



Gesamtstellungnahme des WBQ zur NORAH-Studie - Modul 2.3 (Schlafstudie)

Schriftleitung: Prof. Dr. Barbara Griefahn; PD Dr. Mark Brink

Auswirkungen von Fluglärm auf den nächtlichen Schlaf

Autoren der Projektbearbeitung:

Uwe Müller
Daniel Aeschbach
Eva-Maria Elmenhorst
Alex Hoff
Franco Mendolia
Julia Quehl
Iris Rieger
Stefan Schmitt
Wilma Littel

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin

Inhalt

1	Überblick	3
1.1	Überblick über den Forschungsbericht	3
1.2	Übersicht über den Anhang	10
2	Gesamteindruck	11
3	Einzelaspekte	12
3.1	Aufbau und Gestaltung des Berichts, Leserführung	12
3.2	Nachvollziehbarkeit, Plausibilität und Konsistenz der zentralen Annahmen (Hypothesenbildung)	12
3.3	Bewertung der eingesetzten Methoden insgesamt und der gewählten Vorgehensweise zur Gebietsauswahl und Probandengewinnung	13
3.4	Umgang mit Problemen	14
3.5	Prüfung und Bewertung der Vollständigkeit und Qualität	14
3.6	Einschätzung der diskutierten Ergebnisse und deren Einordnung sowie der getroffenen Schlussfolgerungen	15
4	Empfehlung des WBQ	15

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.

1 Überblick

1.1 Überblick über den Forschungsbericht

Der Forschungsbericht zum NORAH Modul 2.3 umfasst 191 Seiten. Er besteht aus einem Haupt- bzw. Berichtsteil mit 4 Kapiteln, dem sich ein Literaturverzeichnis, ein Tabellenverzeichnis, ein Abbildungsverzeichnis und ein Anhang anschließen. Dem Berichtsteil vorangestellt sind eine Zusammenfassung in deutscher und in englischer Sprache sowie ein Inhaltsverzeichnis und ein Glossar.

Berichtsteil: Der Berichtsteil beginnt mit **Kapitel 1** ‚Einleitung‘ (Seite 18 - 31), untergliedert in „Hintergrund“, „Lärm und Schlaf“, „Auswirkungen veränderter Lärmexposition auf das Schlafverhalten“, „Vegetativ-motorische Reaktionen“, „Subjektive Reaktionen“ und „Hypothesen“.

Nach einer kurzen Einführung in die Bedeutung des ungestörten Schlafs gehen die Autoren auf den zentralen Aspekt ihrer Untersuchung, auf die Problematik der durch Fluglärm verursachten Schlafstörungen und deren mögliche langfristige Folgen ein. Orientiert an den Zielen der Studie erfolgt die adäquate Aufarbeitung der einschlägigen Literatur. Es werden zunächst die unmittelbar während des Schlafs durch Lärmeinwirkungen ausgelösten physiologischen und mit der Polysomnografie (PSG) objektivierbaren Änderungen des Schlafverhaltens dargestellt. Daran schließt sich die kurze Begründung für die Messung vegetativ-motorischer Reaktionen zur Detektion von Aufwachreaktionen anstelle der aufwändigen elektrophysiologischen Messungen an. Schließlich werden die subjektiven Reaktionen mit der gebotenen Gründlichkeit dargestellt. Aus diesen Ausführungen werden schließlich die Hypothesen abgeleitet.

Für die physiologischen Untersuchungen des Schlafverhaltens werden die folgenden Hypothesen formuliert:

- Die zeitliche Bündelung der Flugbewegungen in den Randstunden¹ infolge der Einführung der Kernruhezeit (23-05 Uhr) bewirkt einen Anstieg akuter Schlafstörungen, d.h. eine Beeinträchtigung des Einschlafens vor Beginn der Kernruhezeit sowie ein häufiges und verfrühtes Aufwachen nach ihrer Beendigung. Über die gesamte Schlafdauer tritt aber eine Verbesserung des Schlafs im Vergleich zum Jahr 2011 mit durchgehendem nächtlichen Flugbetrieb ein.
- Das am Flughafen Köln/Bonn vom DLR in einer früheren Studie ermittelte Schlafverhalten und die Expositions-Wirkungskurven zur Vorhersage fluglärmbedingten Aufwachens sind

¹ So die Ausgangsannahme zu Beginn der Untersuchung.

eher auf die Situation am Frankfurter Flughafen mit durchgehendem Nachtflugbetrieb (2011) übertragbar als auf die Situation nach Einführung der Kernruhezeit (2012, 2013).

