre. In beiden Modellen „KSS-Längs-Anzahl“ und „KSS-Längs- $L_{ASeq}$ “ hat die Schläfrigkeit von 2011 bis 2013 statistisch signifikant zugenommen. Für die eingeschätzte Müdigkeit (FAT) zeigt sich ebenfalls eine Zunahme im dreijährigen Studienzeitraum, allerdings liegen die Expositions-Wirkungskurven für die Jahre 2011 und 2012 übereinander, d.h. dass lediglich im letzten Jahr ein Anstieg der subjektiv empfundenen Müdigkeit im Vergleich zu den ersten zwei Untersuchungsjahren zu verzeichnen ist. Diese Art der Steigerung findet sich in beiden Modellen „FAT-Längs-

Anzahl“ und „FAT-Längs-L<sub>ASeq</sub>“. Bei der Einordnung der Bewertungen ist zu beachten, dass sich die aktuellen Schläfrigkeits- und Müdigkeitswerte auf einem mittleren Niveau bewegen. Dies bedeutet, dass die Probanden morgens im mittleren Grad müde und nicht „sehr wach“ bzw. „wach“ gewesen sind. Die Skalenwerte steigen über die Jahre unabhängig von der Fluglärmbelastung um 5 % bis 11 % an, was gegen einen Überschusseffekt im Schlaferleben spricht. Dieser hätte sich in einer überproportional starken Zu- oder Abnahme der Skalenwerte nach Einführung der Kernruhezeit manifestieren müssen.

Im Hinblick auf die Hypothesen (B) und (C) zeigt der Vergleich der schlafbezogenen Expositions-Wirkungskurven für die Jahre 2011 bis 2013, dass die Veränderung der Flugbetriebs infolge der Einführung der Kernruhezeit keine statistisch signifikante Verbesserung der subjektiven Schlaferlebens im Vergleich zur Basiserhebung im Jahr 2011 bewirkt hat. Die subjektive Müdigkeit und die subjektive Schläfrigkeit am Morgen als Indikatoren für die Güte des nächtlichen Schlafs liegen im Untersuchungsjahr 2013 über den Kurven der beiden vorausgegangenen Jahre. Dieses Ergebnis steht allerdings nicht in direktem Zusammenhang mit der Fluglärmbelastung und muss daher auf unbekannte Faktoren zurückgeführt werden.

Die dargestellten Ergebnisse zum Längsschnittvergleich der Müdigkeits- und Schläfrigkeitsbewertungen der Gesamtstichproben gelten ebenfalls für die Stichprobe der Probanden, die in allen drei Untersuchungsjahren teilgenommen haben (N=39).

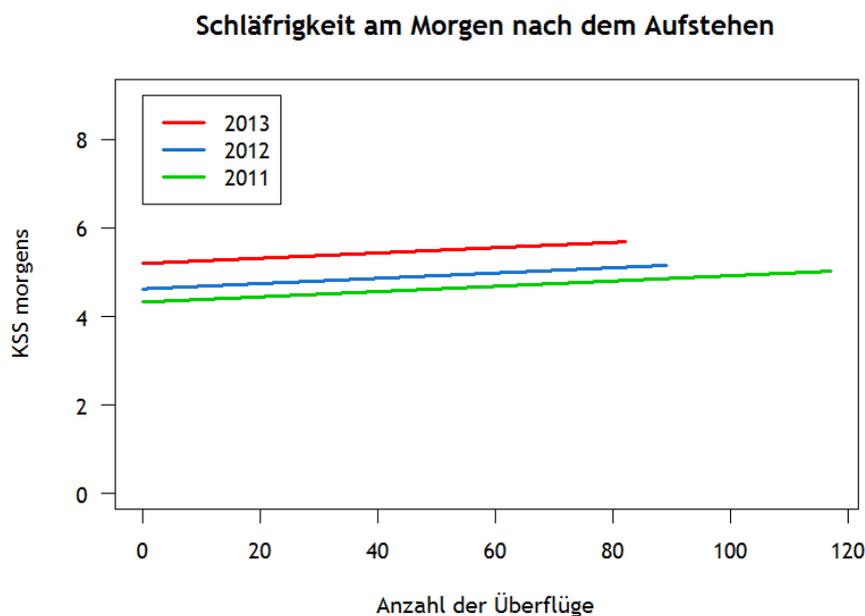


Abbildung 3-49: Durch das Regressionsmodell „KSS-Längs-Anzahl“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet.

### Schläfrigkeit am Morgen nach dem Aufstehen

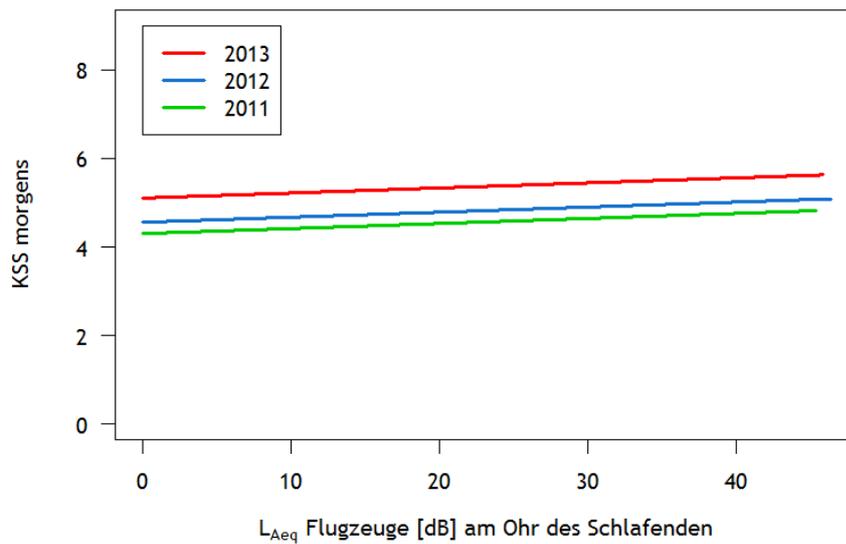


Abbildung 3-50: Durch das Regressionsmodell „KSS-Längs-L<sub>Aseq</sub>“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet.

### Müdigkeit am Morgen nach dem Aufstehen

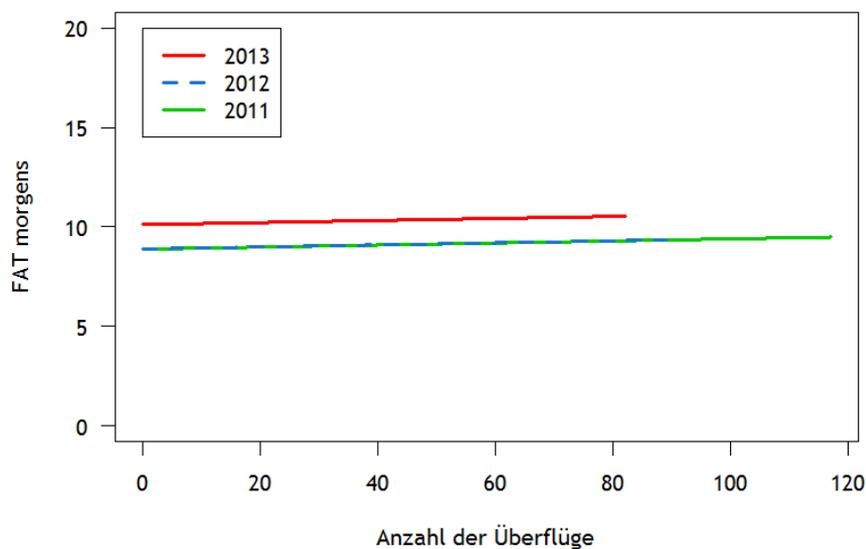


Abbildung 3-51: Durch das Regressionsmodell „FAT-Längs-Anzahl“ vorhergesagte Müdigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Die grüne Kurve aus 2011 und die blaue Kurve aus 2012 liegen übereinander. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet.

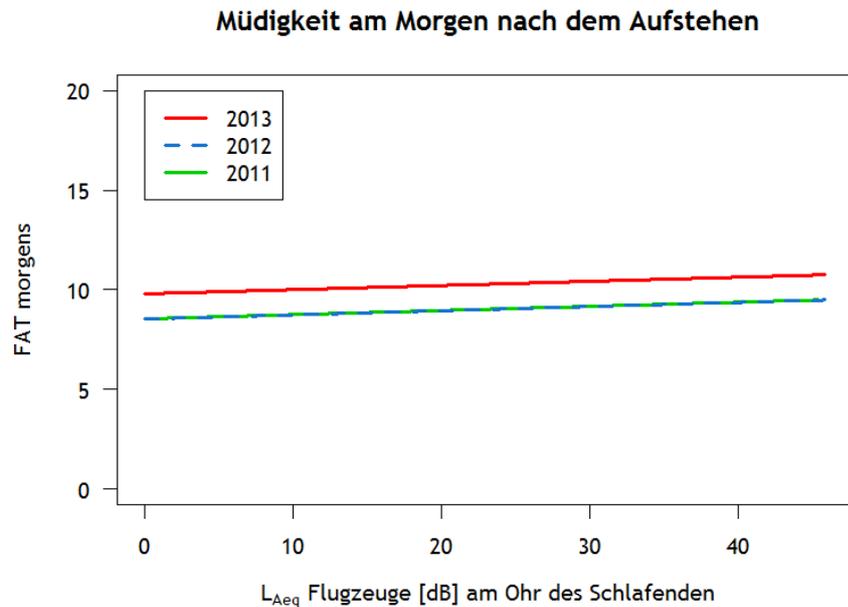


Abbildung 3-52: Durch das Regressionsmodell „FAT-Längs-L<sub>Aseq</sub>“ vorhergesagte Müdigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Die grüne Kurve aus 2011 und die blaue Kurve aus 2012 liegen übereinander. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet.

### 3.2.6.2 Weitere fluglärmspezifische Variablen

Ein zu den Müdigkeits- und Schläfrigkeitsbewertungen analoger Längsschnittvergleich der Expositions-Wirkungskurven ist für die akute Belästigung nicht möglich, da die dafür erforderlichen Daten nicht erhoben wurden (siehe Kapitel 3.2.5.1). Die folgenden deskriptiven Vergleiche beziehen sich ausschließlich auf Beurteilungen, die in den drei Untersuchungsjahren nach den NORAH-Schlafuntersuchungen erhoben wurden. Es werden die Daten (d.h. Mittelwerte und einfache Standardabweichungen) der Gesamtstichproben in den einzelnen Jahren berücksichtigt. Abbildung 3-53 bis Abbildung 3-56 umfassen die Illustration verschiedener fluglärmbezogener Variablen in allen drei Messjahren, die nach Abschluss der Untersuchungen mittels 5-stufiger Skalen erfasst wurden. Es handelt sich hierbei um die Größen „subjektive Einstellung zum Flugverkehr“ (1 = negativ bis 5 = positiv), „Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs“ (1 = nicht bis 5 = sehr zufrieden), bewertete „Schädigung der Gesundheit durch Fluglärm“ (1 = nicht bis 5 = sehr schädigend) sowie die „subjektive Lärmempfindlichkeit“ (1 = nicht bis 5 = sehr empfindlich).<sup>14</sup> Die Bewertungen für die Variablen „subjektive Einstellung zum

<sup>14</sup>Zur Messung der Lärmempfindlichkeit wurde in der NORAH-Schlafstudie neben der 1-Item-Frage der Lärmempfindlichkeitsfragebogen (LEF) von Zimmer und Ellermeier (1998, 1999) nach der Studie verwendet. Da die Analysen zur Lärmempfindlichkeit gezeigt haben, dass die 1-Item-Frage sowie der Summenscore (allgemeine Lärmempfindlichkeit) aus dem LEF sich nicht signifikant voneinander unterscheiden, wurde in den weiteren deskriptiven und regressionsanalytischen Auswertungen die 1-Item-Frage zugrunde gelegt.

Flugverkehr“ und „subjektive Lärmempfindlichkeit“ liegen jeweils im mittleren Bereich, bei der „Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs“ im unteren Segment („nicht“ bis „wenig“ zufrieden), die Bewertung der erwarteten Gesundheitsschädigung durch Fluglärm im mittleren bis oberen Bereich („mittelmäßig“ bis „ziemlich“ schädigend). Es ist ersichtlich, dass die Bewertungen über die drei Jahre hinweg mehr oder weniger konstant geblieben sind, es liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Messzeitpunkten vor. Diese statistisch nicht-signifikanten Ergebnisse für die Gesamtstichproben gelten ebenfalls für Daten der Probanden, die in allen drei Untersuchungsjahren teilgenommen haben (N=39).

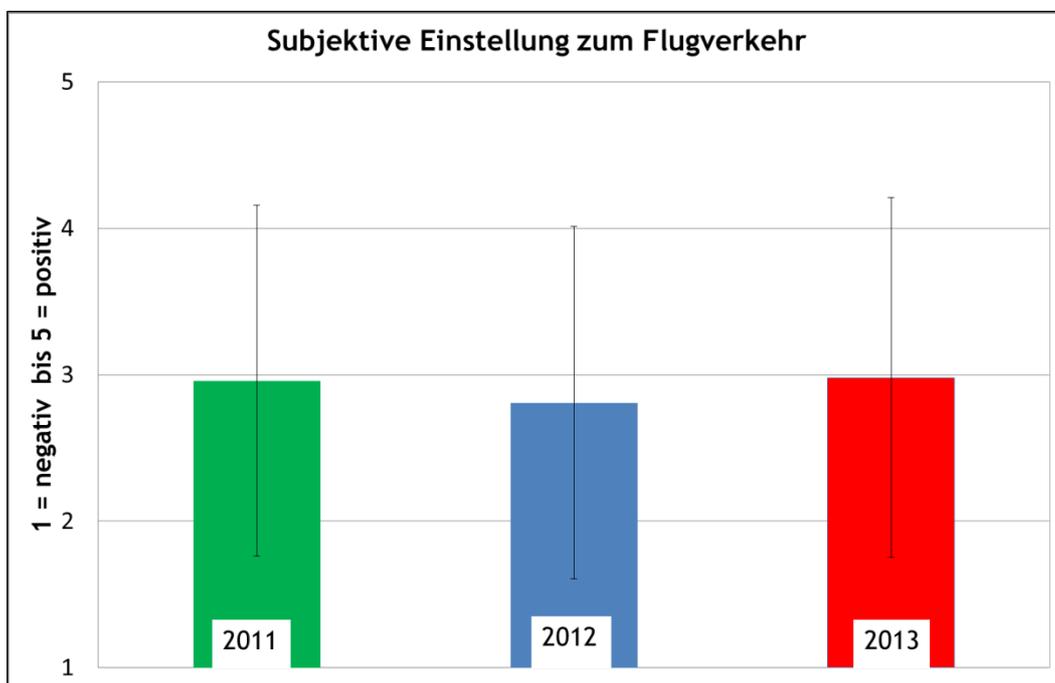


Abbildung 3-53: Subjektive Einstellung zum Flugverkehr in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie stehen Sie dem Flugverkehr insgesamt gegenüber?“).

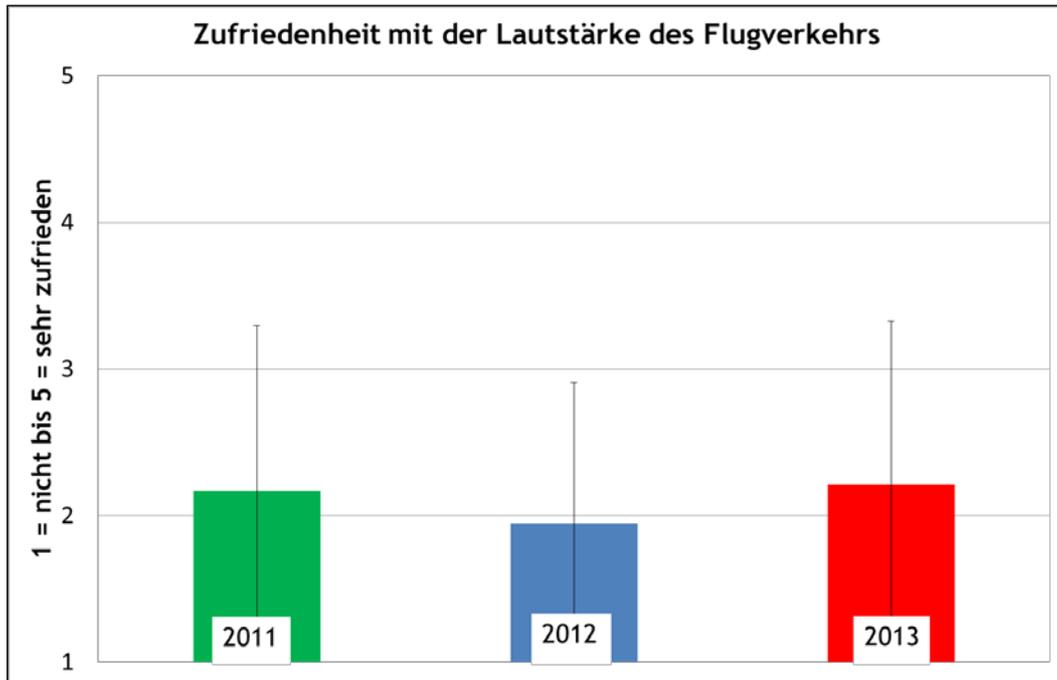


Abbildung 3-54: Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs in der eigenen Wohngegend in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie zufrieden sind Sie in Ihrer Wohngegend mit der Lautstärke des Flugverkehrs?“).

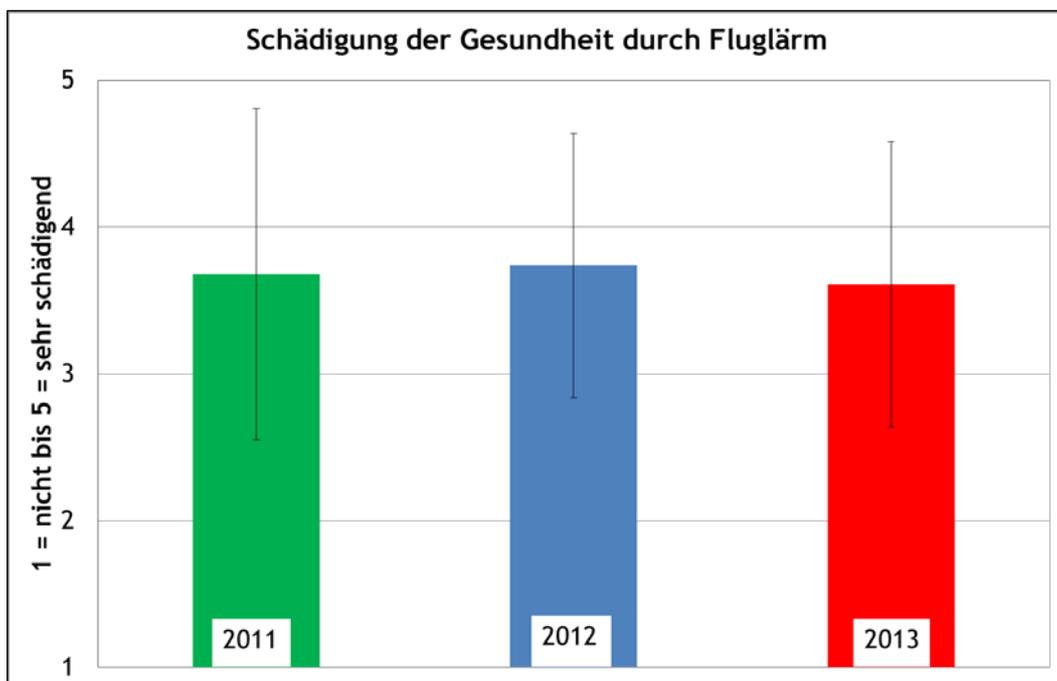


Abbildung 3-55: Bewertung der Gesundheitsschädigung durch Fluglärm in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie stark schädigt Fluglärm im allgemeinen die Gesundheit?“).