- Anwohner, die der Eröffnung der neuen Landebahn positiv gegenüberstehen, reagieren physiologisch weniger stark auf Fluglärm als Anwohner mit einer negativen Einstellung.
- Mit einer zeitlichen Verzögerung setzen Gewöhnungsprozesse ein, so dass sich die Häufigkeit der Aufwachreaktionen in den Randstunden an die Expositions-Wirkungsbeziehung aus der Basiserhebung (d.h. den Zustand vor Eröffnung der NW-Landebahn) angleicht.

Für die subjektiven, unmittelbar nach dem Aufstehen erfragten Reaktionen werden die nachstehenden Hypothesen abgeleitet:

- Mit zunehmendem nächtlichen Fluglärm nehmen subjektive Schlafstörungen, indiziert durch abnehmende Schlaferholung, zunehmende subjektive Aufwachhäufigkeit, erhöhte Müdigkeit und Schläfrigkeit am Morgen sowie die akute durch den nächtlichen Flugbetrieb verursachte Belästigung zu.
- Die Einführung der Kernruhezeit bringt – über die gesamte Schlafzeit gesehen – eine Verbesserung der Schlafbewertung im Vergleich zur Basiserhebung im Jahr 2011 mit sich.
- Die Einführung der Kernruhezeit mit verstärktem Flugbetrieb in den Randstunden bewirkt eine Überschussreaktion bezüglich der genannten subjektiven Sekundärreaktionen.

Kapitel 2 ‚Material und Methoden‘ ist mit 56 Seiten (Seite 32-88) sehr umfangreich, wobei die Beschreibung der Stichprobe, die Darstellung der akustischen Situation und die Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Messung vegetativ-motorischer Reaktionen (VMR) den größten Raum einnehmen. Darüber hinaus werden ausgewählte Parameter und Verfahren an mehreren Stellen begründet. Das Kapitel ist in folgende Abschnitte unterteilt:

Beschreibung der Probandenauswahl. In diesem Abschnitt wird detailliert dargestellt, wie die Probanden rekrutiert wurden und wie die Kontaktaufnahme und die Auswahl erfolgten. Es wird ein detaillierter Kriterienkatalog für die Probandenauswahl präsentiert und begründet. Dazu wurden von den potenziellen Probanden mehrere Fragebögen, insbesondere zur Gesundheit und zum habituellen Schlafverhalten ausgefüllt, und es wurden in den beiden ersten Jahren das Schlafverhalten und die akustische Situation bei den potenziellen Probanden zu Hause durch Probemessungen während einer Nacht erfasst. Getrennt für die drei Untersuchungsjahre wird der Ausfall an Probanden in übersichtlicher Form dargestellt.

Untersuchungsablauf. Dieser Abschnitt gibt einen groben Überblick über den technischen Ablauf der Untersuchungen vor Ort.

Untersuchte Stichprobe. Dieser Abschnitt ist mit insgesamt 16 Seiten sehr umfangreich. Zur Beschreibung der Stichproben präsentieren die Autoren, getrennt für die drei Untersuchungsjahre (2011, 2012, 2013) grafisch dargestellte Häufigkeitsverteilungen für die Variablen Ge-

schlecht (Frauen beteiligten sich etwas häufiger), Alter (am häufigsten sind die Altersklassen 20-30 und 40-50 Jahre), Anzahl Personen im Haushalt, Erwerbstätigkeit, höchster erreichter Schulabschluss, höchster Ausbildungsabschluss, monatliches Haushaltsnettoeinkommen, Haus- und Wohnungstyp, präferierte politische Partei, Scheuch-Winkler-Index (SWI), Chronotyp, subjektive Lärmempfindlichkeit, Zufriedenheit mit der Lautstärke im Wohngebiet, Lärmbe-
lästigung vor der Studie, Gewöhnung an Fluglärm, Einstellung zum Flugverkehr, Chancen, et-
was erfolgreich gegen Fluglärm zu unternehmen, Teilnahme an Aktivitäten gegen den Fluglärm.

Wenig nachvollziehbar sind die Dokumentation der präferierten Partei und die ausführliche Be-
schreibung zur Erfassung und Berechnung des SWI, zumal diese Variablen in den präsentier-
ten Auswertungen nicht zur Erklärung des Schlafverhaltens oder der Reaktion auf Fluglärm
herangezogen werden.

Die nachfolgend genannten Variablen werden zur Kategorisierung und vor allem als Prädiktoren
bei der Bildung von Expositions-Wirkungsmodellen genutzt: Geschlecht, Alter, Lärmempfind-
lichkeit, Vorbelastung durch Lärm, Gewöhnung an Fluglärm, Belastungsänderung, Lautstär-
keempfinden in der Wohngegend, Chronotyp, Einstellung zum Flugverkehr, Bewertung der
Notwendigkeit des Flugverkehrs.

Akustik. Auf insgesamt 15 Seiten wird berichtet, mit welchen Schallpegelmessern im Schlaf-
raum der Schalldruckpegel sowie die jeweiligen energieäquivalenten Dauerschallpegel aufge-
zeichnet wurden, womit die Geräte kalibriert und wie sie vom Untersucher oder per Timerfunktio-
n gestartet und gestoppt wurden und dass in den Jahren 2011 und 2012 in jeweils einer Nacht
Probemessungen durchgeführt wurden. Es wird berichtet, welche Software eingesetzt wurde,
dass die Aufzeichnungen abgehört und dass ein Mitarbeiter die einzelnen Geräusche identifi-
ziert hat, deren Beginn und Ende markiert hat und Überlagerungen durch andere Geräusche
mit einem Kommentar versah.

Danach werden, jeweils getrennt für 2011, 2012 und 2013, Häufigkeitsverteilungen für die
stündliche Anzahl der Flugbewegungen, der Maximalpegel, der Geräuschdauern, der Einzel-
Ereignispegel, der energieäquivalenten Dauerschallpegel der Überflüge, der Pegelanstiegs-
steilheiten ‚ungestörter‘ Fluggeräusche und die energieäquivalenten Dauerschallpegel der Ge-
samtnächte präsentiert.

Polysomnografie. In den Jahren 2011 und 2012 wurde das Schlafverhalten mit Hilfe der Poly-
somnografie erfasst. Dies ist sicherlich das aufwändigste aber beste Verfahren zur Messung
und Bewertung des Schlafs. Es wird erläutert, wie die Hirnströme, die Augenbewegungen und
der Muskeltonus abgeleitet wurden und welche Kriterien bei der Auswertung angelegt und wel-
che Kennwerte aus diesen Daten extrahiert wurden.

Weiterentwicklung einer einfachen Methodik zur Messung vegetativ-motorischer Reaktionen.
Ein Ziel der Untersuchungen in diesem NORAH-Modul war es, die mit der Aufzeichnung und
Auswertung des Polysomnogramms verbundenen hohen Kosten durch die Aufzeichnung eines

auf vegetativen Reaktionen basierenden Verfahrens zu reduzieren. Ein solches vereinfachtes Verfahren, das die Aufzeichnung des Elektrokardiogramms (EKG) und der Körperbewegungen (Aktigrafie) erfordert und somit vegetativ-motorische Reaktionen erfasst, sollte die Detektion von Aufwachreaktionen ermöglichen. Deshalb sollte ein solches, ursprünglich von Basner et al. entwickeltes Verfahren im Rahmen der NORAH-Studie, unterstützt durch Mathias Basner, University of Pennsylvania, weiterentwickelt und validiert werden. Das Verfahren wird im Bericht als ‚Vegetativ-Motorische Methode‘ (VMM) bezeichnet, die entsprechenden Reaktionen als ‚Vegetativ-Motorische Reaktionen‘ (VMR).

Zur Entwicklung eines geeigneten Algorithmus und dessen Validierung dienten die im Rahmen der NORAH-Studie in den Jahren 2011 und 2012 aufgezeichneten PSG-Datensätze.

Es folgt die Beschreibung des Algorithmus, der die Detektion von wahrscheinlich mit dem Aufwachen assoziierten Änderungen der Herzschlagfrequenz ermöglicht. Sodann wird das Übereinstimmungsmaß Cohens Kappa erläutert und die Übereinstimmung zwischen EKG-Arousals und EEG-Wachphasen errechnet. Sowohl für die 2011 als auch die 2012 erhobenen Daten ergaben sich nahezu perfekte Übereinstimmungen zwischen der vereinfachten Methodik und der PSG.

Subjektive Reaktionen: verwendete Fragebögen und Skalen. Hier werden die Verfahren (Fragebogen und Skalen) erläutert, die in der Untersuchung eingesetzt wurden. Dabei handelt es sich ausnahmslos um erprobte und validierte Instrumente zur Erfassung von Schlaf erleben, Belästigung, Müdigkeit, Schläfrigkeit und akuter Belästigung am Morgen unmittelbar nach dem Aufstehen. Es ist hervorzuheben, dass die Autoren auch den Unterschied zwischen Müdigkeit und Schläfrigkeit erklären, zumal diese Begriffe fälschlicherweise sehr häufig als Synonyme verwendet werden.

Darüber hinaus wurden mehrere für die Untersuchung relevante personenbezogene und psychologische Einflussgrößen mit geeigneten Erhebungsinstrumenten erfasst (Lärmempfindlichkeit, 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 Laustärkeempfinden in der eigenen Wohngegend, Zufriedenheit mit der Lautstärke in der eigenen Wohngegend).