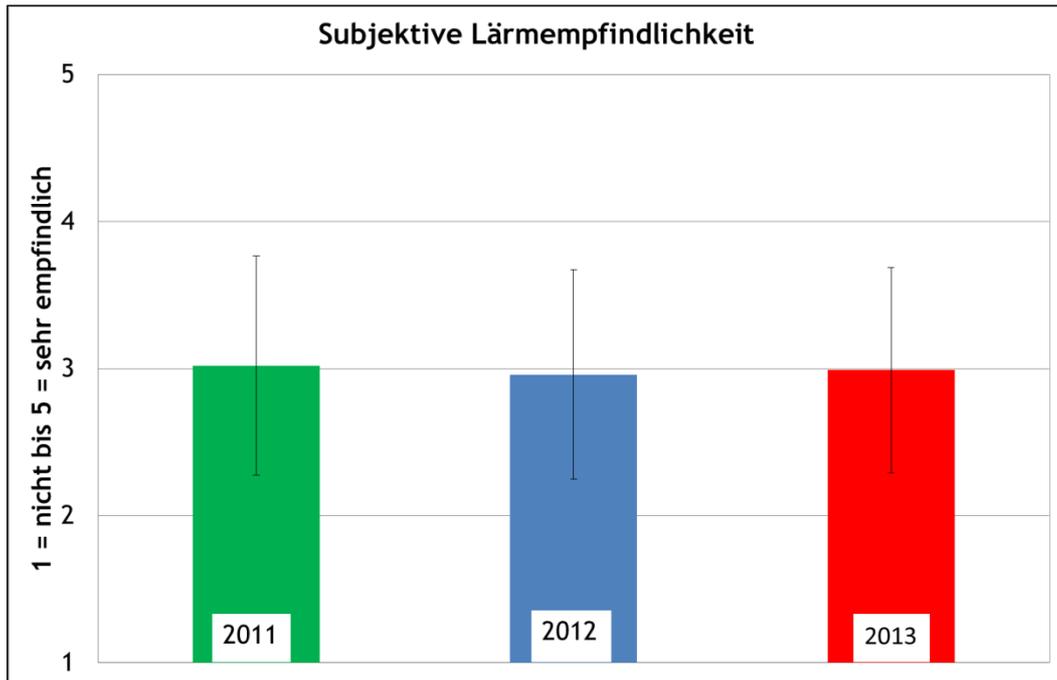


Abbildung 3-56: Einstufung der eigenen Lärmempfindlichkeit in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Für wie empfindlich gegen Lärm jeglicher Art halten Sie sich?“).

## 4 Zusammenfassung und Diskussion

### 4.1 Physiologische Untersuchungen des Schlafs

Im Jahr 2011 wurden 48 Probanden vor Einführung einer Kernruhezeit von 23 Uhr bis 5 Uhr und im Jahr 2012 79 Probanden nach Einführung dieser Kernruhezeit am Frankfurter Flughafen in ihrem häuslichen Umfeld polysomnografisch untersucht. Die erwartete Erhöhung von Flugbewegungen in den Randstunden vor dem Beginn und nach dem Ende der Kernruhezeit trat in vorliegender Stichprobe 2012 im Vergleich zu 2011 lediglich am Morgen ein (siehe Abbildung 2-28 und Tabelle 2-2). Ein Vergleich der erhobenen Schlafdaten aus dem Jahr 2012 mit denen des Jahres 2011 ermöglichte die Untersuchung der Auswirkungen der Kernruhezeit. Zusätzlich fanden die Einschlafphase und das Schlafverhalten in den frühen Morgenstunden besondere Beachtung, was durch die Untersuchung zweier Bettzeitgruppen ermöglicht wurde. Die Probanden der Bettzeitgruppe 1 waren Fluglärm während des Einschlafens und am Morgen ausgesetzt, während die Probanden der Bettzeitgruppe 2 lediglich Fluglärm am Morgen dafür aber über eine längere Zeitspanne erfuhren.

Im Vergleich der erhobenen Daten am Frankfurter Flughafen im Jahr 2012 zu den Ergebnissen einer Studie am Flughafen Köln-Bonn aus den Jahren 2001/2002 (Basner et al. 2006), wurde überprüft, ob die Modelle der Lärmwirkung auf den Schlaf von einem Flughafen auf einen anderen übertragbar sind, selbst wenn jener ein anderes Verkehrsmuster aufweist.

#### 4.1.1 Hypothese 1: Auswirkungen der Kernruhezeit

Die Gesamtschlafdauer, die Einschlaflatenz sowie die Schlafeffizienz unterschieden sich nicht zwischen den Untersuchungsjahren und Bettzeitgruppen. Die Werte lagen in einem normalen Bereich, wie er auch für eine unbelastete Bevölkerung zu erwarten wäre (Åkerstedt et al. 1994; Ohayon et al. 2004). Die akkumulierte Wachdauer in der Zeitspanne vom Einschlafen bis zum Aufstehen unterschied sich ebenfalls nicht zwischen den Jahren 2011 und 2012 sowie den Bettzeitgruppen. Bei der Betrachtung halbstündiger Zeitintervalle im Verlauf der Nacht war jedoch eine signifikant längere Wachdauer im Zeitintervall von 4:30 Uhr bis 5:00 Uhr im Jahr 2011 zu verzeichnen.

Bei Untersuchung der Aufwachhäufigkeiten wurde ersichtlich, dass es durchaus einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der nächtlichen Fluglärmereignisse und der Aufwachhäufigkeit gibt. Im Jahr 2011 waren die Probanden einer signifikant höheren Anzahl von Fluglärmereignissen pro Nacht ausgesetzt, die mit einer signifikant höheren Aufwachhäufigkeit im Vergleich zum Jahr 2012 einherging. Bei gleicher Gesamtschlafdauer lag dementsprechend im Jahr 2011 eine größere Störung der Schlafkontinuität vor. Im Vergleich der Bettzeiten 1 und 2 im Jahr 2012 profitierte die Bettzeitgruppe 1 am meisten

von der Kernruhezeit. Auf sie wirkten signifikant weniger Überflüge pro Nacht ein. Die fluglärmassoziierte Aufwachhäufigkeit war jedoch für die Bettzeitgruppe 2 im Jahr 2012 mit 8,1 % am höchsten und für die Bettzeitgruppe 1 im Jahr 2012 mit 6,1 % am geringsten. Im Jahr 2011 betrug die fluglärmassoziierte Aufwachhäufigkeit 7,3 %. Diese Unterschiede sind plausibel mit der Abnahme des Schlafdrucks zum Ende der Schlafperiode erklärbar, welches ein Erwachen auf äußere Reize erleichtert. Gerade in dieser Schlafphase wirkten die Überflüge auf die Bettzeitgruppe 2 ein. Dies bedeutet, dass sich durch die Einführung der Kernruhezeit im Jahr 2012 sowohl die Fluglärmbelastung reduzierte als auch die Anzahl fluglärmassoziiertes Aufwachreaktionen im Vergleich zum Jahr 2011. Dies gilt auch für die Bettzeitgruppe 2, die trotz einer erhöhten Aufwachhäufigkeit durch die geringere Fluglärmbelastung effektiv weniger Aufwachreaktionen erlebte.

Die geringfügige Erhöhung der Flugbewegungszahlen nach Ende der Kernruhezeit in 2012 im Vergleich zu 2011 führte nicht zu einem verfrühten Erwachen und auch nicht zu längeren Wachphasen am Morgen. Die Abweichung zwischen geplantem und tatsächlichem Schlafende bewegte sich im Bereich von 3 bis 6 min und unterschied sich nicht signifikant im Vergleich der Jahre 2011 und 2012 sowie zwischen den Bettzeitgruppen des Jahres 2012. Die Schlafeffizienz in den Morgenstunden ab 4:30 Uhr blieb hoch im Bereich von 86 % bis 88 % und unterschied sich ebenfalls nicht zwischen den Untersuchungsjahren und Bettzeiten.

Um Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen der Fluglärmbelastung und der Aufwachwahrscheinlichkeit zu berechnen, wurden die Datensätze aus den Untersuchungsjahren 2011 und 2012 vereint und ein multivariablen, logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekt erstellt. Die Aufwachwahrscheinlichkeit unterschied sich bei gleichem  $L_{ASmax}$  nicht im Vergleich der Jahre 2011 und 2012 und auch nicht im Vergleich der Bettzeit 1 und 2 des Jahres 2012.

Es kam mit Einführung der Kernruhezeit nicht zu einem Anstieg akuter Schlafstörungen, insbesondere nicht zu einer Beeinträchtigung des Einschlafprozesses bzw. nicht zu einem häufigen und verfrühten Erwachen. Die Einführung der Kernruhezeit führte hingegen zu einer Reduzierung der Lärmbelastung und damit zu einer Verminderung des lärmassoziierten Erwachens. Die Aufwachwahrscheinlichkeit bei gleichem  $L_{ASmax}$  blieb unbeeinflusst. Somit muss die Nullhypothese beibehalten werden.

#### 4.1.2 Hypothese 2: Übertragbarkeit von Expositions-Wirkungskurven zwischen Flughäfen mit unterschiedlichen Verkehrsmustern

Bei sonst gleicher polysomnografischer und akustischer Methodik hatten die Probanden am Flughafen Frankfurt restriktivere Vorgaben zu ihrer Bettzeit als die Probanden am Flughafen Köln-Bonn. Interessanterweise verbrachten die Stichproben an beiden Flughäfen im Mittel dennoch mit knapp 8 Stunden die gleiche Zeitdauer im Bett. Die Probanden am Flughafen Köln-Bonn schliefen jedoch signifikant weniger in dieser Zeit als die Probanden der Bettzeit 1 und 2 am Flughafen Frankfurt. Dies zeigte sich zudem in der Schlafeffizienz.

Im Vergleich zu den Probanden der Bettzeit 2 am Frankfurter Flughafen war auch die Einschlafzeit signifikant verlängert. Wiederum lagen die Schlafeffizienzen mit 87 % bis 91 % und die Einschlafzeiten mit weniger als 20 min in einem normalen Bereich an beiden Flughäfen. Die kumulierte Wachdauer vom Einschlaf- bis zum Aufstehzeitpunkt erwies sich als nicht unterschiedlich. Ein Unterschied zeigte sich in der Tiefschlafdauer, die für die Erholung während des Schlafens verantwortlich ist. Die Probanden am Flughafen Köln-Bonn hatten signifikant weniger Tiefschlaf als die Probanden am Flughafen Frankfurt, auch wenn die unterschiedliche Gesamtschlafdauer in beiden Stichproben berücksichtigt wurde. Die REM-Schlafdauer zeigte keine signifikanten Unterschiede.

Im Einklang mit diesen Analysen waren die Probanden am Flughafen Köln-Bonn mehr Fluglärmereignissen pro Nacht ausgesetzt als die Probanden der Bettzeit 1 am Flughafen Frankfurt. Sie erwachten auch signifikant häufiger fluglärmassoziiert pro Nacht als die Probanden der Bettzeit 1 und 2 am Flughafen Frankfurt. Die Probanden am Flughafen Köln-Bonn wachten in 9,8 % der Überflüge fluglärmassoziiert auf, während die Probanden der Bettzeit 2 am Flughafen Frankfurt in 8,1 % der Fälle und die Probanden der Bettzeit 1 in 6,9 % der Fälle fluglärmassoziiert erwachten.

Die Daten aus den Studien am Flughafen Köln-Bonn und am Flughafen Frankfurt im Jahr 2012 wurden zusammengeführt, um mit einem multivariablen, logistischen Regressionsmodell mit Zufallseffekt, welches dem Modell entspricht, das in den Frankfurter Nachtindex und den Zürcher Fluglärmindex einging, zu untersuchen, ob sich die modellierte Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen den Flughäfen unterscheidet. Es zeigte sich, dass die modellierte Aufwachwahrscheinlichkeit bei gleichem  $L_{ASmax}$  für die Probanden am Flughafen Köln-Bonn signifikant höher war. Unter der Annahme, dass die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit am Flughafen Frankfurt niedriger liegen könnte als die am Flughafen Köln-Bonn, ist der verbleibende Unterschied für die modellierte lärminduzierte Aufwachwahrscheinlichkeit gering.

Verschiedene Gründe sind zur Erklärung der Unterschiede in der Makrostruktur des Schlaf und der Aufwachwahrscheinlichkeit denkbar:

Das Lärmuster war am Flughafen Köln-Bonn grundsätzlich anders. Die Flugbewegungen fanden im Wesentlichen während zweier Zeiträume in der Nacht statt. Die erhöhte Dichte an Fluglärmereignissen zu Beginn der Nacht könnte durch vermehrte Aufwachreaktionen verhindert haben, dass Probanden in Tiefschlafphasen übergingen, wofür die Ergebnisse zur Makrostruktur des Schlafs sprechen, so dass die Aufwachwahrscheinlichkeit erhöht wurde. Viele Informationen zur akustischen Situation und über den Schlaf wurden in unseren Modellen bereits berücksichtigt. Die Komplexität des Lärmusters jedoch (d.h. die Abfolge bzw. zeitliche Verteilung von Lärmereignissen mit verschiedenen Schalldruckpegeln in ihrer Interaktion mit dem bisherigen Schlafverlauf) sind schwer parametrierbar. Außerdem wurde berichtet, dass die Frequenzzusammensetzung der Lärmereignisse eine Rolle für die Aufwachwahrscheinlichkeit spielen kann (Basner et al., 2011). In den Untersuchungen am Flughafen Köln-Bonn vor 13 Jahren waren hauptsächlich Frachtmaschinen im Einsatz, die meist einer älteren Generation von Flugzeugen mit

ungünstigem Frequenzspektrum angehören, als dies am Flughafen Frankfurt im Untersuchungszeitraum der Fall war.

Zudem können die beobachteten Unterschiede durch abweichende Bewertungen der Stadien Wach und S1 und der Tiefschlafstadien durch unterschiedliche Auswerter bedingt sein. Während die NORAH-Studie durchgehend von nur einem Auswerter bewertet wurde, wurde die Köln-Bonner-Studie von mehreren, anderen Auswertern gescort. Die Auswerter legten jeweils dieselben definierten Kriterien zur Schlafauswertung (Rechtschaffen et al. 1968) zugrunde, waren jedoch aufgrund des dazwischenliegenden Jahrzehnts nicht speziell auf möglichst hohe Übereinstimmung geschult. Während das Stadium Wach die höchste Übereinstimmung zwischen unterschiedlichen Auswertern zeigt (> 80 %), ist bekannt, dass gerade die Bewertung des Stadiums S1 und des Tiefschlafs eine hohe Varianz bei unterschiedlichen Auswertern zeigt (Norman et al. 2000, Whitney et al. 1998). Demzufolge kann es sein, dass die beobachteten Unterschiede in den berichteten Tiefschlafdauern und Aufwachwahrscheinlichkeiten bei Bewertung durch nur einen Auswerter deutlich geringer ausgefallen wären.

Ein Teil der Unterschiede in der Aufwachwahrscheinlichkeit könnte auch durch zufällige Unterschiede in der Auswahl der Stichprobe bedingt sein, die nicht unter den speziellen Anforderungen eines Matching ausgewählt wurden. Da die Stichproben jedoch sowohl von ihrer Alters- als auch von der Geschlechtsstruktur sehr ähnlich waren, spielt dies wahrscheinlich eine eher untergeordnete Rolle.

Hinsichtlich Hypothese 2 folgt, dass die fluglärmassoziierten Aufwachwahrscheinlichkeit aus der Expositions-Wirkungskurve des Flughafens Köln-Bonn auf den Flughafen Frankfurt mit Kernruhezeit nicht übertragbar ist. Sie ist auch nicht sicher auf den Flughafen Frankfurt ohne Kernruhezeit im Jahr 2011 übertragbar, da sich die Expositionswirkungskurven im Jahr 2011 und Jahr 2012 nicht voneinander unterschieden. Unter der Annahme jedoch, dass die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit am Flughafen Frankfurt niedriger lag als die am Flughafen Köln-Bonn ist der Unterschied in der lärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen den Flughäfen gering.

#### **4.1.3 Hypothese 3: Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung des Flugverkehrs und objektiv gemessenen Störungen des Schlafs**

Anhand der Angaben von 78 Probanden am Frankfurter Flughafen aus dem Jahr 2012 zu ihrer subjektiven ‚Einstellung zum Flugverkehr‘ und ihrer Bewertung der ‚Notwendigkeit des Flugverkehrs‘ wurde getestet, ob es einen Zusammenhang zwischen der Lärmwirkung auf den Nachtschlaf und einer negativen bzw. positiven Grundeinstellung der Probanden zum Flugverkehr gibt.

Während sich die Gesamtschlafdauer und die Dauer des REM-Schlafs nicht signifikant unterschieden, war die Einschlaf latenz bei denjenigen Probanden signifikant verlängert, die eine negative Einstellung zum Flugverkehr hatten. Sie verbrachten signifikant mehr Zeit im Stadium Wach in der Zeitspanne vom Einschlafen bis zum Aufstehen und ihre

Schlafeffizienz war signifikant geringer. Interessanterweise verbrachten die Probanden mit einer negativen Einstellung zum Flugverkehr und einer geringen bis mittleren Bewertung der Notwendigkeit des Flugverkehrs signifikant weniger Zeit im Tiefschlaf. Ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen bezogen auf die Aufwachhäufigkeit war nicht feststellbar.

Die Hypothese, dass diejenigen Probanden, die den Flugverkehr eher positiv bewerten, weniger Schlafstörungen zeigen, hat sich mit diesen Ergebnissen bestätigt. Die Richtung des Zusammenhangs, ob also der gestörtere Schlaf eine negative Einstellung nach sich zieht oder die negative Einstellung einen gestörteren Schlaf bedingt, ist unklar.