Statistische Verfahren. In diesem Abschnitt wird zunächst auf technische Probleme bei der Aufzeichnung des Schlafs im Untersuchungsjahr 2011 hingewiesen, die dazu führten, dass für die gesamten EEG-Daten aus 2011 keine Schlaftiefenanalysen möglich waren (die Fehleranalyse ist im Anhang detailliert dargestellt). Die Aufzeichnungen erlauben aber eine zuverlässige Bestimmung des Wechsels vom Schlaf- in den Wachzustand (W), also einer Aufwachreaktion, nicht aber – wie in den bisherigen Untersuchungen des DLR – in das sehr leichte Schlafstadium S1. Deshalb wird das Aufwachen in 2011 allein als Erreichen des Wachstadiums W definiert. Entsprechendes gilt für die Aufzeichnungen im Jahr 2012 für Vergleiche mit den 2011 aufge-

zeichneten Daten. Für Vergleiche zwischen den 2012 und den am Köln/Bonner Flughafen aufgezeichneten Daten einer früheren Studie des DLR umfasst die Definition einer Aufwachreaktion das Erreichen des Wachstadiums *oder* des Schlafstadiums S1. Zudem können hier alle Schlafstadien in die vergleichende Betrachtung eingehen.

Unter der Überschrift ‚ereigniskorrelierte Auswertung‘ wird erläutert, wie fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen definiert und detektiert wurden und es wird erklärt, warum die erste aufgezeichnete Nacht in den Analysen nicht berücksichtigt wurde.

Es werden sodann die angewandten statistischen Verfahren, vor allem die multivariablen Regressionsanalysen beschrieben und es werden die akustischen, personenbezogenen und situativen Parameter aufgelistet, die bei der Modellierung der Reaktionen berücksichtigt wurden.

Das **Kapitel 3** ‚Ergebnisse‘ (Seite 89-149) ist unterteilt in ‚Physiologische Untersuchungen des Schlafs‘ (Seite 89-120) und ‚Subjektive Reaktionen‘ (Seite 121-149).

Die wesentlichen Ergebnisse der elektrophysiologischen Untersuchung umfassen folgende Aspekte:

Spontane Aufwachwahrscheinlichkeit. In der Literatur wird wiederholt die Frage der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit diskutiert, d.h. wie oft der Mensch in einer ungestörten Nacht aufgewacht wäre und ob bzw. wie diese Wachphasen korrekterweise von den fluglärminduzierten Wachphasen subtrahiert werden müssten. Die spontane Aufwachhäufigkeit lässt sich bei Flughafenwohnern naturgemäß nicht ohne weiteres bestimmen, weil es hier keine Ruhenächte gibt. Die Autoren schlagen zwei Vorgehensweisen vor, mit denen sie die relative Häufigkeit für spontanes Aufwachen auf 6.9 % bzw. 9.3 % schätzen.

Auswirkungen der Kernruhezeit. Es war erwartet worden, dass sich die Einführung der Kernruhezeit insgesamt positiv auf das Schlafverhalten auswirkt, dass aber durchaus Verschlechterungen bei Personen möglich sind, die vor Beginn der Kernruhezeit ins Bett gehen bzw. bei solchen, die erst nach Ende der Kernruhezeit aufstehen. Daher wurde das Schlafverhalten der 2011 untersuchten Probanden mit durchgehendem Nachtflugverkehr verglichen mit dem Schlafverhalten zweier durch unterschiedliche „Bettzeiten“ charakterisierten ‚Bettzeitgruppen‘, deren Schlaf 2012 unter den Bedingungen der Kernruhezeit aufgezeichnet wurde. Bettzeitgruppe 1 entspricht den schon 2011 untersuchten Probanden. Sie gehen vor dem Einsetzen der Kernruhezeit ins Bett, sind also zu Beginn des Schlafs und kurze Zeit vor dem Aufstehen am Morgen durch Fluglärm belastet. Die Probanden der Bettzeitgruppe 2 gehen erst nach Einsetzen der Kernruhezeit ins Bett, sind aber in den frühen Morgenstunden 2 bis 2,5 Stunden dem Fluglärm ausgesetzt.

Die Aufwachhäufigkeit war insgesamt – abhängig von der Anzahl der Überflüge – bei Fröhschläfern 2012 signifikant geringer als 2011 und auch geringer als bei Spätschläfern in 2012. Die auf einzelne Überflüge bezogene Aufwachwahrscheinlichkeit ergab jedoch keinen Unter-

schied zwischen den Jahren und Gruppen. Dasselbe galt für die Gesamtschlafdauer, die Einschlaflatenz, die Schlafeffizienz, das verfrühte Aufwachen und die Wachdauer in den letzten Stunden vor dem Aufstehen.

Die durch Fluglärm bedingte Aufwachwahrscheinlichkeit in den Jahren 2011 und 2012 wurde unter Berücksichtigung akustischer Determinanten, des Geschlechts, des Alters und der bis dahin verstrichenen Schlafzeit modelliert. Einen signifikanten Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit hatten Maximalpegel, Geräuschkdauer, Anzahl vorausgegangener Fluglärmereignisse, verstrichene Schlafdauer und das Alter der Probanden. Die Expositions-Wirkungskurven der Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel der 2012 untersuchten Bettzeitgruppen 1 und 2 unterschieden sich nicht.

Vergleich des Schlafverhaltens der Anwohner des Frankfurter und des Köln/Bonner Flughafens. Die beiden 2012 untersuchten Bettzeitgruppen wurden mit den 2001 untersuchten Anwohnern des Flughafens Köln/Bonn verglichen. Letztere hatten mehr Überflüge, wachten häufiger auf, hatten eine kürzere Gesamtschlafzeit, eine längere Einschlafdauer, eine stärkere Fragmentierung des Schlafs und eine geringere Schlafeffizienz sowie weniger Tiefschlaf. Die Expositions-Wirkungskurven für die Aufwachwahrscheinlichkeiten in beiden Untersuchungen zeigen einen signifikanten Einfluss des Maximalpegels, der verstrichenen Schlafdauer, des Tief- und des REM-Schlafs und des Hintergrundpegels (im Schlafzimmer) unmittelbar vor dem Fluglärmereignis. Die Kurve liegt für die Köln/Bonner Flughafenrainer aber deutlich höher als für die Flughafenrainer in Frankfurt.

Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung des Flugverkehrs und Störungen des Schlafs. Wie vermutet zeigen die Analysen, dass eine negative Einstellung zum Flugverkehr mit physiologisch messbar längerer Einschlafdauer, geringerer Schlafeffizienz, längeren Wachdauern und einer kürzeren Tiefschlafdauer assoziiert ist.

Längsschnittvergleich der Jahre 2011, 2012, und 2013 mittels vegetativ-motorischer Methode. Die Expositions-Wirkungskurven ergaben einen nahezu deckungsgleichen Verlauf in den Jahren 2011 und 2013, im Jahr 2012 lag die Kurve signifikant darüber. Dies scheint kein zufälliges Ergebnis zu sein, da sich diese Verhältnisse in beiden nach Bettzeiten gruppierten Personen zeigten.

Explorative Analyse der Unterschiede in den Expositions-Wirkungsbeziehungen der Polysomnografie im Vergleich zur vegetativ-motorischen Methode. Der Vergleich der Expositions-Wirkungskurven zeigte eine signifikant höhere Wahrscheinlichkeit für vegetativ-motorische Reaktionen als für Aufwachreaktionen. Die Autoren versuchen mögliche Ursachen hierfür durch methodenkritische Betrachtungen einzugrenzen, was in diesem Kapitel ‚Ergebnisse‘ etwas deplatziert wirkt.

Das Unterkapitel ‚Subjektive Reaktionen‘ enthält folgende Abschnitte:

Deskriptive Statistik. In diesem Abschnitt wird die Häufigkeit morgens erinnerter Wachphasen dargestellt sowie – getrennt für die drei Untersuchungsjahre – die morgens empfundene Schläfrigkeit, die Müdigkeit und die subjektive Schlafbewertung, die keine substanziellen Unterschiede zwischen den einzelnen Messzeitpunkten erkennen lassen.

Schlafbezogene Expositions-Wirkungskurven 2011, 2012 und 2013. In diesem Abschnitt wird, getrennt für die 3 Untersuchungsjahre, mit geeigneten multivariablen Regressionsmodellen der Einfluss der Fluglärmbelastung, indiziert durch die Anzahl der Überflüge und den Mittelungspegel (L_{Aeq}) unter Berücksichtigung möglicher Moderatoren auf Schläfrigkeit, Müdigkeit und subjektive Schlafbewertung errechnet. Die Autoren geben im Bericht (sinnvollerweise) aber nur die signifikanten Einflüsse wieder. Für 2011 hatte die Anzahl der Überflüge einen signifikanten Einfluss auf die Schläfrigkeit, wobei das Lautstärkeempfinden in der Wohngegend und der Chronotyp (die subjektive, mit physiologischen Parametern korrelierende Morgenorientierung) eine Rolle spielten. 2012 war die Anzahl der Überflüge für die Schlaferholung von Bedeutung. Auch hier hatte der Chronotyp einen Einfluss. Der äquivalente Dauerschallpegel hatte in den 2013 erhobenen Daten Einfluss auf die Schläfrigkeit, wobei auch hier der Chronotyp von Bedeutung war.