#### 4.1.4 Hypothese 4: Gewöhnungsprozesse

##### 4.1.4.1 Längsschnittvergleich der Jahre 2011, 2012 und 2013

Der Vergleich der Expositions-Wirkungsbeziehungen der vegetativ-motorischen Reaktionen in den Jahren 2011, 2012 und 2013 zeigte, dass die Wahrscheinlichkeit vegetativ-motorischer Reaktionen im Jahr 2012 signifikant erhöht war im Vergleich zu den Jahren 2011 und 2013.

Dieser Unterschied kann dadurch begründet werden, dass in unserem Datensatz das Lärmuster in den Morgenstunden des Jahres 2013 eher demjenigen im Jahr 2011 ähnelte, während im Jahr 2012 an den Messstellen im Projekt mehr Überflüge aufgezeichnet wurden. Im Jahr 2012 lag auch die fluglärmassoziierte Reaktionshäufigkeit mit 16,2 % höher als im Jahr 2011 mit 10,7 % und im Jahr 2013 mit 13,0 %.

Die beobachtete Erhöhung der Reaktionswahrscheinlichkeit im Jahr 2012 war auf die vegetativ-motorischen Reaktionen beschränkt und zeigte sich nicht in den Aufwachwahrscheinlichkeiten (Kapitel 3.1.2.2) im Sinne einer Verarbeitung der ungewohnten Lärmsituation (insbesondere am Morgen) auf einer niedrigen Stufe der Stimulus-Antwort-Kette. Dies könnte darauf hinweisen, dass es zu einer höheren vegetativ-motorischen Reaktionswahrscheinlichkeit nach Neueinführung der Kernruhezeit in den Randstunden des Jahres 2012 gemäß Hypothese 4 kam (Kapitel 1.6.1). Da unsere Probanden im Jahr 2012 zwischen 7 und 12 Monaten nach der Einführung der Kernruhezeit untersucht wurden, impliziert dies einen sehr langsamen Gewöhnungsprozess, der im Jahr 2013 abgeschlossen war.

##### 4.1.4.2 Vegetativ-motorische Reaktionen versus Polysomnografie

Durch Analyse der vegetativ-motorischen Reaktionen wurde eine personal- und kostengünstige Methode entwickelt, die es ermöglichte, in der Realsituation (Feldversuch) im gleichen Zeitraum eine größere Anzahl an Probanden zu untersuchen, als dies in den vorangegangenen Jahren realisierbar war. Die Methode hat den Vorteil, dass sie auch im Anschluss an die Datenerfassung den Analyseprozess automatisiert und beschleunigt, so

dass die Ergebnisse somit objektiv und unabhängig von Auswertern sind. Die Entwicklung beinhaltete mehrere Validierungsschritte in den Jahren 2011 und 2012, in denen sich die Methode durch das Überschreiten eines Kappa-Wertes von 0,81 im Vergleich zu in der Polysomnografie ermittelten Arousals als valide Methode darstellte (Kapitel 2.6). Das verwendete EKG-Signal ist robust und wenig anfällig für Datenausfall.

Auch die Analyse der vegetativ-motorischen Reaktionen ergab Expositions-Wirkungskurven zwischen dem  $L_{ASmax}$  eines Fluglärmereignisses und der Wahrscheinlichkeit einer Reaktion. Im Vergleich der Modelle beruhend auf Polysomnografie und vegetativ-motorischer Methode zeigt sich der Schätzer des  $L_{ASmax}$  identisch. Allerdings war im Jahr 2012 die Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion höher als in den Jahren 2011 und 2013 und sie war auch höher als die Wahrscheinlichkeit im Jahr 2012, durch Fluglärm zu erwachen (definiert als Wechsel in Wach und S1). Weiterführende Analysen konnten diesen Unterschied durch zwei Aspekte erklären: Zum einen wird durch die Polysomnografie einmalig ein Erwachen detektiert (d.h. im hier angesetzten Zeitfenster von 90 s kann nur einmal erwacht werden, somit auch nur einmal pro Fluglärmereignis), während durch die vegetativ-motorische Methode, gerade wenn sich der Proband bereits in den Stadien Wach oder S1 befindet, weitere Herzfrequenzbeschleunigungen und Bewegungen fluglärmassoziiert ermittelt worden sein können. Diese Aktivierungen können von Bedeutung sein, da sie eventuell den Prozess des Wiedereinschlafens verzögern. Zum anderen zeigte sich die Wahrscheinlichkeit vegetativ-motorischer Reaktionen im REM-Schlaf im Vergleich zur Polysomnografie erhöht. Die unterschiedlichen Bettzeiten wirkten sich nicht zusätzlich auf diese Diskrepanzen aus, da sich die Reaktionswahrscheinlichkeit lärmassoziiert innerhalb eines Untersuchungsjahrs nicht signifikant unterschied.

Unterschiede in der Habituation kortikaler und kardialer Arousal können zusätzlich zu den beobachteten Differenzen in den Reaktionswahrscheinlichkeiten beitragen. In Laborstudien (Basner et al. 2011) zeigten wir, dass kortikale Arousal Anpassungsprozessen an Lärm sowohl innerhalb einer Nacht als auch im Verlauf mehrerer Nächte unterliegen, während dies bei kardialen Arousals lediglich innerhalb derselben Nacht zu beobachten war. Die Unterschiede könnten zudem die hierarchische Natur der Antwortkette auf einen Stimulus abbilden (Sforza et al. 1999), bei der eine vegetative Reaktion stattfand, aber die Weiterleitung an den Kortex nicht stattfindet (Cote et al. 2000; Dang-Vu et al. 2010). Ein Vorteil der vegetativ-motorischen Methode ist, dass sie nicht an Schlafepochengrenzen gebunden ist. Arousal können somit detektiert werden, die sich über Epochengrenzen bewegen und bei der Polysomnografie, auch wenn sie länger sind, nicht als Stadium Wach gewertet werden können.

Obwohl die vegetativ-motorischen Reaktionen den Aufwachreaktionen nicht entsprechen, halten wir sie für in besonderem Maße relevant. Durch die geringere Habituation kardialer Arousal könnten die vegetativ-motorischen Reaktionen ein mögliches, direktes Bindeglied zu den im Zusammenhang mit Fluglärm beobachteten langfristigen negativen Folgen für das kardiovaskuläre System darstellen (Babisch 2006; Muzet 2007; Rosenlund et al. 2001). In jüngerer Zeit mehren sich zudem Hinweise, die einen direkten Zusammenhang

naheliegen (Basner et al. 2010; Griefahn et al. 2008b; Schmidt et al. 2013; Schmidt et al. 2015).

## 4.2 Subjektive Reaktionen

Folgende Hypothesen zu den subjektiven Reaktionen der Anwohner auf den Fluglärm und seine veränderte zeitliche Verteilung infolge der Einführung einer Kernruhezeit wurden in der NORAH-Schlafstudie überprüft:

- (A) Mit wachsender nächtlicher Fluglärmexposition nehmen subjektive Schlafstörungen (z.B. Abnahme der Schlaferholung, zunehmende subjektive Aufwachhäufigkeit nachts sowie eine erhöhte Müdigkeit und Schläfrigkeit am Morgen) und die damit verbundene Belästigung durch Fluglärm statistisch signifikant zu.
- (B) Die Veränderung des Flugbetriebs infolge der Einführung der Kernruhezeit (23:00-5:00 Uhr) bewirkt über die gesamte Schlafdauer gesehen eine Verbesserung des Schlaferlebens im Vergleich zur Basiserhebung im Jahr 2011.
- (C) Die Einführung der Kernruhezeit mit verändertem Flugbetrieb in den Randstunden führt zu einer Überschussreaktion im Hinblick auf die genannten subjektiven Sekundärreaktionen.

Im Folgenden werden ausschließlich die signifikanten Veränderungen zusammengefasst.

**Ergebnisse zum Schlaferleben 2011.** Im ersten Untersuchungsjahr mit N=49 Probanden belegen die Regressionsmodelle für die eingeschätzte Schläfrigkeit einen statistisch signifikanten Einfluss der Anzahl an nächtlichen Flugbewegungen, d.h. dass die Schläfrigkeit mit der Häufigkeit von nächtlichen Schallereignissen deutlich ansteigt. Das subjektive Lautstärkeempfinden in der Wohngegend sowie der Chronotyp als nicht-akustische individuelle Variablen haben einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Schläfrigkeitsbewertungen. Das subjektive Schlaferleben hat sich demnach gemäß Hypothese (A) in Abhängigkeit vom Ausmaß der nächtlichen Fluglärmbelastung (operationalisiert anhand der Anzahl der Flüge in der Nacht bei durchgängigem Flugbetrieb) statistisch signifikant verschlechtert.

**Ergebnisse zum Schlaferleben 2012.** Im zweiten Untersuchungsjahr mit N=78 Teilnehmern liegt ein statistisch signifikanter Effekt der Häufigkeit an nächtlichen Fluglärmereignissen auf die Schlaferholung vor, d.h. dass die nächtliche Erholung mit der Anzahl der Flüge statistisch signifikant abnimmt. Der Chronotyp ist hier eine statistisch signifikante Einflussgröße. Auch mit Einführung der Kernruhezeit werden der Erholungswert des nächtlichen Schlafs und damit das individuelle Schlaferleben entsprechend Hypothese (A) in Abhängigkeit vom Grad der nächtlichen Fluglärmexposition (gemessen anhand der Anzahl der Flugbewegungen in der Nacht) statistisch signifikant beeinträchtigt.

**Ergebnisse zum Schlaferleben und Fluglärmbelastung 2013.** Im dritten Untersuchungsjahr mit N=156 bzw. 157 Probanden besteht ein statistisch signifikanter Einfluss der nächtlichen Fluglärmbelastung (Mittelungspegel  $L_{ASeq}$  und Anzahl der Überflüge) auf die subjektive Müdigkeit und Schläfrigkeit. Die subjektive Gewöhnung an Fluglärm, das Alter und der Chronotyp sind statistisch signifikante Einflussfaktoren der Bewertungen. Des Weiteren besteht eine statistisch signifikante durch den Fluglärm in der vorausgegangenen Nacht bedingte akute Belastungsreaktion. Diese Reaktion ist erheblich. Die psychologischen Größen „Lautstärkeempfinden in der Wohngegend“ und „Gewöhnung an Fluglärm“ haben einen statistisch signifikanten Einfluss auf die akute Belastung. Entsprechend Hypothese (A) findet sich auch 2013 eine signifikante Beeinträchtigung des Schlafs (d.h. erhöhte Müdigkeit und Schläfrigkeit) sowie ein signifikanter Anstieg der akuten Belastung mit wachsender nächtlicher Fluglärmbelastung (indiziert durch den energieäquivalenten Dauerschallpegels und die Anzahl an Flugbewegungen in der Nacht).

**Vergleich der Fluglärmbelastung aus der NORAH-Schlafstudie 2013 mit der Köln-Bonner-Schlafstudie des DLR 2001/2002.** Der auf einem kombinierten Datensatz basierende Vergleich der Fluglärmbelastung aus der NORAH-Schlafstudie 2013 mit der Köln-Bonner-Schlafstudie (Quehl & Basner 2006) zeigt einen statistisch signifikanten Einfluss des Fluglärms auf die akute Belastung: der Anteil an Belästigten steigt mit der Zunahme des energieäquivalenten Dauerschallpegels und der Häufigkeit von Überflügen, wobei die Belastungsreaktion in der NORAH-Schlafstudie 2013 für beide akustischen Größen signifikant größer als in der Köln-Bonner-Studie ist. Dieser Unterschied ist erheblich. Anhand des Vergleichs der beiden Studien zur akuten Belastung durch nächtlichen Fluglärm liegt auf den ersten Blick die Vermutung nahe, dass gemäß Hypothese (C) eine Überschussreaktion bei den Betroffenen im Sinne einer überproportionalen Reaktionszunahme vorliegt. Dies bedeutet, dass die Anwohner stärker reagieren, als durch die zum Zeitpunkt der NORAH-Schlafstudie 2013 herrschende „statische“ Lärmbelastung zu erwarten gewesen wäre. Die Einführung der Kernruhezeit mit einem veränderten Flugbetrieb in den Randstunden hat möglicherweise zu einer „Überreaktion“ geführt, d.h. dass die Anwohner stärker belästigt reagieren als unter statischen Lärmbedingungen zu erwarten gewesen wäre (Brink et al. 2008; Fields et al. 2000; Job & Hatfield 2003; Schuemer & Schreckenber 2000; Van Kamp & Brown 2003). Die Annahme eines Überschusseffekts ist jedoch aus folgenden Gründen zu relativieren:

- Die Probanden in der Köln-Bonner-Schlafstudie waren einem anderen Geräuschenario ausgesetzt als die Probanden in der NORAH-Schlafstudie. Dies betrifft sowohl die zeitliche Verteilung der Überflugeräusche (in NORAH 2013 nur in den Randstunden, in der Köln-Bonner-Studie durchgängiger Nachtflugbetrieb) als auch die Verteilung der Maximalpegel in der Nacht.
- Die Köln-Bonner-Schlafstudie wurde im Zeitraum von 2001 bis 2002 durchgeführt. Es ist nicht auszuschließen, dass die in der Literatur für den Tag beschriebene allmähliche Zunahme der Belastung auch für die in der NORAH-Schlafstudie

erfasste Belästigung bezogen auf die Nacht zutrifft (Guski 2004; Janssen et al. 2011, van Kempen & van Kamp 2005).

- Ein Überschusseffekt kann nur aus einem Verlauf abgeleitet werden. Dies hätte der Erfassung der auf die Nacht bezogenen akuten Belästigung vor Beginn als auch während der NORAH-Schlafstudie bedurft. Diese Daten liegen nicht vor.
- In welchem Ausmaß der gezeigte Überschusseffekt 2012 bereits vorgelegen hat oder ob es sich 2013 bereits um das Nachlassen einer Überschussreaktion handelt, lässt sich nicht abschätzen, da zu diesem Zweck ein Vergleich mit einem gar nicht geänderten Flugbetrieb sowie ein Vergleich der Belästigung zwischen verschiedenen Zeitpunkten und Flughäfen erforderlich gewesen wäre (Guski & Schönpflug 2004).

Anhand der vorliegenden Daten ist es also schlussendlich nicht möglich darüber zu befinden, ob ein Überschusseffekt im Hinblick auf die akute Belästigung durch Fluglärm vorliegt.

**Längsschnittanalysen 2011 bis 2013.** Für die subjektive Müdigkeit und subjektive Schläfrigkeit zeigt sich eine statistisch signifikante Zunahme im dreijährigen Studienverlauf. Dieser Effekt ist unabhängig von der Fluglärmbelastung, d.h. die eingestufte Müdigkeit und Schläfrigkeit kann nicht in direkten Zusammenhang mit dem Mittelungspegel und der Anzahl an Überflügen gebracht werden, sondern ist auf den Einfluss nicht erhobener Faktoren zurückzuführen. Dies bedeutet im Hinblick auf die Hypothesen (B) und (C), dass die Veränderung des Flugbetriebs infolge der Einführung der Kernruhezeit keine statistisch signifikante Verbesserung des subjektiven Schlaferlebens im Vergleich zur Basiserhebung im Jahr 2011 bewirkt hat. Sowohl die subjektive Müdigkeit als auch die subjektive Schläfrigkeit als Parameter für die Güte des Nachtschlafs sind im Untersuchungsjahr 2013 höher als in beiden vorausgegangenen Studienjahren. Die Schläfrigkeits- und Müdigkeitsbewertungen bewegen sich in allen drei Studienjahren auf einem mittleren Niveau, d.h., dass die Probanden morgens mittelmäßig müde und nicht besonders ausgeschlafen oder ausgeruht sind. Der veränderte Flugbetrieb in den Randstunden hat zu keiner Überschussreaktion bei den Müdigkeits- und Schläfrigkeitsbewertungen geführt, da keine überproportionale Zu- oder Abnahme nach Einführung der Kernruhezeit vorliegt. Dies ist daran ersichtlich, dass die Skalenwerte nur um 5 % bis 11 % über die Jahre im Sinne einer Verschlechterung des Schlaferlebens ansteigen. Dieser Effekt gilt auch für die Probanden, die in allen drei Jahren untersucht wurden.

### 4.3 Einschränkungen

Folgende Einschränkungen dieser Schlafstudie müssen genannt werden. Die Polysomnografie ist eine in der Durchführung und Auswertung sehr personal- und kostenintensive Untersuchungsmethode, was geringe untersuchte Fallzahlen bedingt. Im internationalen Vergleich polysomnografischer Studien hatte die NORAH-Studie jedoch eine eher hohe Fallzahl.

Die Polysomnografie wird von geschulten Auswertern bewertet, was trotz definierter Kriterien zu Abweichungen des Scorings führen kann. Diese Abweichungen sind insbesondere bei der Bewertung des Tiefschlafs häufig.

Die NORAH-Schlafstudie war nicht primär darauf ausgelegt, Vergleiche mit der Köln/Bonner-Studie vorzunehmen (so waren z.B. die Zubettgeh- und Aufstehzeiten in beiden Studien unterschiedlich; die Stichproben waren naturgemäß unterschiedlich trotz gleicher Kriterien bei der Probandenauswahl; Frachtflieger aus dem Jahr 2001/2002 unterscheiden sich unabhängig vom Maximalpegel auch im Frequenzspektrum deutlich von heutigen Passagiermaschinen; die polysomnografischen Aufzeichnungen wurden von unterschiedlichen Auswertern analysiert). Daher müssen die Vergleiche der NORAH-Studie mit der Köln/Bonner-Studie aus den Jahren 2001/2002 vorsichtig bewertet werden.

Es wurden aus methodischen Gründen nur schlafgesunde Probanden untersucht, um die ermittelten Aufwachwahrscheinlichkeiten dem Fluglärm ursächlich zuordnen zu können. Das bedingt, dass die Übertragbarkeit auf vulnerable Gruppen nur eingeschränkt möglich ist.

Die sozio-demografischen Merkmale zeigen keine extreme Verzerrung auf in der Verteilung, d.h. alle Kategorien sind vertreten. Es ist daher davon auszugehen, dass die Verteilung der sozio-demografischen Merkmale keine Beeinflussung der Ergebnisse in die eine oder andere Richtung bewirkte.

## 5 Danksagung

Wir danken ganz herzlich den Mitarbeiterinnen/Mitarbeitern und Studentinnen/Studenten des Instituts für Hygiene und Umweltmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen für ihren hervorragenden Einsatz und ihre enorme Unterstützung in den Jahren 2011-2013 bei der Durchführung dieser herausfordernden Studie vor Ort bei den Versuchspersonen.