Ergebnisse zur akuten Belästigung durch Fluglärm in der Nacht. Bezogen auf die vorausgegangene Nacht waren ca. 70 % der Probanden nicht oder nur wenig belästigt. Der Expositions-Wirkungsbeziehung zufolge wird die akute Belästigung sowohl durch den Mittelungspegel als auch durch die Anzahl der Überflüge beeinflusst. Als bedeutsame Prädiktoren erwiesen sich das Lautstärkeempfinden in der Wohngegend, die Gewöhnung an Fluglärm und die Vorbelastigung (vor Studienbeginn).

Die akute Belästigung war 2001 auch bei Anrainern des Flughafens Köln/Bonn ermittelt worden und erlaubte entsprechende Vergleiche. Für beide Kollektive wurde die Belästigung durch die Anzahl der Überflüge und durch den L_{Aeq} erklärt, wobei Gewöhnung, Vorbelastigung und Alter einen signifikanten Einfluss hatten. Die Belästigungskurven der Frankfurter Flughafenanrainer (Abb. 3-47 und 3-48) liegen jedoch deutlich über denjenigen der Köln/Bonner Flughafenanrainer. Die Frankfurter Stichprobe war also bei gleichem Pegel stärker belästigt.

Längsschnittanalysen 2011 bis 2013. Obwohl die schlafbezogenen Variablen (Müdigkeit und Schläfrigkeit) über die drei Untersuchungsjahre insgesamt zunahmen, war dieser Anstieg unabhängig von der Lärmbelastung in der Nacht (Anzahl der Überflüge, äquivalenter Dauerschallpegel). Die in den drei Untersuchungsjahren erfassten Variablen ‚Einstellung zum Flugverkehr‘, ‚Zufriedenheit mit der Lautstärke des Flugverkehrs‘, ‚Einschätzung der Schädigung der Gesundheit durch Fluglärm‘ änderten sich im Verlauf der drei Jahre nicht. Anhand der vorliegenden Daten war es den Autoren schlussendlich nicht möglich, die Annahme eines Überschusseffekts im Hinblick auf die akute Belästigung zu verifizieren.

Im **Kapitel 4** ‚Zusammenfassung und Diskussion‘ (Seite 150-159) werden, getrennt für die physiologischen und subjektiven Reaktionen – orientiert an den vorab formulierten Hypothesen – die erzielten Ergebnisse im Wesentlichen übersichtlich zusammengefasst. Mit der für wissenschaftliche Untersuchungen üblichen Diskussion anhand der Literatur sind die Autoren eher zurückhaltend, was damit zusammenhängen mag, dass sich mehrere Diskussionsteile bereits im Ergebnis- und sogar im Methodenkapitel finden.

1.2 Übersicht über den Anhang

In Anhang 1 („Technische Probleme mit der Polysomnografie in 2011 und daraus abgeleitete Konsequenzen für die Datenauswertung“) wird zunächst erläutert, dass die Auswertung der Polysomnogramme der aus 2011 und aus 2012 stammenden Aufzeichnungen Unterschiede bezüglich der Schlafstadienverteilung ergaben, die in dieser Höhe nicht erwartet worden waren und möglicherweise auf Fehler bei der Aufzeichnung und/oder der Auswertung der Polysomnogramme zurückzuführen sind.

Zur Klärung des Sachverhalts wurde vom Studienteam eine systematische Analyse aller bei der Aufzeichnung und Auswertung des Polysomnogramms anfallenden Schritte vorgenommen. Dazu wurden die Polysomnogramme neu ausgewertet und die Offline-Verarbeitung der EEG-Signale (Einstellung des Hochpassfilters) sowie der Hardware-basierten EEG-Filterungen überprüft. Letztere ergab für 2011 eine Filterkennlinie mit einer Grenzfrequenz von 0,9 Hz, die damit deutlich über der für 2012 angewandten Filterung mit einer Grenzfrequenz von 0,03 Hz liegt.

Durch Vergleich der EEG-Spektren zwischen NORAH und anderen Studien ergab sich, dass nur für 2011, nicht aber für 2012, eine falsche Filtereinstellung bei den PSG-Aufzeichnungsgeräten vorlag.

In der Folge wurde der Einfluss der EEG-Filterung auf die Schlafstadienverteilungen geprüft. Dabei zeigte sich, dass alle Dauern in den gescorten Schlafstadien (S1 - S4 und REM) signifikant verändert waren. Lediglich das Wachstadium wurde reliabel erfasst. Das Auftreten der Wachphasen wurde zudem mittels des Übereinstimmungsmaßes Cohen's Kappa geprüft. Aufgrund dieser Analyse konnten aus den 2011 aufgezeichneten Polysomnogrammen die Gesamtschlafdauer, die Schlafeffizienz, die Einschlaf latenz und die Dauer im Stadium Wach für die Auswertung, insbesondere für einen Längsschnittvergleich der Studienjahre 2011 und 2012 einschließlich der Berechnung der Expositions-Wirkungsbeziehung für fluglärmassoziierte Aufwachreaktionen (Übergänge ins Stadium Wach) verwendet werden.