Allen Versuchspersonen gebührt ganz besonderer Dank für ihr Interesse, Geduld und die Ausdauer, die Studie erfolgreich abzuschließen.

Ein ganz herzlicher Dank geht an Hrn. Prof. Dr. med. Mathias Basner und Fr. Dr. Sarah McGuire von unserem Kooperationspartner University of Pennsylvania für die intensive und vertrauensvolle Zusammenarbeit im Projekt.

Dem Wissenschaftlichen Beirat der NORAH-Studie, insbesondere Fr. Prof. Barbara Griefahn und Dr. Mark Brink, sei für das im Verlauf der gesamten Studie stets kritisch-konstruktive wissenschaftliche Hinterfragen und für wertvolle Anregungen gedankt.

Den Leitern der NORAH-Studie, Prof. Rainer Guski und Dipl.-Psych. Dirk Schreckenberger, gebührt ganz besondere Anerkennung und Dank für die souveräne, kompetente und stets angenehme Leitung dieser großen Studie.

Den übrigen NORAH-Partnern sei ganz herzlich für die allzeit kollegiale und geschätzte Zusammenarbeit gedankt.

Dem Ökoinstitut Darmstadt oblag die organisatorisch-wissenschaftliche Begleitung der NORAH-Studie. Ein außerordentlicher Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Ökoinstituts für die immer freundliche, beharrliche und äußerst fachkundige Begleitung der Studie.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Umwelthaus GmbH in Kelsterbach ein herzliches Dankeschön für die allzeit nette Aufnahme und die Bereitstellung von Untersuchungsräumen in den Jahren 2011 und 2012.

Last, but not least, einen ganz besonderen Dank auch an die Kolleginnen und Kollegen, Studentinnen und Studenten der Abteilung Flugphysiologie für die stets hilfsbereite und unermüdliche Unterstützung während des gesamten Projektzeitraums.

## Literatur

- 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. Journal*, 47, 158-161.
- Aeschbach, D., Cutler, A. J. & Ronda, J. M. (2008). A role for non-rapid-eye-movement sleep homeostasis in perceptual learning. *J Neurosci.*, 28, 2766-2772.
- Agnew, H. W., Jr., Webb, W. B. & Williams, R. L. (1966). The first night effect: an EEG study of sleep. *Psychophysiology*, 2, 263-266.
- Åkerstedt, T., Gillberg, M. (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Intern. J. Neuroscience*, 52, 29-37.
- Åkerstedt, T., Hume, K., Minors, D. & Waterhouse, J. (1994). The meaning of good sleep: a longitudinal study of polysomnography and subjective sleep quality. *J.Sleep Res.*, 3, 152-158.
- Åkerstedt, T., Connor, J., Gray, A. & Kecklund, G. (2008). Predicting road crashes from a mathematical model of alertness regulation— The Sleep/Wake Predictor. *Accident Analysis & Prevention*, 40, 1480-1485.
- Babisch, W. (2006). Transportation noise and cardiovascular risk. Review and synthesis of epidemiological studies. Dose-effect curve and risk estimation. (Rep. No. WaBoLu-Heft 01/06, ISSN 0175-4211). Berlin, Germany: Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt).
- Babisch, W. (2009). Traffic noise and cardiovascular disease: epidemiological review and synthesis. *Noise & Health*, 9-32.
- Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Cadum, E., Katsouyanni, K., Velonakis, M., Dudley, M.L., Marohn, H.D., Swart, W., Breugelmans, O., Bluhm, G., Selander, J., Vigna-Taglianti, F., Pisani, S., Haralabidis, A., Dimakopoulou, K., Zachos, I. & Järup, L., HYENA Consortium (2009). Annoyance due to aircraft noise has increased over the years--results of the HYENA study. *Environ Int.*, 35, 1169-1176.
- Barger, L. K., Cade, B. E., Ayas, N.T., Cronin, J. W., Rosner, B. & Speizer, F. E. (2005). Extended work shifts and the risk of motor vehicle crashes among interns. *N.Engl.J Med.*, 352, 125-134.
- Barwick, F., Arnett, P. & Slobounov, S. (2011). EEG correlates of fatigue during administration of a neuropsychological test battery. *Clinical Neurophysiology*, 123, 278-284.
- Bartels, S. (2014). Aircraft noise-induced annoyance in the vicinity of Cologne/Bonn airport. Dissertation an der TU Darmstadt.
- Basner, M., Müller, U., Plath, G., Wenzel, J. & Samel, A. (2000). Neues zum First Night Effect. *Somnologie* 4 (Suppl.1): 25.
- Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gerlich, A., Luks, N. & Maaß, H. (2004a). Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung (Rep. No. FB2004-07/D, ISSN 1434-8454). Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

- Basner, M., Müller, U. & Samel, A. (2004b). Nachtfluglärmwirkungen - Band 2 - Methodik, Akustik, Forschungsbericht DLR FB 2004-08/D, ISSN 1434-8454.
- Basner, M., Samel, A. (2005). Effects of nocturnal aircraft noise on sleep structure. *Somnologie*, 9, 84-95.
- Basner, M., Isermann, U. & Samel, A. (2006). Aircraft noise effects on sleep: Application of the results of a large polysomnographic field study. *J.Acoust.Soc.Am.*, 119, 2772-2784.
- Basner, M., Griefahn, B., Müller, U., Plath, G. & Samel, A. (2007). An ECG-based algorithm for the automatic identification of autonomic activations associated with cortical arousals. *Sleep*, 30, 1349-1361.
- Basner M., Müller U., Elmenhorst E.M., Kluge G. & Griefahn B. (2008a). Aircraft noise effects on sleep: a systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations. *Physiol.Meas.*, 29:1089,103.
- Basner, M., Griefahn, B. & Penzel, T. (2008b). Inter-rater Agreement in Sleep Stage Classification between Centers with Different Backgrounds, *Somnologie*, 12, 75-84.
- Basner, M., Van den Berg, M. & Griefahn, B. (2010). Aircraft noise effects on sleep: Mechanisms, mitigation and research needs. *Noise Health*, 12,95-109.
- Basner, M., Mueller, U. & Elmenhorst, E.M. (2011). Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep*, 34, 11-23.
- Basner, M., McGuire, S., Müller, U. & Elmenhorst, E.M. (2014). Inter-individual differences in the effects of aircraft noise on sleep fragmentation. Proceedings from 11<sup>th</sup> International Congress on Noise as a Public Health Problem, ICBEN 2014. 1-5 June 2014, Nara, Japan.
- Becker-Carus, C. (2004). Subjektive versus objektive Einschätzung der Schlafqualität. In H. Schulz (Hrsg.), Deutsche Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin - Kompendium für Schlafmedizin. II-1.1, 1-3.
- Björkman, M., Ahrlin, U. & Rylander, R. (1992). Aircraft noise annoyance: an average versus maximum noise levels. *Archives of Environmental Health*, 47, 326-329.
- Bonnet, M. H. (1985). Effect of sleep disruption on sleep, performance, and mood. *Sleep*, 8, 11-19.
- Bonnet, M. H. (1986). Performance and sleepiness as a function of frequency and placement of sleep disruption. *Psychophysiology*, 23, 263-271.
- Bonnet, M. H. (1987). Sleep restoration as a function of periodic awakening, movement, or electroencephalographic change. *Sleep*, 10, 364-373.
- Bonnet, M., Carley, D. W., Carskadon, M. A., Easton, P., Guilleminault, C. & Harper, R. (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, 173-184.
- Bonnet, M. & Arand, D. L. (2007). EEG arousal norms by age. *J.Clin.Sleep Med.*, 3, 271-274.
- Borbely, A. A. (1982). A two process model of sleep regulation. *Hum.Neurobiol.*, 1, 195-204.
- Breugelmans, O.R.P., Wiechen, C.M.A.G van, Kamp, I. van, Heisterkamp, S.H. & Houthuijs, D.J.M. (2005). Tussenrapportage Monitoring Gezondheidskundige Evaluatie Schiphol: Gezondheid en beleving van de omgevingskwaliteit in de regio Schiphol (2002).

- Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM report 630100 001. [GES-2].*
- Brink, M., Schierz, C., Basner, M., Samel, A., Spreng, M., Scheuch, K., Stahl, W.A., Bögli, H. (2006). Bestimmung lärminduzierter Aufwachwahrscheinlichkeiten in der Nachtlärmwirkungsforschung und Anwendung entsprechender Wirkungsmodelle für Prognosezwecke. Bericht zum Workshop „Aufwachwahrscheinlichkeit“ (2006). <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:28983>.
- Brink, M., Wirth, K.E. & Schierz, C. (2008). Annoyance responses to stable and changing aircraft noise exposure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124, 2930-2941.
- Brink, M., Schreckenber, D., Thomann, G. & Basner, M. (2010). Aircraft noise indexes for effect oriented noise assessment. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 1012-1025.
- Brink, M. (2014). A review of explained variance in exposure-annoyance relationships in noise annoyance surveys. Proceedings from 11<sup>th</sup> International Congress on Noise as a Public Health Problem, IC BEN 2014. 1-5 June 2014, Nara, Japan.
- Bryant, P.A., Trinder J., Curtis, N. (2004) Sick and tired: Does sleep have a vital role in the immune system? *Nat Rev Immunol* 4:457-67.
- Buxton, O. M. & Marcelli, E. (2010). Short and long sleep are positively associated with obesity, diabetes, hypertension, and cardiovascular disease among adults in the United States. *Soc.Sci Med*, 71, 1027-1036.
- Cappuccio, F. P., D'Elia, L., Strazzullo, P. & Miller, M. A. (2010). Sleep duration and all-cause mortality: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Sleep*, 33, 585-592.
- Cappuccio, F. P., Cooper, D., D'Elia, L., Strazzullo, P. & Miller, M. A. (2011). Sleep duration predicts cardiovascular outcomes: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Eur.Heart J*, 32, 1484-1492.
- Chipman, M. & Jin, Y. L. (2009). Drowsy drivers: The effect of light and circadian rhythm on crash occurrence. *Safety Science*, 47, 1364-1370.
- Consensus Conference Panel, Watson, N.F., Badr, M.S., Belenky, G., Bliwise, D.L., Buxton, O.M., Buysse, D., Dinges, D.F., Gangwisch, J., Grandner, M.A., Kushida, C., Malhotra, R.K., Martin, J.L., Patel, S.R., Quan, S.F., Tasali, E. (2015). Joint Consensus Statement of the American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society on the Recommended Amount of Sleep for a Healthy Adult: Methodology and Discussion. *Sleep*, 38, 843-844.
- Cote, K.A., Epps T.M. & Campbell, K.B. (2000). The role of the spindle in human information processing of high-intensity stimuli during sleep. *J Sleep Res*;9:19-26.
- Dang-Vu, T. T., McKinney, S. M., Buxton, O. M., Solet, J. M. & Ellenbogen, J. M. (2010). Spontaneous brain rhythms predict sleep stability in the face of noise. *Curr.Biol*, 20, R626-R627.
- Desmond, P. A. & Matthews, G. (2009). Individual differences in stress and fatigue in two field studies of driving. Transportation Research Part F, *Traffic Psychology and Behaviour*, 12, 265-276.
- Diggle, P. J., Heagerty, P., Liang, K. Y. & Zeger, S. L. (2002). Analysis of Longitudinal Data. Oxford: Oxford University Press.

- Dijk, D. J., Hayes, B. & Czeisler, C. A. (1993). Dynamics of electroencephalographic sleep spindles and slow wave activity in men: effect of sleep deprivation. *Brain Research*, 626, 190-199.
- DIN EN 61672, Teil 1-3, (2003). Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen, Teil 2: Baumusterprüfung, Teil 3: Periodische Einzelprüfung. Berlin: Beuth.
- Dobzhansky, T. (2015). Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution. *American Biology Teacher*, 35, 125-129.
- Drummond, S.P., Brown, G.G., Gillin, J.C., Stricker, J.L., Wong, E.C., Buxton, R.B. (2000). Altered brain response to verbal learning following sleep deprivation. *Nature*, 403, 655-657.
- Elmenhorst, E.M., Elmenhorst, D., Wenzel, J., Quehl, J., Mueller, U., Maass, H., Vejvoda, M. & Basner, M. (2010). Effects of nocturnal aircraft noise on cognitive performance in the following morning: dose-response relationships in laboratory and field. *Int Arch Occup Environ Health*, 83, 743-51.
- Elmenhorst, E.M., Pennig, S., Rolny, V., Quehl, J., Müller, U. & Maaß, H. et al. (2012). Examining nocturnal Railway Noise and Aircraft Noise in the Field: Sleep, Psychomotor Performance, and Annoyance. *Science of the Total Environment* 424, 48-56.
- European Commission (2002). Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance, Luxemburg, February 2002, ISBN 92-894-3894-0.
- Felscher-Suhr, U., Guski, R., Hunecke, M., Kastka, J., Paulsen, R., Schuemer, R. & Vogt, J. (1995). Störungen von Alltagstätigkeiten durch Flug- und Straßenlärm. Eine methodologische Vorstudie. Ruhr-Universität Bochum.
- Felscher-Suhr, U., Guski, R., Hunecke, M., Kastka, J., Paulsen, R., Schuemer, R. & Vogt, J. (1996). Eine methodologische Studie zur aktuellen Erfassung von Alltagstätigkeiten und deren Störungen durch Umweltlärm. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 43, 61-68.
- Felscher-Suhr, U., Guski, R. & Schuemer, R. (2000). Internationale Standardisierungsbestrebungen zur Erhebung von Lärmbelästigung. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 2, 68-70.
- Fidell S., Pearsons K., Howe R., Tabachnick B., Silvati L. & Barber D.S. (1994). Noise-induced sleep disturbance in residential settings. Armstrong Laboratory, *Air Force Materiel Command, Wright-Patterson Air Force Base*, Ohio 45433-6573, AL/OE-TR-1994-0131.
- Fidell, S., Howe, R., Tabachnick, B. G., Pearsons, K. & Sneddon, M. (1995a). Noise-induced sleep disturbance in residences near two civil airports (Rep. No. NASA Contractor Report 198252). Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681-001, U.S.A.: NASA.
- Fidell, S., Pearsons, K., Tabachnick, B. G., Howe, R., Silvati, L. & Barber, D. (1995b). Field study of noise induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 1025-1033.
- Fidell, S., Silvati, L. (1998). Evaluation of Community Response to Aircraft Noise Following Completion of Runway 08L/26R at Vancouver International Airport. BBN Report No. 8247, California, USA.
- Fidell, T., Barber, D. & Schultz, T.J. (1991). Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 221-233.

- Fields, J.M. (1984). The effect of number of noise events on people's reactions to noise: An analysis of existing survey data. *Journal of the Acoustical Society of America*, 75, 447-467.
- Fields, J.M. (1986). The relative effect of noise at different times of day. NASA Contractor Report CR-3965. NASA, Hampton, USA.
- Fields, J.M. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93, 2753-2763.
- Fields, J.M., Ehrlich, G. E. & Zador, P. (2000). Theory and design tools for studies of reactions to abrupt changes in noise exposure. NASA/CR-2000-210280, Langley Research Center, Hampton, NASA.
- Fields, J.M., DeJong, R.G., Gjestland, F., Flindell, I.H., Job, R.F.S., Kurra, S., Lercher, P., Vallet, M., Guski, R., Felscher-Suhr, U. & Schuemer, R. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242, 641-679.
- Francois, J. (1979). Les répercussions du bruit des avions sur l'équilibre des riverains des aéroports: Etude longitudinal autour de Roissy, 3ème phase. Paris: IFOP/ETMAR.
- Friedmann J., Globus G. (1974). Effects of cessation of late night landing noise on sleep electrophysiology in the home. NASA Report 132543.
- Friedman J., Globus G. (1975). Impact of environmental noise on sleep electrophysiology as measured in the home. In: CEC (ed): *International Symposium, Recent Advances in the Assessment of Health Effects of Environmental Pollution. Vol II*, Luxembourg.
- Gelman, A. (2008). Scaling regression inputs by dividing by two standard deviations. *Stat.Med*, 27, 2865-2873.
- Globus, G.; J. Friedmann, H. Cohen, S.K. Pearsons & Fidell, S. (1974). The effects of aircraft noise on sleep electrophysiology as recorded in the home. *Noise as a Public Health Problem*, U.S. Environmental Protection Agency, 550/9-73.008.
- Golz, M., Sommer, D., Trutschel, U., Sirois, B. & Edwards, D. (2010). Evaluation of fatigue monitoring technologies. *Somnologie*, 14, 187-199.
- Griefahn, B., Muzet, A. (1978). Noise-induced sleep disturbances and their effects on health. Workshop "Effects of environmental noise exposure", Gothenburg, Sweden, April 20-22, 1977. *Journal of Sound and Vibration*, 59, 99-106.
- Griefahn, B. (1985a). Zur Wirkung von Straßenverkehrsgeräuschen auf den Schlaf. Ergebnisse einer Feldstudie. *Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Präventivmedizin*, 20, 73-77.
- Griefahn B. (1985b). Schlafverhalten und Geräusche. Feld- und Laboruntersuchungen über Straßenverkehr, EEG-Analyse, Literaturlauswertung. Stuttgart: Ferdinand Enke.
- Griefahn, B. (1986). A critical load for nocturnal high-density road traffic noise. *American Journal Ind Medicine*, 9, 261-269.
- Griefahn, B., Künemund, C., Bröde, P. & Mehnert, P., (2001). Zur Validität der deutschen Übersetzung des Morningness-Eveningness-Questionnaires von Horne und Östberg. *Somnologie*, 5, 71-80.