2 Gesamteindruck

Modul 2.3 der NORAH-Studie ist die derzeit größte Untersuchung zu Fluglärmwirkungen auf den Schlaf, an der insgesamt 202 Anrainer des Flughafens Frankfurt am Main teilnahmen. Eine repräsentative Abbildung der Grundgesamtheit durch die untersuchte Stichprobe war nicht möglich und von vornherein auch nicht vorgesehen. In den Jahren 2011 und 2012 wurde das Schlafverhalten mittels der aufwändigen Methode der Polysomnografie gemessen. Aus den daraus abgeleiteten mit Fluglärm assoziierten Aufwachreaktionen wurden maximalpegelabhängige Wahrscheinlichkeiten für fluglärmbedingtes Aufwachen statistisch modelliert, wobei der Einfluss mehrerer akustischer, individueller und situativer Variablen berücksichtigt wurde. Im Jahr 2013 wurde statt der Polysomnografie erstmals eine vegetativ-motorische Methode eingesetzt, deren Validität mit den 2011 und 2012 erhobenen Daten überprüft worden war. Mit dem Verfahren werden fluglärminduzierte Beschleunigungen der Herzschlagfrequenz gemessen. Die maximalpegelabhängige Wahrscheinlichkeit dieser vegetativen Reaktionen ist höher als die der Aufwachreaktionen, verläuft aber parallel zu dieser.

Die morgens erfassten subjektiven Bewertungen des Schlafs (Schläfrigkeit, Müdigkeit, Schlaferholung) waren nicht eindeutig mit der nächtlichen Belastung durch Fluglärm assoziiert, wohl aber die akute, leider nur 2013 morgens angegebene Belästigung durch den nächtlichen Fluglärm.

Die Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit, mit welcher in der Studie vorgegangen wurde, ist als sehr hoch zu bezeichnen, und sie wird insbesondere deutlich im Umgang der Autoren mit dem Problem der fehlerhaften, in der Hardware begründeten Datenaufzeichnung im ersten Untersuchungsjahr (2011).

Wesentliche Erkenntnisse aus der NORAH-Schlafstudie sind durchaus neu:

Effekt der Einführung der Kernruhezeit. Die Aufwachhäufigkeit insgesamt war – abhängig von der Anzahl der Überflüge – bei Frühschläfern im Jahr 2012 signifikant geringer als 2011 und geringer als bei Spätschläfern in 2012, während – und dies war nicht erwartet worden – fluglärmassoziiertes Aufwachen, Gesamtschlafdauer, Einschlaf latenz, Schlafeffizienz, verfrühtes Aufwachen und die Wachzeit in den letzten Stunden vor dem Aufstehen keinen Unterschied zwischen den Jahren und den durch unterschiedliche Bettzeiten differenzierten Gruppen ergab. Auf Frühschläfer, die am Ende der Nacht nur wenig fluglärmexponiert sind, hat die Einführung der Kernruhezeit also durchaus einen positiven Effekt.

Vergleich des Schlafverhaltens der Anwohner des Frankfurter und des Köln/Bonner Flughafens. Der beispielhafte Vergleich mit den 2001 untersuchten Anwohnern des Flughafens Köln/Bonn legt nahe, dass die bei Anrainern eines Flughafens ermittelten Expositions-Wirkungskurven für Aufwachwahrscheinlichkeit nicht auf andere Flughäfen übertragen werden können. Die Unterschiede sind, wie etwa der in den Regressionsanalysen aufgezeigte Einfluss des Maximalpe-

gels, der Anzahl der Überflüge, der verstrichenen Schlafdauer und des Mittelungspegels unmittelbar vor dem Fluglärmereignis zeigt, abhängig von individuellen akustischen Szenarien an den entsprechenden Flughäfen.

Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung des Flugverkehrs und Störungen des Schlafs. In der Literatur gibt es Hinweise darauf, dass Personen, die einem Flughafen und den Änderungen des Flugbetriebs eher positiv gegenüberstehen, physiologisch weniger stark auf Fluglärm reagieren. Dies konnte mit dieser Deutlichkeit (längere Einschlaf- und Wachdauer, geringere Schlafeffizienz und geringere Tiefschlafdauer) erstmals in der NORAH-Schlafstudie bestätigt werden, ein Befund, aus dem sich durchaus Maßnahmen zum Schutz von Flughafenanrainern ableiten lassen.