- Griefahn, B. (2002). Einsatz eines Fragebogens (D-MEQ) zur Bestimmung des Chronotyps bei der Zuweisung eines Schichtarbeitsplatzes. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 54, 142-149.
- Griefahn B., Jansen G., Scheuch K. & Spreng M, (2003). Vorschlag eines Bewertungssystems für Fluglärm. *ergomed*, 6, 184-191.
- Griefahn, B., Marks, A. & Robens, S. (2006). Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. *Journal of Sound and Vibration*, 295, 129-140.
- Griefahn, B., Basner, M., Bröde, P. & Robens, S. (2008a). Development of a sleep disturbance index (SDI) for the assessment of noise-induced sleep disturbances. *Somnologie*, 12, 150-157.
- Griefahn, B., Bröde, P., Marks, A. & Basner, M. (2008b). Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. *Sleep*, 31, 569-577.
- Guski, R. (1987). Lärm - Wirkungen unerwünschter Geräusche. Bern: Hans Huber.
- Guski, R. (1991). Zum Anspruch auf Ruhe beim Wohnen. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 38; 61-65.
- Guski, R. & Bosshardt, H.-G. (1992). Gibt es eine "unbeeinflusste" Lästigkeit? *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 39, 67-74
- Guski, R., Schuemer, R. & Felscher-Suhr, U. (1999). The concept of noise annoyance: how international experts see it. *Journal of Sound and Vibration*, 223, 513-527.
- Guski, R. (1999). Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*, 3, 45-56.
- Guski, R. (2001). Der Referenten-Entwurf zum Fluglärmgesetz aus der Sicht eines Lärmwirkungsforschers. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 48, 130-131.
- Guski, R. (2004). How to forecast community annoyance in planning noisy facilities? *Noise & Health*, 6, 59-64.
- Guski, R. & Schönplflug, W. (2004). Bestehende und neue bzw. wesentlich geänderte Flugplätze. In: Guski, R. et al. (Hrsg.). Fluglärm 2004. Stellungnahme des Interdisziplinären Arbeitskreises für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt, 28-36.
- Hardin, J.W., Hilbe, J.M. (2002). Generalized Estimating Equations. London: Chapman and Hall/CRC.
- HCN, Health Council of the Netherlands (1999). Public health impact of large airports, 1999/14E, Den Haag.
- Hellbrück, J. (1993). Gültigkeit Mittelungspegel-orientierter Lärmbewertungsverfahren. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungsbericht 105 01 999/01.
- Héritier, H., Vienneau, D., Frei, P., Eze, I.C., Brink, M., Probst-Hensch, N. & Röösli, M. (2014). The association between road traffic noise exposure, annoyance and health-related quality of life (HRQOL). *Int J Environ Res Public Health*, 11, 12652-12667.
- Hoddes, E., Dement, W.C. & Zarcone, V. (1972). The development and use of the Stanford Sleepiness Scale. *Psychophysiology*, 9, 150.
- Höger, R. (1999). Theoretische Ansätze und Ergebnisse der psychologisch orientierten Lärmwirkungsforschung. *Umweltpsychologie*, 3, 6-20.

- Höger, R., Schreckenber, D., Felscher-Suhr, U. & Griefahn, B. (2002). Night-time noise annoyance: state of the art. *Noise & Health*, 4, 19-25.
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6, 65-70.
- Horne, J.A., Östberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, 4, 97-100.
- Horne, J. A., Pankhurst, F. L., Reyner, L. A., Hume, K. & Diamond, I. D. (1994). A field study of sleep disturbance: effects of aircraft noise and other factors on 5,742 nights of actimetrically monitored sleep in a large subject sample. *Sleep*, 17, 146-159.
- Hosmer, D. H. & Lemeshow, S. (2000). Applied Logistic Regression. (2nd ed.) New York: Wiley.
- Hume, K.I., Thomas, C.S. (1993). Sleep disturbance due to aircraft noise at a rapidly expanding airport (Manchester Airport). *Noise as a public health problem*, 2, 563-567.
- Iber, C., Ancoli-Israel, S., Chesson, A. & Quan, S. F. (2007). The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specifications. (1st ed.) Westchester, Illinois: American Academy of Sleep Medicine.
- IBM Corp. Released (2012). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 21.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Irwin, M., McClintick, J., Costlow, C., Fortner, M., White, J., Gillin, J.C. (1996) Partial night sleep deprivation reduces natural killer and cellular immune responses in humans. *FASEB J*, 10:643-53.
- Janssen, S.A., Vos, H., van Kempen, E.E.M.M., Breugelmans, O.R.P. & Miedema, H.M.E. (2011). Trends in aircraft noise annoyance: The role of study and sample characteristics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129, 1953-1962.
- Jarup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K. & Cadum, E. (2008). Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environ. Health Perspect.*, 116, 329-333.
- Job, R.F.S. (1988). Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 991-1001.
- Job, R.F.S. (1999). Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to noise. *Noise and Health*, 3, 57-68.
- Job, R. F. S., Hatfield, J. (2003). A model of responses to changes in noise exposure. Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem, 232-234, Rotterdam.
- Kaida, K., Takahashi, M., Åkerstedt, T., Nakata, A., Otsuka, Y., Haratani, T. & Fukasawa, K. (2006). Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clinical Neurophysiology*, 117, 1574-1581.
- Kastka J., Mau U., Muth T. & Siegmann S. (1995). Standings and results of the research on aircraft noise. Longitudinal study at Dusseldorf Airport 1987-1995, *Internoise 1996*. 305-10.

- Kastka, J. (2001a). Tag-/Nacht-Lärmbelastungen in der Nachbarschaft von Flughäfen. Unveröffentlichter Vortrag auf der 1. Rheiner Fluglärmkonferenz am 30./31. Mai 2001.
- Kastka, J. (2001b). Fluglärmwirkung und Einzelereignisparameter, NAT70. Unveröffentlichter Vortrag auf dem Workshop "Verkehrsrelevante Lärmwirkungsforschung" im Wissenschaftszentrum Bonn am 18.01.2001.
- Killgore, W.D., Balkin, T.J., Wesensten, N.J. (2006). Impaired decision making following 49 h of sleep deprivation. *J Sleep Res*, 15, 7-13.
- Knutson, K. L. & Van Cauter, E. (2008). Associations between sleep loss and increased risk of obesity and diabetes. *Ann.N.Y.Acad.Sci.*, 1129, 287-304.
- Koella, W. P. (1988). Die Physiologie des Schlafes. Stuttgart-New York: Gustav-Fischer Verlag.
- Kroesen, M., Schreckenber, D. (2011). A measurement model for general noise reaction in response to aircraft noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129, 200-210.
- Krueger, J. M., Rector, D. M., Roy, S., Van Dongen, H. P., Belenky, G. & Panksepp, J. (2008). Sleep as a fundamental property of neuronal assemblies. *Nat.Rev.Neurosci.*, 9, 910-919.
- Krueger, P. M. & Friedman, E. M. (2009). Sleep duration in the United States: a cross-sectional population-based study. *Am.J.Epidemiol.*, 169, 1052-1063.
- Lampert, T., Kroll, L.E. (2009). Messung des sozioökonomischen Status in sozialepidemiologischen Studien. In: Richter, M., Hurrelmann, K. (Hrsg). Gesundheitliche Ungleichheit. Grundlagen, Probleme, Konzepte. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 309-334.
- Landis, J.R. & Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Landsness, E. C., Crupi, D., Hulse, B. K., Peterson, M. J., Huber, R. & Ansari, H. (2009). Sleep-dependent improvement in visuomotor learning: a causal role for slow waves. *Sleep*, 32, 1273-1284.
- Lercher, P., de Greve, B., Botteldooren, D. & Rüdisser, J. (2008). A comparison of regional noise-annoyance-curves in alpine areas with the European standard curves. Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) 2008, Foxwoods, CT.
- Liang, K. Y., Zeger, S. L. (1986). Longitudinal data analysis using generalized linear models. *Biometrika*, 73, 13-22.
- Lim, J., Dinges, D.F. (2008). Sleep deprivation and vigilant attention. *Ann N Y Acad Sci*, 1129, 305-322.
- Little, R.J.A. (1988). A Test of Missing Completely at Random for Multivariate Data with Missing Values. *Journal of the American Statistical Association*, 83, 1198-1202.
- Little, R.J.A., Rubin, D. B. (2002). Statistical Analysis with Missing Data. New York: Wiley.
- Martin, S.E., Engleman, H.M., Deary, I.J. & Douglas, N.J. (1996). The effect of sleep fragmentation on daytime function. *Am.J Respir.Crit Care Med*, 153, 1328-1332.
- Martin, S.E., Wraith, P.K., Deary, I. J. & Douglas, N.J. (1997). The effect of nonvisible sleep fragmentation on daytime function. *Am.J.Respir.Crit Care Med.*, 155, 1596-1601.
- Miedema, H.M.E. (1993). Response functions for environmental noise. TNO Publikation 92.021. Leiden: TNO.

- Miedema, H.M.E., Vos, H. (1998). Exposure-response relationships for transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104, 3432-3445.
- Miedema, H.M.E., Vos, H (1999). Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105, 3336-3344.
- Miedema, H.M.E., Oudshoorn, C.G. (2001). Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure Metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*, 109, 409-416.
- Miedema, H.M.E., Vos, H. (2003). Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 1492-1504.
- Miyahara, K. (1990). An investigation of secular change of social response to aircraft noise. In: Berglund, B. & Lindvall, T. (Eds.). Noise '88. Proceedings of the 5th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Part 2, 415-420.
- Müller, U., Elmenhorst, E.M., Maass, H., Rolny, V., Pennig, S., Quehl, J. & Basner, M. (2010). Verbundprojekt: DEUFRAKO/RAPS - Railway noise (and other modes) annoyance, performance, sleep: wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten ; Teilvorhaben DLR: Metaanalyse und Feldstudie; Abschlussbericht / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/639593747.pdf> (accessed on 17th July 2015)).
- Müller, R., Larisch, J. (2012). Arbeitsschutz in der Flugbegleitung: Arbeitsanforderungen, Rhythmen, Schlaf und Erholung. Münster: LIT.
- Muzet, A. (2002), The need for a specific noise measurement for population exposed to aircraft noise during night-time. *Noise and Health*, 4, 61-64.
- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med Rev*;11:135-42.
- Niederl, T. (2007). Untersuchung zu kumulativen psychischen und physischen Effekten des fliegenden Personals auf Kurzstrecke. Dissertation an der Universität Kassel.
- Norman, R.G., Pal, I., Stewart, C., Walsleben, J.A. & Rapoport, D.M. (2000). Interobserver agreement among sleep scorers from different centers in a large dataset. *Sleep*, 23, 901-8.
- Ohayon, M.M., Carskadon, M.A., Guilleminault, C. & Vitiello, M.V. (2004), Meta-analysis of quantitative sleep parameters from childhood to old age in healthy individuals: developing normative sleep values across the human lifespan. *Sleep*, 27, 1255-73.
- Öhrstrom, E., Rylander, R. (1982). Sleep disturbance effects of traffic noise - a laboratory study on after effects. *Journal of Sound and Vibration*, 84, 87-103.
- Öhrstrom, E., Bjorkman, M. (1988). Effects of noise disturbed sleep - A laboratory study on habituation and subjective noise sensitivity. *Journal of Sound and Vibration*, 122, 277-290.
- Öhrstrom, E., Rylander, R. (1990). Sleep disturbance by road traffic noise. A laboratory study on number of noise events. *Journal of Sound and Vibration*, 143, 93-101.
- Öhrstrom, E. (1995). Effects of low levels of road traffic noise during night. A laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity. *Journal of Sound and Vibration*, 179, 603-615.

- Oliva, C. (1998). Belastungen der Bevölkerung durch Flug- und Straßenlärm: eine Lärmstudie am Beispiel der Flughäfen Genf und Zürich. Berlin: Duncker und Humblot.
- Ollerhead, J.B., C.J. Jones, R.E. Cadoux, A. Woodley, B.J. Atkinson, J.A. Horne, F. Pankhurst, L., Reyner, K.I. Hume, F. Van, A. Watson, I.D. Diamond, P. Egger, D. Holmes & McKean, J. (1992). Report of a Field Study of Aircraft Noise and Sleep Disturbance. London: Department of Safety, Environment and Engineering.
- Ortscheid, J., Wende, H. (2000). Fluglärmwirkungen. Berlin: Umweltbundesamt.
- Pan, W. (2001). Akaike's information criterion in generalized estimating equations. *Biometrics*, 57, 120-125.
- Pearsons, K., Barber, D., Tabachnick, B.G. & Fidell, S. (1995). Predicting noise-induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 331-338.
- Pinheiro, J. & Bates, D. (2009). Mixed-Effects Models in S and S-Plus. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Plihal, W. & Born, J. (1997). Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *J.Cognitive Neurosci.*, 9, 534-547.
- Quehl, J. (2005). Nachtfluglärm, Belästigung und Schlaferleben. *Somnologie*, 9, 76-83.
- Quehl, J., Basner, M. (2005a). Annoyance from Nocturnal Aircraft Noise Exposure: Laboratory and Field-Specific Dose-Response Curves. *Journal of Environmental Psychology*, 26, 127-140.
- Quehl, J., Basner, M. (2005b). Belästigung durch Nachtfluglärm im Schlaflabor: Dosis-Wirkungskurven. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 52, 38-45.
- Quehl, J., Basner, M. (2006). Annoyance from nocturnal aircraft noise exposure: Laboratory and field-specific dose-response curves. *Journal of Environmental Psychology*, 26, 127-140.
- R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/> (accessed on 17th July 2015)).
- Rechtschaffen, A., Kales, A., Berger, R. J., Dement, W. C., Jacobsen, A. & Johnson, L. C. (1968). A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects. Washington, D.C.: Public Health Service, U.S. Government, Printing Office.
- Reinprecht, K. (2013). Der Einfluss von Müdigkeit auf das Fahr- Blick- & Sprachverhalten unter der Betrachtung verschiedener methodischer Ansätze und die Konsequenz für die Entwicklung von Müdigkeitsassistenzsystemen. Dissertation an der Universität Braunschweig.
- Richter, S., Marsalek, K., Glatz, C. & Gundel., A. (2005). Task-dependent differences in subjective fatigue scores. *J. Sleep Res.*, 14, 393-400.
- Rohrmann, B., Finke, H.-O., Guski, R., Schuemer, R. & Schuemer-Kohrs, A. (1978). Fluglärm und seine Wirkung auf den Menschen. Methoden und Ergebnisse der Forschung. Konsequenzen für den Umweltschutz. Bern: Huber.

- Rosenlund, M., Berglind, N., Pershagen, G., Järup, L. & Bluhm, G. (2001). Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise. *Occup Environ Med*;58:769-73.
- Rylander, R., Sörensen, S. & Kajland, A. (1972). Annoyance reactions from aircraft noise exposure. *Journal of Sound and Vibration*, 24, 419-444.
- 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.
- Rylander, R., Björkman, M., Ahrlin, U., Arntzen, U. & Solberg, S. (1986). Dose-response relationships for traffic noise and annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, 41, 7-10.
- Samel, A., Wegmann, H. M., Vejvoda, M. & Gundel, A. (1986). Sleep, Sleepiness, and Circadian Rhythmicity in Aircrews Operating on Transatlantic Routes. In: Crew Factors in Flight Operations: IV. Sleep and Wakefulness in International Aircrews. NASA Technical Memorandum 88231, 83-96.
- Samel, A., Wegmann H.M. & Vejvoda, M. (1997a). Two-crew operations: Stress and fatigue during long-haul night operations. *Aviat. Space Environ. Med.*, 68, 679-687.
- Samel, A., Wegmann H. M. & Vejvoda, M. (1997b). Aircrew fatigue in long-haul operations. *Accid. Anal. and Prev.*, 29, 439-452.
- Samel A., Basner M. (2005). Extrinsische Schlafstörungen und Lärmwirkungen. *Somnologie*, 9,58-67.
- Samn, S.W., Pirelli, L.P. (1982). Estimating aircraft fatigue: a technique with application to airlift operations. Technical Report SAM-TR-82-21, USAF School of Medicine, Brooks AFB, TX.
- SAS Institute Inc. (2008). SAS/STAT® 9.2 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Scheffer J. (2002). Dealing with Missing Data. *Res.Lett.Inf.Math.Sci*, 3, 153-160.
- Schick, A. (1997). Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung. Lengerich: Pabst Science.
- Schmidt, F. P., Basner, M., Kroger, G., Weck, S., Schnorbus, B. & Muttray, A. (2013). Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults. *Eur.Heart J*, 34, 3508-14a.
- Schmidt, F., Kollé, K., Kreuder, K., Schnorbus, B., Wild, P., Hechtner, M., Binder, H., Gori, T. & Münzel, T. (2015). Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease. *Clin Res Cardiol*;104:23-30.
- Schlack, R., Hapke, U., Maske, U., Busch, M. A. & Cohrs, S. (2013). Häufigkeit und Verteilung von Schlafproblemen und Insomnie in der deutschen Erwachsenenbevölkerung. Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt*, 56, 740-748.
- Schreckenberger, D., Felscher-Suhr, U. & Lass, J. (1999). Sozialwissenschaftliche Erhebung zur Lärmbelastigung in Baden-Württemberg. Bericht Nr. 1010/53478/33-90003913 im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Bochum: ZEUS GmbH.

- Schreckenber, D., Guski, R. (2005). Lärmbelastigung durch Straßen- und Schienenverkehrslärm zu unterschiedlichen Tageszeiten. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 10, 67-76.
- Schreckenber, D., Meis, M. (2006). Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Frankfurter Flughafens; AG Fluglärmwirkung: Bochum/OLdenburg, Germany, available online: <http://www.verkehrslaermwirkung.de/RDF0911.pdf> (accessed on 17th July 2015).
- Schreckenber, D., Basner, M. & Thomann, G. (2009). Wirkungsbezogene Fluglärmindizes. *Lärmbekämpfung*, 4, 47-62.
- Schreckenber, D., Meis, M., Kahl, C., Peschel, C. & Eikmann, T. (2010). Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport. *Int J Environ Res Public Health*, 7, 3382-3405.
- Schuemer, R., Schuemer-Kohrs, A. (1984). Zum Einfluss außer-akustischer Faktoren ('Moderatoren') auf die Reaktionen auf Verkehrslärm. In: Schick, A., Walcher, K.P. (Hrsg.). Beiträge zur Bedeutungslehre des Schalls, Ergebnisse des 3. Oldenburger Symposiums zur Psychologischen Akustik. Frankfurt am Main: Peter Lang, 87-98.
- Schuemer, R., Schreckenber, D. (2000). Änderung der Lärmbelastigung bei maßnahmebedingter, stufenweise veränderter Geräuschbelastung. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 47, 134-143
- Schultz, T.J. (1978). Synthesis of social surveys on noise annoyance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 64, 377-405.
- Schwarz, J.F., Popp, R., Haas, J., Zulley, J., Geisler, P., Alpers, G.W., Osterheider, M., Eisenbarth, H. (2013). Shortened night sleep impairs facial responsiveness to emotional stimuli. *Biol Psychol*, 93, 41-4.
- Selander, J., Bluhm, G., Theorell, T., Pershagen, G., Babisch, W. & Seiffert, I. (2009). Saliva cortisol and exposure to aircraft noise in six European countries. *Environ. Health Perspect.*, 117, 1713-1717.
- Sforza, E., Nicolas, A., Lavigne, G., Gosselin, A., Petit, D. & Montplaisir, J. (1999). EEG and cardiac activation during periodic leg movements in sleep: support for a hierarchy of arousal responses. *Neurology*, 52, 786-91.
- Shrive, F.M., Stuart, H., Quan, H. & Ghali, W.A. (2006). Dealing with missing data in a multi-question depression scale: a comparison of imputation methods. *BMC Medical Research Methodology*, 6, 57.
- Spath, D. (2004). Gesundheits- und leistungsförderliche Gestaltung geistiger Arbeit: Arbeitsgestaltung unter Einbeziehung menschlicher Eigenzeiten und Rhythmen. Berlin: Erich Schmidt.
- Stallen, P.J. (1999). A theoretical framework for environmental noise annoyance. *Noise and Health*, 3, 69-79.
- Stansfeld, S (1992). Noise, noise sensitivity and psychiatric disorder: epidemiological and psycho-physiological studies. *Psychological Medicine*, Monograph supplement, 22.
- Steinberg, R., Weeß, H.G. & Landwehr, R. (2000), Schlafmedizin - Grundlagen und Praxis. Bremen: Uni-Med. Verlag AG, Bremen-London-Boston.
- Steinberg, R., Weeß H.G. & Landwehr R. (2010), Schlafmedizin - Grundlagen und Praxis. Bremen: Uni-Med. Verlag AG, Bremen-London-Boston.

- Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, 437, 1272-1278.
- Tassi, P., Rohmer, O., Schimchowitsch, S., Eschenlauer, A., Bonnefond, A., Margiocchi, F., Poisson, F. & Muzet, A. (2010). Living alongside railway tracks: Long-term effects of nocturnal noise on sleep and cardiovascular reactivity as a function of age. *Environment International*, 36, 683-689.
- Tononi, G., Cirelli, C. (2014). Sleep and the price of plasticity: from synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration. *Neuron*, 81, 12-34.
- van Kamp, I., Brown, A. L. (2003). Response to changed dose of environmental noise: Diverse results and explanations in the literature. Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem, 266-267, Rotterdam.
- van Kempen, E.E.M.M., van Kamp, I. (2005). Annoyance from air traffic noise. Possible trends in exposure-response relationships. Report 01/2005 MGO EvK.
- Weinstein, N.D. (1978). Individual differences in reaction to noise: A longitudinal study in a college dormitory. *Journal of Applied Psychology*, 63, 458-466.
- Whitney C.W., Gottlieb, D.J., Redline, S., Norman, R.G., Dodge, R.R., Shahar, E., Surovec, S., Nieto, F.J. (1998). Reliability of scoring respiratory disturbance indices and sleep staging. *Sleep*, 21, 749-57.
- Williamson, A., Lombardi, D. A., Folkard, S., Stutts, J., Courtney, T. K. & Connor, J. L. (2011). The link between fatigue and safety. *Accid.Anal.Prev.*, 43, 498-515.
- Winkler, J. (1998). Die Messung des sozialen Status mit Hilfe eines Index in den Gesundheitssurveys der DHP. *RKI Schriften 1/1998*, 69-74.
- Winkler, J., Stolzenberg, H. (1999). Der Sozialschichtindex im Bundesgesundheitsurvey. *Das Gesundheitswesen*, 61, Sonderheft 2, 178-183.
- Winkler, J., Stolzenberg, H. (2009). Adjustierung des Sozialen-Schicht-Index für die Anwendung im Kinder- und Jugendgesundheitsurvey (KiGGS) 2003/2006. Wismarer Diskussionspapiere, Heft 07/2009.
- Wirth, K., Brink, M. & Schierz, C. (2002). Lärmstudie 2000 - Projektdesign und erste Resultate. Fortschritte in der Akustik, 346-347.
- Wirth, K. (2004). Lärmstudie 2000. Die Belästigungssituation im Umfeld des Flughafens Zürich. Aachen: Shaker.
- World Health Organization (WHO) (1968). Yearbook of International Organizations.
- World Health Organization (WHO) (2009). Night noise guidelines (NNGL) for Europe (Rep. No. [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0017/43316/E92845.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf) (accessed on 17th July 2015)). Copenhagen, Denmark.
- Xie, L., Kang, H., Xu, Q., Chen, M. J., Liao, Y. & Thiyagarajan, M. (2013). Sleep drives metabolite clearance from the adult brain. *Science*, 342, 373-377.
- Zimmer, K., Ellermeier, W. (1998). Konstruktion und Evaluation eines Fragebogens zur Erfassung der individuellen Lärmempfindlichkeit. *Diagnostica*, 44, 11-20.

- Zimmer, K., Ellermeier, W. (1999). Psychometric properties of four measures of noise sensitivity: a comparison. *Journal of Environmental Psychology*, 19, 295-302.
- Zohar, D., Tzischinsky, O., Epstein, R., Lavie, P. (2005). The effects of sleep loss on medical residents' emotional reactions to work events: a cognitive-energy model. *Sleep*, 28, 47-54.
- Zulley, J., Crönlein, T., Hell, W. & Langwieder, K. (1995). Einschlafen am Steuer: Hauptursache schwerer Verkehrsunfälle. *Wiener Medizinische Wochenzeitschrift*, 117/18, 473.
- Zulley, J., Knab, B. (2009). *Wach und fit: Mehr Energie, Leistungsfähigkeit und Ausgeglichenheit*. Frankfurt: Mabuse.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Messzeiträume der NORAH-Schlafstudie in den Jahren 2011 - 2013 .....	36
Tabelle 2-2: Mittlere stündliche Anzahl sämtlicher innen, während der Probandenbettzeit, gemessenen Überfliegergeräusche (ungestört + gestört) in NORAH in den Jahren 2011-2013 und der Köln-Bonner-Fluglärmstudie des DLR aus den Jahren 2001/2002.....	64
Tabelle 2-3: Vergleich der Mediane (25 %   75 % - Quantile) der Häufigkeitsverteilungen für Maximalpegel, Überfliegergeräuschlänge, Pegelanstiegssteilheit, energieäquivalenter Dauerschall-pegel der Überfliegergeräusche und aller Geräusche (alle innen, am Ohr des Schlafenden) bezogen auf den Zeitraum der Bettliegezeit der Probanden bzw. 0 - 6 Uhr für die Köln-Bonner-Studie. ....	71
Tabelle 2-4: Beurteilung der Stärke der Übereinstimmung zweier Methoden mit Hilfe von „Cohens Kappa“ .....	78
Tabelle 2-5: Entwicklung Alternativalgorithmus an Auswertung der EEG-Daten aller Probanden aus 2011 (106 Nächte).....	79
Tabelle 2-6: Validierung Alternativalgorithmus an Auswertung der EEG-Daten aller neuen Probanden aus 2012 (86 Nächte) .....	80
Tabelle 3-1: Modellierung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit als Wechsel aus dem Schlaf in das Stadium Wach. ....	90
Tabelle 3-2: Modellierung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit als Wechsel aus einem tieferen Stadium in die Stadien S1 oder Wach. ....	91
Tabelle 3-3: Überblick über Anzahl der Probanden, der Fluglärmereignisse und der Aufwachreaktionen.....	91
Tabelle 3-4: Verwendete versus nicht verwendete Fluglärmereignisse .....	92
Tabelle 3-5: Anzahl Probanden, verwendeter Fluglärmereignisse und fluglärmassoziierter Aufwachreaktionen in den beiden Bettzeitgruppen in 2012.....	93
Tabelle 3-6: Modell der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen Lärm und der Aufwachwahrscheinlichkeit mit der besten Anpassungsgüte (gesamte Daten aus 2011 und 2012) .....	101
Tabelle 3-7: Modell der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen Lärm und der Aufwachwahrscheinlichkeit für die Flughäfen Frankfurt und Köln-Bonn. ....	110
Tabelle 3-8: Überblick über Anzahl der Probanden, der Fluglärmereignisse und der vegetativ-motorischen Reaktionen.....	116
Tabelle 3-9: Modell der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen Lärm und der Wahrscheinlichkeit einer vegetativ-motorischen Reaktion mit der besten Anpassungsgüte .....	117
Tabelle 3-10: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell KSS-Anzahl-2011). ....	126
Tabelle 3-11: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell KSS-L <sub>ASeq</sub> -2011). ....	126

Tabelle 3-12: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der nächtlichen Schlaferholung in .	129
Tabelle 3-13: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der nächtlichen Schlaferholung in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell Schlaferholung- $L_{ASeq}$ -2012).	129
Tabelle 3-14: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell FAT-Anzahl-2013).	130
Tabelle 3-15: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell FAT- $L_{ASeq}$ -2013).	131
Tabelle 3-16: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell KSS-Anzahl-2013).	131
Tabelle 3-17: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell KSS- $L_{ASeq}$ -2013).	131
Tabelle 3-18: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell Bel-Anzahl-2013).	135
Tabelle 3-19: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell Bel- $L_{ASeq}$ -2013).	135
Tabelle 3-20: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge der vergangenen Nacht und einer zusätzlichen Differenzierung zwischen alt und neu belasteten Anwohnern (Modell Bel- Anzahl+Belastungsdauer-2013).	137
Tabelle 3-21: Logistisches Regressionsmodell mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf den nächtlichen Fluglärm und einer zusätzlichen Differenzierung zwischen alt und neu belasteten Anwohnern (Modell Bel- $L_{ASeq}$ +Belastungsänderung-2013).	137
Tabelle 3-22: Logistisches Regressionsmodell „Bel-Studie 1“ mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht.	139
Tabelle 3-23: Logistisches Regressionsmodell „Bel-Studie 2“ mit Zufallseffekten zur Vorhersage der Belästigung am Morgen in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm.	140
Tabelle 3-24: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (Modell KSS-Längs-Anzahl) in den Jahren 2011 bis 2013.	142
Tabelle 3-25: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell KSS-Längs- $L_{ASeq}$ ) in den Jahren 2011 bis 2013.	142
Tabelle 3-26: GEE-Regressionsmodell zur Vorhersage der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit von der Anzahl der Überflüge in der Nacht (FAT-Längs-Anzahl) in den Jahren 2011 bis 2013.	143

Tabelle 3-27: GEE-Regressionsmodell zur der Müdigkeit am Morgen in Abhängigkeit vom energieäquivalenten Dauerschallpegel bezogen auf nächtlichen Fluglärm (Modell FAT-Längs- $L_{Aeq}$ ) in den Jahren 2011 bis 2013. ....143

Tabelle Anhang 1-1: Schlafparameter vor und nach Behandlung der Daten des Studienjahrs 2012 mit einem errechneten EEG-Filter..... 189

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Untersuchungsgebiete der NORAH-Schlafstudie im Rhein-Main Gebiet um den Frankfurter Flughafen, hellgrüne Flächen: Gebiete 2011-2013, blaue Flächen: neu hinzugekommene Gebiete in 2013. ....	33
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlverfahrens und der Datenanalyse für das Messjahr 2011. ....	37
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlverfahrens und der Datenanalyse für das Messjahr 2012. Von den fünf Datenausfällen bei den Fragebögen gingen zwei mit gleichzeitigem Akustikausfall und zwei zusätzliche mit Akustikausfall und Schlafausfall einher. ....	38
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Anzahl der verwendeten Probandendatensätze im Verlauf des Auswahlverfahrens und der Datenanalyse für das Messjahr 2013. Alle drei Probanden mit Hörstörung litten auch am Apnoesyndrom. Von den 13 Fragebögenausfällen gingen zwei mit gleichzeitigem Akustikausfall einher. Von den 17 Akustikausfällen gingen zusätzlich einer mit Schlafausfall einher. Probanden mit Apnoesyndrom wurden bei der Auswertung der subjektiven Reaktionen nicht ausgeschlossen. ....	39
Abbildung 2-5: Täglicher Untersuchungsablauf der Schlafstudie in den Jahren 2011 und 2012 .....	40
Abbildung 2-6: Verteilung der Geschlechtszugehörigkeit in den Stichproben 2011 (N=49), 2012 (N=83), 2013 (N=187). ....	41
Abbildung 2-7: Verteilung des Alters in Kategorien von 10 Jahren in den Stichproben 2011 (N=49), 2012 (N=83), 2013 (N=187). ....	42
Abbildung 2-8: Anzahl der Personen im Haushalt in den Stichproben 2011 (N=43), 2012 (N=74), 2013 (N=176). ....	43
Abbildung 2-9: Erwerbstätigkeit in den Stichproben 2011 (N=48), 2012 (N=75), 2013 (N=187). ....	43
Abbildung 2-10: Höchster erreichter Schulabschluss in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=74), 2013 (N=187). ....	44
Abbildung 2-11: Höchster erreichter Ausbildungsabschluss in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=74), 2013 (N=184). ....	45
Abbildung 2-12: Monatliches Haushaltsnettoeinkommen in den Stichproben 2011 (N=43), 2012 (N=69), 2013 (N=176). ....	46
Abbildung 2-13: Haus-/Wohnungstyp in den Stichproben 2011 (N=43), 2012 (N=75), 2013 (N=176). ....	46
Abbildung 2-14: Präferierte Partei in den Stichproben 2011 (N=42), 2012 (N=67), 2013 (N=174). Versehentlich wurde im Fragebogen die Antwortkategorie „PDS“ anstatt „Die Linke“ vorgegeben. ....	47

Abbildung 2-15: Verteilung der Schichtzugehörigkeit nach dem Scheuch-Winkler-Index in den Stichproben 2011 (N=36), 2012 (N=62), 2013 (N=140). . . . .	49
Abbildung 2-16: Chronotyp in den Stichproben 2011 (N=47), 2012 (N=77), 2013 (N=183). . . . .	51
Abbildung 2-17: Subjektive Lärmempfindlichkeit in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=76), 2013 (N=187). . . . .	51
Abbildung 2-18: Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs in den Jahren 2011 (N=46), 2012 (N=76), 2013 (N=187). . . . .	52
Abbildung 2-19: Prozentuale Verteilung der allgemeinen Fluglärmbelastigung vor Beginn der Schlafstudie in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie stark werden Sie belästigt durch Fluglärm?“) . . . . .	53
Abbildung 2-20: Gewöhnung an Fluglärm in den Stichproben 2011 (N=47), 2012 (N=83), 2013 (N=186). . . . .	53
Abbildung 2-21: Subjektive Einstellung zum Flugverkehr in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=75), 2013 (N=185). . . . .	55
Abbildung 2-22: Eingestufte Chancen etwas erfolgreich gegen Fluglärm zu unternehmen in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=76), 2013 (N=185). . . . .	55
Abbildung 2-23: Teilnahme an Aktivitäten gegen Fluglärm in den Stichproben 2011 (N=46), 2012 (N=77), 2013 (N=185). . . . .	56
Abbildung 2-24: In der NORAH-Schlafstudie eingesetzter Klasse1-Schallpegelmesser XL2 der Firma NTi Audio. . . . .	57
Abbildung 2-25: 10-minütiger Schalldruckpegelverlauf einer Testmessung am Ohr des Schlafenden vom 14.07.2011 an einer Messstelle in Raunheim bei geöffnetem Fenster. . . . .	58
Abbildung 2-26: 40-minütiger Schalldruckpegelverlauf am Ohr des Schlafenden vom 28.07.2011 an einer Messstelle in Offenbach bei geöffnetem Fenster. . . . .	59
Abbildung 2-27: 10-minütiger Schalldruckpegelverlauf am Ohr des Schlafenden vom 18.09.2013 an einer Messstelle in Trebur bei gekipptem Fenster. . . . .	60
Abbildung 2-28: Mittlere stündliche Anzahl sämtlicher innen, während der Probandenbettzeit, gemessenen Überflugeräusche (ungestört + gestört) an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. . . . .	63
Abbildung 2-29: Häufigkeitsverteilung der Maximalpegel sämtlicher innen, während der Bettzeit am Ohr des Schlafenden gemessenen ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. . . . .	65
Abbildung 2-30: Häufigkeitsverteilung der Geräuschlängen sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. . . . .	66
Abbildung 2-31: Häufigkeitsverteilung der Schallexpositionspegel SEL sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. . . . .	67
Abbildung 2-32: Häufigkeitsverteilung der energieäquivalenten Dauerschallpegel $Leq_3$ der Gesamtnacht sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen in den Jahren 2011-2013. . . . .	68
Abbildung 2-33: Häufigkeitsverteilung der Pegelanstiegssteilheiten sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, ungestörten Überflugeräusche an allen Messstellen der Jahre 2011-2013. . . . .	69

Abbildung 2-34: Häufigkeitsverteilung der energieäquivalenten Dauerschallpegel $Leq_3$ der Gesamtnacht sämtlicher innen, während der Bettzeit gemessenen, Geräusche an allen Messstellen in den Jahren 2011-2013. ....	70
Abbildung 2-35: Schlafstadienklassifikation: Auszug aus (Rechtschaffen et al., 1968).....	72
Abbildung 2-36: Hypnogramm einer ungestörten Nacht. ....	72
Abbildung 2-37: Schematische Darstellung der Elektrodenpositionierung, wie sie in den Jahren 2011 und 2012 gewählt wurde. ....	73
Abbildung 2-38: 30 s Epoche mit Aufwachreaktion aus dem Schlaf .....	75
Abbildung 2-39: Ruhe-Aktivitätsmuster gemessen mit Hilfe der Aktimetrie. ....	75
Abbildung 2-40: Proband mit Messequipment für die Polysomnografiemessung (links) und Messequipment für die für die vegetativ-motorische Methode benötigte EKG- und Aktimetriemessung (rechts). ....	76
Abbildung 2-41: Definition der 1. Lärmepoche. Die vertikalen Balken stellen jeweils Start und Ende einer 30 s - Epoche dar. Das rote Flugzeug symbolisiert den Start eines Fluglärmereignisses. Sowohl in Bild (a) als auch in Bild (b) beginnt das Fluglärmereignis innerhalb von 15 s nach dem Start von Epoche B. Daher ist in beiden Fällen diese Epoche die 1. Lärmepoche und Epochen B, C und D werden auf eine Aufwachreaktion überprüft. ....	84
Abbildung 3-1: Verhältnis der Gesamtanzahl aller aufgezeichneten Fluglärmereignisse zur Anzahl für die Analyse verwendeter Fluglärmereignisse, die in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht dargestellt ist. Die graue Fläche zeigt die Kernruhezeit an. Etwa 15 min nach 23:00 Uhr überquerten die letzten Flugzeuge das Untersuchungsgebiet bzw. 15 min vor 5:00 Uhr überflogen die ersten Flugzeuge das Untersuchungsgebiet vor der Landung gegen 5:00 Uhr. ....	92
Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen mittlerer fluglärmassoziierter Aufwachhäufigkeit pro Nacht und der mittleren Anzahl der Fluglärmereignisse pro Nacht für die Probanden im Untersuchungsjahr 2011 sowie für Bettzeit 1 und Bettzeit 2 im Jahr 2012 mit Standardfehler in x- und y- Richtung. * bezeichnet signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ), geprüft mittels GEE, adjustiert für multiples Testen nach Holm. ....	94
Abbildung 3-3: Nächtlicher Verlauf der mittleren Anzahl an Fluglärmereignissen (oberer Teil) und fluglärmassoziierter Aufwachreaktionen (unterer Teil) in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht. * bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2011 und 2012, adjustiert für multiple Tests nach Holm. Die Fehlerbalken entsprechen einem Standardfehler. ....	95
Abbildung 3-4: Gesamtschlafdauer (in Minuten): Antennen entsprechen dem 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Die waagerechte Linie innerhalb der Boxplots zeigt die Lage des Medians an; mit einer Raute ist zusätzlich der Mittelwert abgebildet. 2011: 49 Probanden, 110 Nächte; 2012: Gruppe 1: 40 Probanden, 98 Nächte; 2012: Gruppe 2: 41 Probanden, 93 Nächte. ....	96
Abbildung 3-5: Dauer vom Zeitpunkt des Zubettgehens bis zum Erreichen der ersten Epoche im Schlaf (in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4. ....	96
Abbildung 3-6: Schlafeffizienz (Total Sleep Time / Time in Bed). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4. ....	97

Abbildung 3-7: Wachdauer nach dem Einschlafen (WASO in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4. .... 98

Abbildung 3-8: Mittlere Wachdauer (WASO) nach dem Schlafanfang (erstes Erreichen eines Schlafstadiums) bis zum Aufstehen in halbstündigen Intervallen. \* indiziert einen signifikanten Unterschied der Mittelwerte ( $p < 0,05$ ), adjustiert für multiple Tests nach Holm. .... 98

Abbildung 3-9: Wachdauer (in Minuten) dargestellt als Differenz zwischen geplantem und tatsächlichem Schlafende. .... 99

Abbildung 3-10: Prozentsatz der im Stadium Wach verbrachten Zeit seit 4:30 Uhr, standardisiert auf die mögliche Schlafdauer. Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-4. .... 100

Abbildung 3-11: Expositions-Wirkungskurve zwischen maximalem Schalldruckpegel eines Fluglärm-ereignisses und der Aufwachwahrscheinlichkeit der Probanden am Flughafen Frankfurt in den Jahren 2011 und 2012. Schraffiert dargestellt sind die 95%-Konfidenzintervalle. Geräushdauer=68 s (Median), bisherige Anzahl an Schallereignissen=19 (Median),  $L_{ASeq}$  eine Minute vor dem Fluglärmereignis=28,8 dB(A) (Median), verstrichene Schlafdauer=814 Epochen entspricht ca. 5:30 Uhr, Alter=43 (Median). .... 102

Abbildung 3-12: Zusammenhang zwischen Anzahl der nächtlichen Fluglärmereignisse und der fluglärmassoziierten Aufwachhäufigkeit jeweils pro Nacht für die Probanden im Untersuchungsjahr 2012 für Bettzeit 1 und Bettzeit 2 mit Standardfehler in x- und y-Richtung. \* bezeichnet signifikante Unterschiede der Mittelwerte ( $p < 0,05$ ), geprüft mittels GEE, adjustiert für multiples Testen nach Holm. .... 104

Abbildung 3-13: Nächtlicher Verlauf der mittleren Anzahl an Fluglärmereignissen (oberer Teil) und fluglärmassoziierten Aufwachreaktionen (unterer Teil) in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht. \* bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2011 und 2012, adjustiert für multiple Tests nach Holm. Die Fehlerbalken entsprechen einem Standardfehler. .... 104

Abbildung 3-14: Gesamtschlafdauer (in Minuten) im Vergleich der Bettzeitgruppe 1 und der Bettzeitgruppe 2 am Flughafen Frankfurt mit den Probanden am Flughafen Köln-Bonn. Antennen entsprechen dem 1,5-fachen des Interquartilsabstands. Die waagerechte Linie innerhalb der Boxplots zeigt die Lage des Medians an; mit einer Raute ist zusätzlich der Mittelwert abgebildet. Im Jahr 2012 sind Zubettgeh-Zeiten angegeben der Bettzeitgruppe 1: 40 Probanden, 98 Nächte sowie Bettzeitgruppe 2: 41 Probanden, 93 Nächte. Am Flughafen Köln-Bonn wurden 61 Probanden in 421 Nächten analysiert. \* bezeichnet signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ) in den Mittelwerten, adjustiert für multiple Tests nach Holm. .... 106

Abbildung 3-15: Dauer vom Zeitpunkt des Zubettgehens bis zum Erreichen eines jeglichen Schlafstadiums (in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14. .... 106

Abbildung 3-16: Wachdauer nach dem Einschlafen (Wake after Sleep onset=WASO in Minuten) bis zum Aufstehen. Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14. .... 107

Abbildung 3-17: Schlaffeffizienz (Total Sleep Time / Time in Bed): Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14.....	108
Abbildung 3-18: Dauer des Tiefschlafs (S3 + S4 in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14. ....	108
Abbildung 3-19: Anteil (in Prozent) der Dauer des Tiefschlafs (S3 + S4 in) bezogen auf die Gesamtschlafdauer. Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14. ....	109
Abbildung 3-20: REM-Schlafdauer (in Minuten). Detaillierte Informationen zur Grafik finden sich in der Unterschrift zu Abbildung 3-14. ....	109
Abbildung 3-21: Expositions-Wirkungskurve zwischen maximalem Schalldruckpegel eines Fluglärm-ereignisses und der fluglärmassozierten Aufwachwahrscheinlichkeit der Probanden aus NORAH im Jahr 2012 (N=41) sowie den Probanden am Flughafen Köln-Bonn (N=61) (Basner et al., 2006) beruhend auf dem Modell in Tabelle 3-7. Schraffiert dargestellt sind die 95%-Konfidenzintervalle der Köln-Bonner Studie und der NORAH-Studie des Jahres 2012. $L_{ASeq}$ eine Minute vor dem Fluglärmereignis=27,6 dB(A) (Median), aktuelles Schlafstadium=S2, verstrichene Schlafdauer=766 Epochen entspricht ca. 5:30 Uhr in NORAH 2012. ....	111
Abbildung 3-22: Gesamtschlafdauer (in Minuten) der Probanden, die ihre Einstellung zum Flugverkehr ‚nicht negativ‘ bzw. ‚negativ‘ bewerteten und die die Notwendigkeit des Flugverkehrs als ‚hoch‘ bzw. ‚mittel‘ einstufen. Weitere Details der Grafik sind in der Unterschrift zu Abbildung 3-14 beschrieben. ....	112
Abbildung 3-23: Dauer vom Zeitpunkt des Zubettgehens bis zum Erreichen eines Schlafstadiums (in Minuten) gruppiert nach der subjektiven Einstellung zum Flugverkehr. ....	113
Abbildung 3-24: Schlaffeffizienz (in Prozent) im Vergleich der subjektiven Bewertung des Flugverkehrs. ....	114
Abbildung 3-25: Kumulierte Wachdauer nach dem Einschlafen bis zum Aufstehen (in Minuten) im Vergleich der subjektiven Einstellung zum Flugverkehr. ....	114
Abbildung 3-26: Dauer, die die Probanden im Tiefschlaf verbrachten (in Minuten), im Vergleich der Gruppen mit unterschiedlicher Einstellung zum Flugverkehr. ....	115
Abbildung 3-27: Dauer, die die Probanden im REM-Schlaf verbrachten (in Minuten), im Vergleich der Gruppen mit unterschiedlicher Einstellung zum Flugverkehr. ....	115
Abbildung 3-28: Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen maximalem Schalldruckpegel und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer vegetativ-motorischen Reaktion im Vergleich der Jahre 2011-2013 beruhend auf dem Modell in Tabelle 3-9. Geräuschkdauer=67 s (Median), Alter=42 Jahre (Median); verstrichene Schlafdauer=837 Epochen entspricht ca. 5:30 Uhr. ....	118
Abbildung 3-29: Expositions-Wirkungsbeziehung wie in Abbildung 3-28 mit zusätzlicher Unterscheidung nach Bettzeitgruppen.....	118
Abbildung 3-30: Expositions-Wirkungsbeziehung aus Abbildung 3-28 und Expositions-Wirkungsbeziehung beruhend auf der Polysomnografie des Jahres 2012.....	119
Abbildung 3-31: Expositions-Wirkungskurven der vegetativ-motorischen Reaktionswahrscheinlichkeit im Jahr 2012, für die der Datensatz um unterschiedliche Stadien (Wach und S1 bzw. Wach, S1 und REM reduziert und mit dem Gesamtdatensatz verglichen wurde... 120	120

Abbildung 3-32: Prozentuale Verteilung der subjektiven Aufwachhäufigkeit (Anzahl) in der Nacht in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie oft sind Sie heute Nacht aufgewacht?“). ..... 121

Abbildung 3-33: Boxplot zur Einstufung der subjektiven Schläfrigkeit am Morgen anhand der Karolinska Sleepiness Scale (KSS) in den Stichproben 2011 bis 2013. .... 122

Abbildung 3-34: Boxplot zur Einstufung der subjektiven Müdigkeit am Morgen anhand des Fatigue-Fragebogens (FAT) in den Stichproben 2011 bis 2013. .... 123

Abbildung 3-35: Boxplot zur subjektiven Schlafbewertung anhand visueller Analogskalen (VAS) in der Stichprobe 2011..... 124

Abbildung 3-36: Boxplot zur subjektiven Schlafbewertung anhand visueller Analogskalen (VAS) in der Stichprobe 2012..... 124

Abbildung 3-37: Boxplot zur subjektiven Schlafbewertung anhand visueller Analogskalen (VAS) in der Stichprobe 2013..... 125

Abbildung 3-38: Durch das Regressionsmodell „KSS-Anzahl-2011“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in der Stichprobe 2011. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an. .... 128

Abbildung 3-39: Durch das Regressionsmodell „Schlaferholung-Anzahl-2012“ vorhergesagte nächtliche Schlaferholung in der Stichprobe 2012. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an. .... 130

Abbildung 3-40: Durch das Regressionsmodell „KSS-Anzahl-2013“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 %-Konfidenzintervall an. .... 132

Abbildung 3-41: Durch das Regressionsmodell „KSS-L<sub>ASeq</sub>-2013“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 %-Konfidenzintervall an. .... 133

Abbildung 3-42: Prozentuale Verteilung der Belästigung am Morgen in der Stichprobe 2013 (Frage: „Wie stark wurden Sie durch den Fluglärm der vergangenen Nacht belästigt?“). . 134

Abbildung 3-43: Durch Regressionsmodell „Bel-Anzahl-2013“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an. .... 136

Abbildung 3-44: Durch Regressionsmodell „Bel-L<sub>ASeq</sub>-2013“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013. Die graue Fläche zeigt das 95 % - Konfidenzintervall an. .... 136

Abbildung 3-45: Durch Regressionsmodell „Bel-Anzahl+Belastungsänderung-2013“ vorhergesagter Anteil durch nächtlichen Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013, differenziert nach alt und neu belasteten Anwohnern. Die schraffierten Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an. .... 138

Abbildung 3-46: Durch Regressionsmodell „Bel-L<sub>ASeq</sub>-Belastungsänderung-2013“ vorhergesagter Anteil durch nächtlichen Fluglärm Belästigter in der Stichprobe 2013, differenziert nach alt und neu belasteten Anwohnern. Die schraffierten Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an. .... 138

Abbildung 3-47: Durch Regressionsmodell „Bel-Studie 1“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie. Die grauen Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an..... 140

Abbildung 3-48: Durch Regressionsmodell „Bel-Studie 2“ vorhergesagter Anteil durch Fluglärm Belästigter in der NORAH-Schlafstudie 2013 und in der Köln-Bonner-Schlafstudie. Die grauen Flächen zeigen das 95 %-Konfidenzintervall an.....141

Abbildung 3-49: Durch das Regressionsmodell „KSS-Längs-Anzahl“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet. ....144

Abbildung 3-50: Durch das Regressionsmodell „KSS-Längs-L<sub>ASeq</sub>“ vorhergesagte subjektive Schläfrigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet. ....145

Abbildung 3-51: Durch das Regressionsmodell „FAT-Längs-Anzahl“ vorhergesagte Müdigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Die grüne Kurve aus 2011 und die blaue Kurve aus 2012 liegen übereinander. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet.....145

Abbildung 3-52: Durch das Regressionsmodell „FAT-Längs-L<sub>ASeq</sub>“ vorhergesagte Müdigkeit am Morgen in den Jahren 2011 bis 2013. Die grüne Kurve aus 2011 und die blaue Kurve aus 2012 liegen übereinander. Auf eine Darstellung der 95 % - Konfidenzintervalle wird aus Übersichtsgründen verzichtet.....146

Abbildung 3-53: Subjektive Einstellung zum Flugverkehr in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie stehen Sie dem Flugverkehr insgesamt gegenüber?“).....147

Abbildung 3-54: Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs in der eigenen Wohngegend in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie zufrieden sind Sie in Ihrer Wohngegend mit der Lautstärke des Flugverkehrs?“). ....148

Abbildung 3-55: Bewertung der Gesundheitsschädigung durch Fluglärm in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Wie stark schädigt Fluglärm im allgemeinen die Gesundheit“). ...148

Abbildung 3-56: Einstufung der eigenen Lärmempfindlichkeit in den Stichproben 2011 bis 2013 (Frage: „Für wie empfindlich gegen Lärm jeglicher Art halten Sie sich?“). ....149

Abbildung Anhang 1-1: Beispielhafte EEG-Spektren für REM-Schlaf von zwei Nächten ein- und desselben Probanden aus den Studienjahren 2011 und 2012 (oben) und Filterkennlinie 1. Ordnung, die auf der Basis der Differenz der Spektren errechnet wurde (unten). .....186

Abbildung Anhang 1-2: Vergleich der EEG-Spektren für REM-Schlaf der Studie NORAH, einer früheren Feldstudie des DLR (STRAIN) und einer Laborstudie (UPENN Lab Study). Gezeigt sind Mittelwerte (NORAH 2011: N=39, NORAH 2012: N=36, STRAIN: N=10, UPENN Lab Study: N=10). Die Spektren für NORAH 2011 weichen deutlich von allen anderen Spektren ab...188

Abbildung Anhang 1-3: Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen maximalem Schalldruckpegel eines Fluglärmereignisses und der Aufwachwahrscheinlichkeit, dargestellt für 2 Gruppen von Nächten aus dem Studienjahr 2012, für die die Übereinstimmung der Wachdauer vor und nach EEG-Filterung gemessen an Cohen’s  $\kappa$  unterschiedlich hoch war. Für die Darstellung wurden folgende Werte (Mediane) für die Variablen verwendet: Dauer des Fluglärmereignisses: 68 s, bisherige Anzahl der Fluglärmereignisse: 19, Schlafdauer: 407 min, Alter: 43 Jahre, L<sub>ASeq</sub> 1 min vor Beginn des Fluglärmereignisses: 29 dB(A). Graue Fläche entspricht dem 95 %-Konfidenzintervall (36 Nächte). Der maximale Unterschied zwischen den Kurven war 2 % bei 73 dB(A). ....190

## Anhang 1: Technische Probleme mit der Polysomnografie in 2011 und daraus abgeleitete Konsequenzen für die Datenauswertung

### Übersicht

In der in diesem Bericht präsentierten Auswertung wurde von einem Längsschnittvergleich zwischen den Jahren 2011 und 2012 einiger aus der Polysomnografie (PSG) abgeleiteter Schlafparameter wegen technischer Probleme im Studienjahr 2011 abgesehen. Dies betraf die pro Nacht verbrachte Dauer in den Schlafstadien S1, S2, S3, S4 und REM. Das Scoring aller in 2011 und 2012 aufgezeichneten Nächte ergab zunächst einen signifikanten Unterschied zwischen den Jahren; die in den Stadien S3 und S4 verbrachte Schlafdauer, auch als Tiefschlafdauer bezeichnet, war für das Jahr 2012 signifikant länger. Dieses Ergebnis war im Ausmaß unerwartet und Anlass die gesamte Aufzeichnungs-, Verarbeitungs- und Auswertungskette der PSG-Daten zu überprüfen. Diese Kette begann mit der Erfassung der Signale mit Elektroden an der Körperoberfläche der Probanden, der Vor/Nachverstärkung, Filterung, Digitalisierung und Speicherung der Signale durch die Hardware der Aufzeichnungsgeräte, einer Offline-Softwarefilterung und Konvertierung der Daten in das EDF-Format, dem Importieren dieser Dateien in die Scoring-Software und schließlich dem Scoring der Schlafstadien nach konventionellen Richtlinien (Rechtschaffen et al., 1968) durch einen menschlichen Auswerter.

### Überprüfung des Schlafstadien-Scorings

Als erstes wurde das Scoring überprüft. Dazu wurden die PSG-Daten von 80 Nächten (je eine Nacht pro Proband und Studienjahr) von einem zweiten, unabhängigen Auswerter gescort. Die Auswertung dieser Daten (Auswerter 2) bestätigte das Ergebnis der ersten Auswertung (Auswerter 1), d.h. sie ergab ebenfalls eine verlängerte Tiefschlafdauer in 2012 gegenüber 2011. Daraus konnte geschlossen werden, dass nicht ein fehlerhaftes Schlafstadien-Scoring für den Unterschied verantwortlich gemacht werden konnte.

### Überprüfung der Offline-Verarbeitung der EEG-Signale

Als zweites wurde die Offline-Software-Filterung der EEG-Signale überprüft. Denkbar war, dass ein Unterschied zwischen den Jahren 2011 und 2012 in der Einstellung des Hochpassfilters die Amplitude der Signale im niederfrequenten Bereich, d.h. im Bereich von 0,5-2,0 Hz, der für das Scoring der Stadien S3 und S4 maßgebend ist, beeinflusst hat. Zu diesem Zweck wurden die Rohdaten (binäre Dateien) aus beiden Studienjahren in 2015 mit einem definierten Hochpassfilter (-3 dB bei 0,05 Hz) erneut gefiltert und auf der Basis von EEG-Spektren mit den in den Jahren 2011 und 2012 gefilterten Daten verglichen. Da die EEG-Spektren aus 2015 mit denjenigen aus 2011 bzw. 2012 kongruent waren, konnte

geschlossen werden, dass nicht eine irrtümliche, von 0,05-Hz abweichende Einstellung des Software-Hochpassfilters für die Unterschiede zwischen den Studienjahren verantwortlich war.

### Überprüfung der Hardware-basierten EEG-Filterung

Als nächstes wurde die Hardware der Aufzeichnungsgeräte überprüft. Diese Geräte sind im DLR selbst entwickelt und für den Einsatz in verschiedenen Studien mehrfach umgebaut und konfiguriert worden. Die Geräte arbeiteten im Wesentlichen mit einem DC-gekoppelten Vorverstärker, einem Hochpassfilter 1. Ordnung mittels RC-Glied, einem Nachverstärker und einem Tiefpassfilter. Im Studienjahr 2012 war eine Grenzfrequenz (-3dB) von 0,03 Hz für den Hochpassfilter der EEG-Kanäle implementiert. Dies wurde in 2015 durch einen Frequenzgangtest überprüft. Die Geräte, wie sie im Zustand von 2011 benutzt wurden, standen 2015 nicht mehr für eine experimentelle Überprüfung zur Verfügung.

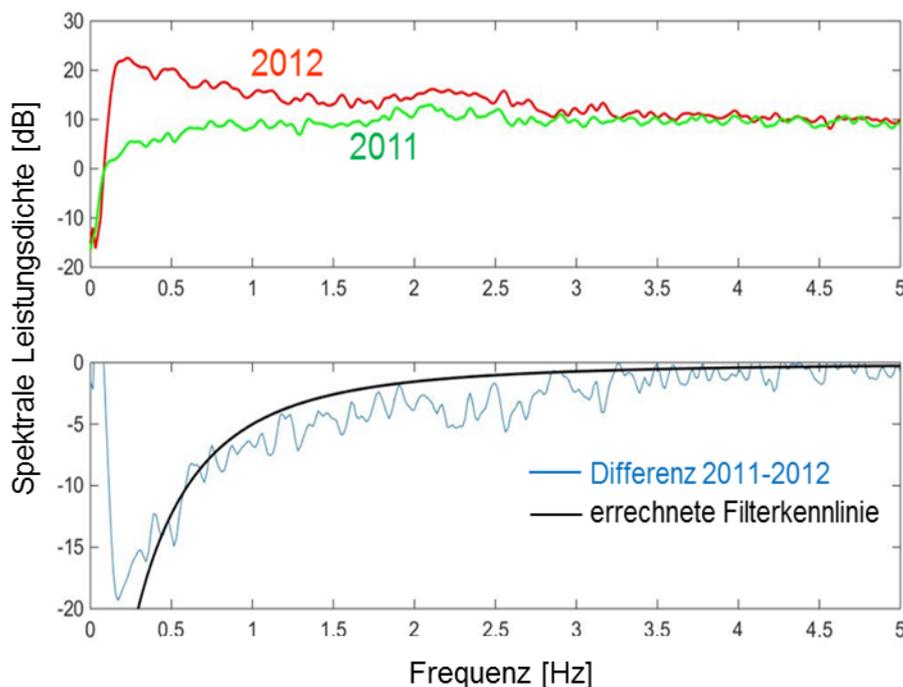


Abbildung Anhang 1-1: Beispielhafte EEG-Spektren für REM-Schlaf von zwei Nächten ein- und desselben Probanden aus den Studienjahren 2011 und 2012 (oben) und Filterkennlinie 1. Ordnung, die auf der Basis der Differenz der Spektren errechnet wurde (unten).

Um zu testen, ob für die in 2011 aufgezeichneten PSG-Nächte unbeabsichtigt eine von 0,03 Hz abweichende Hochpassfilterung zur Anwendung kam, wurden EEG-Spektren mit einer hohen Frequenzauflösung für alle in 2011 und 2012 aufgezeichneten Nächte und Probanden gerechnet. Ein Unterschied in der spektralen Leistungsdichte („Power density“) im

niederfrequenten Bereich wäre ein Hinweis, dass ein systematischer Unterschied in der Hochpassfilterung zwischen den beiden Studienjahren bestand. EEG-Spektren wurden für zusammenhängende, Artefakt-freie 90-s-Abschnitte im REM-Schlaf gerechnet. REM-Schlaf wurde für diese Untersuchung gewählt, da dieser typischerweise keine EEG-Deltawellen (0,5-2,0 Hz) zeigt, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Lärmsituation in den Jahren 2011 und 2012 in Menge und Größe hätten unterscheiden können.

Die Abbildung Anhang 1-1 zeigt beispielhaft die EEG-Spektren für REM-Schlaf einer Nacht aus 2011 und einer Nacht aus 2012 desselben Probanden. Eine deutlich verminderte spektrale Leistungsdichte im niederfrequenten Bereich in 2011 gegenüber 2012 ist erkennbar. Ein systematischer Unterschied dieser Art wurde in sämtlichen Probanden gefunden. Aufgrund dieses Ergebnisses musste geschlossen werden, dass es in der Konfiguration der Aufzeichnungsgeräte zwischen den Studienjahren einen Unterschied gab, der sich für 2011 gegenüber 2012 in einer nach höheren Frequenzen verschobenen Hochpassfilter-Kennlinie äußerte. Um diesen Effekt zu quantifizieren, wurde, wie in Abbildung Anhang 1-1 (*unten*) exemplarisch dargestellt, auf der Basis der Differenz in den EEG-Spektren eine Kurve gefittet, die einer Filterkennlinie 1. Ordnung entsprach. Diese Berechnung wurde für die über alle Probanden gemittelten EEG-Spektren wiederholt. Sie ergab für 2011 eine Filterkennlinie mit einer Grenzfrequenz von 0,9 Hz. Diese liegt damit deutlich über der für 2012 angewandten Filterung mit einer Grenzfrequenz von 0,03 Hz.

### Vergleich der EEG-Spektren zwischen NORAH und anderen Studien

Zur Bestätigung, dass die 2011 zur Anwendung gekommene Hochpassfilterung der EEG-Signale von üblichen Standards abwich, während die Daten des Studienjahres 2012 diesen Standards entsprachen und damit korrekt waren, wurden die EEG-Spektren der NORAH-Studie mit denen anderer Studien verglichen. In Abbildung Anhang 1-2 sind EEG-Spektren für REM-Schlaf für NORAH und zwei weitere, unabhängigen Studien gezeigt, zum einen einer früheren Feldstudie des DLR (STRAIN), zum anderen einer Laborstudie der University of Pennsylvania (UPENN Lab Study). Das Spektrum der NORAH-Studie des Jahres 2011 wich von allen anderen Spektren ab und zeigte insbesondere im niederfrequenten Bereich eine markante Absenkung. Dagegen war das Spektrum der NORAH-Studie aus 2012 mit den Spektren der anderen Studien vergleichbar.

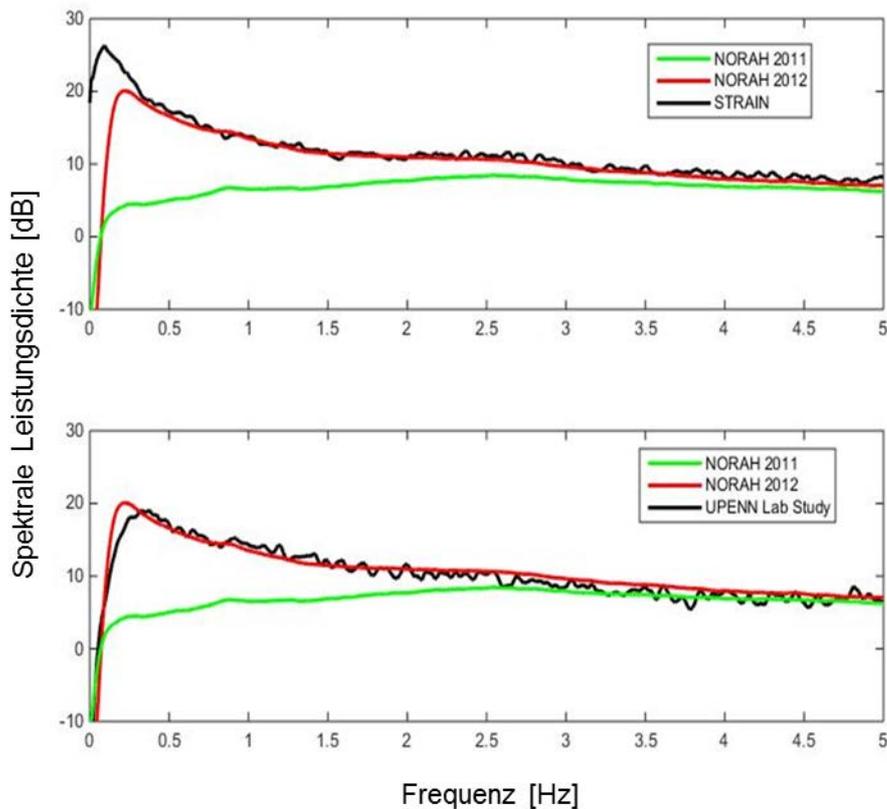


Abbildung Anhang 1-2: Vergleich der EEG-Spektren für REM-Schlaf der Studie NORAH, einer früheren Feldstudie des DLR (STRAIN) und einer Laborstudie (UPENN Lab Study). Gezeigt sind Mittelwerte (NORAH 2011: N=39, NORAH 2012: N=36, STRAIN: N=10, UPENN Lab Study: N=10). Die Spektren für NORAH 2011 weichen deutlich von allen anderen Spektren ab.

### Überprüfung des Einflusses der EEG-Filterung auf die Schlafparameter

Aus den beschriebenen Analysen musste geschlossen werden, dass die aus dem Scoring der PSG-Daten abgeleiteten Schlafparameter nicht ohne weiteres – d.h. ohne weitere Abklärungen – zwischen den Studienjahren vergleichbar sind, da sie durch die unterschiedliche Filterung beeinflusst sein könnten. Um den Einfluss der unterschiedlichen Filterung zu testen, wurde ein Teil der Daten aus 2012 (40 Probanden, 1 Nacht pro Proband) herangezogen. Diese PSG-Rohdaten wurden mit dem für 2011 errechneten Filter (-3 dB bei 0,9 Hz, siehe oben) behandelt und darauf erneut, blind, und von demselben Auswerter gescored. Der Vergleich mit den auf den originalen („ungefilterten“) Daten derselben Nächte basierenden Schlafparameter ist in Tabelle Anhang 1-1 dargestellt.

Tabelle Anhang 1-1: Schlafparameter vor und nach Behandlung der Daten des Studienjahrs 2012 mit einem errechneten EEG-Filter

	Ungefiltert		Gefiltert		p-Wert
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	
Konstante	418,4	27,8	419,8	24,9	0,667
Einschlaflatenz	16,4	14,3	17,0	15,4	0,201
Stadium Wach	54,6	31,9	53,8	28,0	0,667
Stadium S1	10,5	8,0	23,2	18,0	< 0,001
Stadium S2	208,4	33,7	291,2	31,6	< 0,001
Stadium S3	39,0	14,8	18,9	18,3	0,005
Stadium S4	67,1	31,8	3,0	7,4	< 0,001
Stadium REM	93,4	27,0	82,8	23,6	< 0,001

\*Die Werte sind in Minuten angegeben (N=40). p-Werte entstammen t-tests. „Ungefiltert“ bezeichnet hier den Zustand der PSG-Daten, wie sie original aufgezeichnet wurden (-3 dB bei 0,03 Hz). „Gefiltert“ bezeichnet die PSG-Daten im Zustand, wie er nach der Behandlung durch den errechneten Filter (-3 dB bei 0,9 Hz, siehe Text) vorlag.

Die Gesamtschlafdauer (und damit auch die Schlafeffizienz), die Einschlaflatenz und die Dauer im Stadium Wach waren von der Filterung nicht betroffen. Dagegen unterschied sich die jeweilige Dauer in den Stadien S1, S2, S3, S4 und REM signifikant in Abhängigkeit der Filterung. Daraus musste geschlossen werden, dass ein Vergleich dieser Schlafparameter zwischen den beiden Studienjahren, bzw. ein Einbezug derselben in die Exposition-Wirkungsmodelle für Aufwachreaktionen für 2011 nicht zulässig war.

### Überprüfung des Einflusses der EEG-Filterung auf das Stadium Wach mittels Cohen's $\kappa$

Um abzuklären, ob die zeitliche Verteilung der Aufwachvorgänge (d.h. Wechsel ins Stadium Wach) durch die Filterung betroffen war, wurde in einem nächsten Schritt für jede der 40 Nächte aus 2012 die epochenweise Übereinstimmung der Stadien Wach und „Nicht-Wach“ auf der Basis von Cohen's  $\kappa$  berechnet. Nach Absprache mit dem WBQ wurde vorgängig (*a priori*) ein Kriterium festgesetzt, das erfüllt sein musste, damit Stadium Wach für Vergleiche zwischen den Studienjahren und für die Berechnung von Aufwachreaktionen für das Jahr 2011 verwendet werden konnte. Dieses *a priori* Kriterium wurde auf  $\kappa \geq 0,85$  (Mittelwert über alle 40 Nächte) festgesetzt und lag damit eindeutig im Bereich „almost perfect agreement“ nach Landis und Koch (1977). Der gefundene Wert lag bei  $\kappa = 0,86$  (95 %-Konfidenzintervall: 0,82-0,89; Maximum: 0,99, Minimum: 0,48) und erfüllte damit das Kriterium.

Von den 40 individuellen  $\kappa$ -Werten galt für acht Werte  $\kappa < 0,8$ . Als nächstes wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der Nächte mit  $\kappa < 0,8$  auf die mittels

Exposition-Wirkungsmodell berechneten fluglärmassoziierten Aufwachwahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Dazu wurden Regressionsmodelle auf der Basis der Datensätze mit und ohne Probanden mit  $\kappa < 0,8$  berechnet und verglichen. Im ersten Fall gingen 562 Fluglärmereignisse (N=36; 32 Aufwachreaktionen) und im zweiten Fall 487 Fluglärmereignisse (N=28; 31 Aufwachreaktionen) in die Berechnungen ein. In vier von 40 Nächten lagen keine akustischen Aufzeichnungen oder keine ungestörten Fluglärmereignisse vor. In den Regressionsmodellen wurden folgende Variablen verwendet: 1)  $L_{ASmax}$  eines jeweiligen Fluglärmereignisses, 2) Dauer des Fluglärmereignisses, 3) die bisherige Anzahl der Fluglärmereignisse, 4) die verstrichene Schlafdauer, 5) das Alter des Probanden, 6)  $L_{ASeq}$  1 min vor Beginn des Fluglärmereignisses und schließlich die Interaktion von 1) und 6). Die errechneten Schätzer waren für die beiden Datensätze sehr ähnlich, insbesondere für jene Schätzer mit einem p-Wert  $\leq 0,05$  ( $L_{ASmax}$ : 0,274 (N=36) versus 0,267 (N=28 mit  $\kappa > 0,8$ ); verstrichene Schlafdauer: 0,002 (N=36) versus 0,002 (N=28 mit  $\kappa > 0,8$ )).

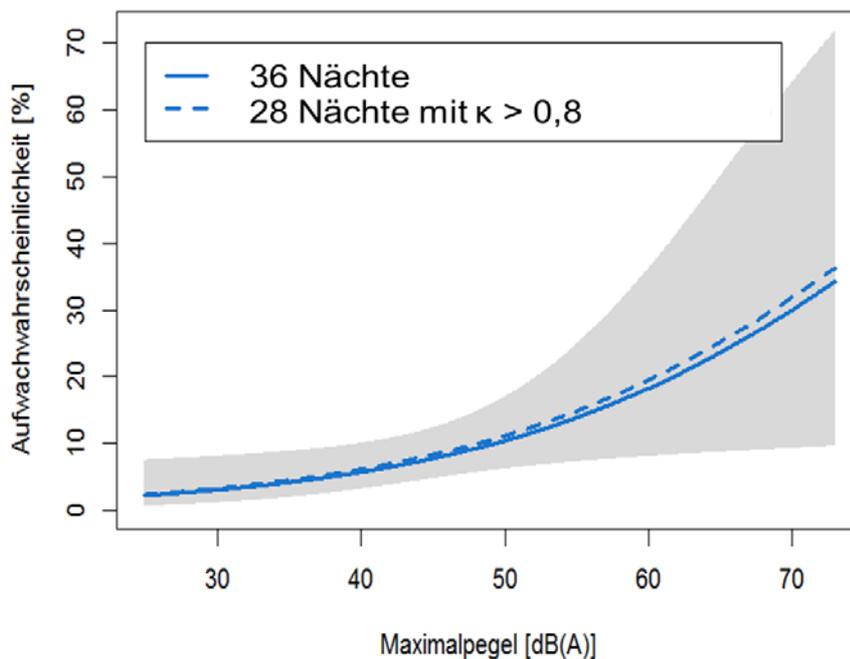


Abbildung Anhang 1-3: Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen maximalem Schalldruckpegel eines Fluglärmereignisses und der Aufwachwahrscheinlichkeit, dargestellt für 2 Gruppen von Nächten aus dem Studienjahr 2012, für die die Übereinstimmung der Wachdauer vor und nach EEG-Filterung gemessen an Cohen's  $\kappa$  unterschiedlich hoch war. Für die Darstellung wurden folgende Werte (Mediane) für die Variablen verwendet: Dauer des Fluglärmereignisses: 68 s, bisherige Anzahl der Fluglärmereignisse: 19, Schlafdauer: 407 min, Alter: 43 Jahre,  $L_{ASeq}$  1 min vor Beginn des Fluglärmereignisses: 29 dB(A). Graue Fläche entspricht dem 95 %-Konfidenzintervall (36 Nächte). Der maximale Unterschied zwischen den Kurven war 2 % bei 73 dB(A).

Eine grafische Darstellung der Expositions-Wirkungsbeziehung für die beiden Datensätze ist in Abbildung Anhang 1-3 dargestellt. Sie zeigt, dass die beiden Kurven nahe beieinander liegen, mit einem maximalen Unterschied von 2 % bei 73 dB(A). Aufgrund der Sensitivitätsanalyse konnte gefolgert werden, dass der Einfluss der Nächte, für die die Übereinstimmung des Stadiums Wach vor

und nach der EEG-Filterung unter 0,8 lag, auf die Expositions-Wirkungsbeziehung gering war.

## Fazit

Im Rahmen der Datenerfassung der Studie NORAH ist es zu einem Unterschied in der PSG-Hardware gekommen, der sich für das Studienjahr 2011 gegenüber dem Jahr 2012 in einer markant höheren Hochpassfilterung der EEG-Signale äußerte. Da der Unterschied auf die Hardware bei der Datenerfassung eingegrenzt werden konnte, war er im Nachhinein nicht mehr durch Software-Maßnahmen korrigierbar. Dieser Unterschied hatte Auswirkungen auf das Schlafstadien-Scoring, insbesondere auf die jeweilig verbrachte Dauer in den Stadien S1, S2, S3, S4 und REM. Daraus musste geschlossen werden, dass diese Schlafparameter für das Studienjahr 2011 nicht in die Auswertung miteinbezogen werden konnten. In einer Reihe von Analysen konnte dagegen gezeigt werden, dass die Gesamtschlafdauer, die Schlafeffizienz, die Einschlaf latenz und die Dauer im Stadium Wach von der unterschiedlichen EEG-Filterung nicht betroffen war. Damit konnten diese vier Schlafparameter für die Auswertung verwendet werden, insbesondere für einen Längsschnittvergleich der Studienjahre 2011 und 2012 einschließlich der Berechnung der Expositions-Wirkungsbeziehung für fluglärmassozierte Aufwachreaktionen (Übergänge in das Stadium Wach). Ein Vergleich auf der Basis von EEG-Spektren mit früheren Studien bestätigte schließlich, dass die im Jahr 2012 zur Anwendung kommende Hochpassfilterung den typischen Standards entsprach, und dass sämtliche Schlafparameter aus diesem Jahr deshalb für die Auswertung verwendet werden konnten.