Längsschnittanalysen, d.h. die vergleichende Betrachtung mehrerer aufeinander folgender Jahre erlauben es, Gewöhnungsprozesse und bei Interventionen, wie der Einführung der Kernruhezeit, Überschussreaktionen zu erkennen. Die für die vegetativ-motorischen Körperreaktionen errechneten Expositions-Wirkungskurven schließen das Auftreten eines Überschusseffekts mit nachfolgender Gewöhnung nicht aus.

3 Einzelaspekte

3.1 Aufbau und Gestaltung des Berichts, Leserführung

Die Untersuchungen im NORAH Modul 2.3 sind in einem logisch konsistenten und vollständigen Bericht beschrieben. Der Bericht beginnt mit einer etwas zu lang (4 Seiten) geratenen Zusammenfassung, die jedoch gut wiedergibt, welche Methoden in der Studie eingesetzt wurden und welche Ergebnisse sich aus der Studie insgesamt ergaben. Die Autoren gehen offenbar davon aus, dass der größte Teil der interessierten Leser nur den NORAH-Gesamtbericht (über alle Module) lesen wird und möchten diesen mit einer ausführlichen Kurzfassung die Möglichkeit geben, sich auf vier Seiten ein halbwegs umfassendes Bild von der Schlafstudie zu machen.

Mit 191 Seiten, damit einhergehend einer konzisen Beschreibung der untersuchten Sachverhalte, ist der Bericht auch in seiner Länge gut lesbar und wirkt nicht mit Detailangaben überfrachtet.

3.2 Nachvollziehbarkeit, Plausibilität und Konsistenz der zentralen Annahmen (Hypothesenbildung)

Die NORAH-Schlafstudie ist klar und logisch konsistent aufgebaut. Die zentralen Annahmen sind theoretisch gut begründet und sinnvoll hergeleitet worden. Die Fragestellungen der Studie

sind vor dem Hintergrund der gegenwärtigen Befundlage zu Fluglärmwirkungen und dem Stand des Wissens in puncto Lärmwirkungen auf den Schlaf klar nachvollziehbar.

3.3 Bewertung der eingesetzten Methoden insgesamt und der gewählten Vorgehensweise zur Gebietsauswahl und Probandengewinnung

Die im NORAH Modul 2.3 eingesetzten Methoden wurden entsprechend der einleitend dargestellten theoretischen Grundlagen, der Fragestellungen bzw. Hypothesen ausgewählt. Die Datenanalyse wurde mittels statistischer Verfahren durchgeführt, die dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen. Die Auswahl der Gebiete, in denen Probanden zur Teilnahme gewonnen wurden, orientierte sich an einer möglichst breiten Streuung der im Schlafraum zu erwartenden maximalen Schalldruckpegel von Flugzeugen, bei gleichzeitig möglichst geringer Belastung durch andere Verkehrslärmarten. Dies ist Voraussetzung für die Berechnung von Expositions-Wirkungskurven, die einen Vergleich mit entsprechenden aus der Literatur bekannten Kurven ermöglichen. Bei der Auswahl der Probanden gingen die Autoren sorgfältig vor, wobei sie den schon seit vielen Jahren im DLR angewandten umfangreichen Kriterienkatalog zum Ausschluss von Probanden nutzten. Damit ist aber auch jeder Versuch, Repräsentativität der Stichprobe zu erreichen, ausgeschlossen, was bei der geringen Anzahl an Probanden ohnehin nicht realisierbar gewesen wäre.

Im Rahmen des methodischen Vorgehens wurden vielfach erprobte, auch auf internationaler Ebene unstrittige und validierte Verfahren genutzt. Der Schlaf wurde in den Jahren 2011 und 2012 polysomnografisch erfasst. Die Auswertung des Polysomnogramms erfolgte nicht nach den Vorgaben der American Academy of Sleep Medicine (AASM) sondern, insbesondere um die Vergleichbarkeit mit der Köln/Bonner Studie zu ermöglichen, nach den von Rechtschaffen und Kales schon 1968 etablierten Regeln. Ein vereinfachtes Verfahren zur Erfassung vegetativ-motorischer Reaktionen (VMR) zur Detektion des Aufwachens wurde gemeinsam mit dem Initiator dieses Verfahrens weiterentwickelt. Aufgrund der hohen Übereinstimmung solcher Reaktionen mit den im EEG identifizierbaren Wachphasen wurde das Verfahren 2013 in der NORAH-Studie erstmals bei einer größeren Anzahl an Probanden eingesetzt.

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der VMR in Abhängigkeit vom Maximalpegel der Überflüge ergab Expositions-Wirkungskurven, die deutlich über denen der mittels EEG objektivierten Aufwachwahrscheinlichkeit liegen, aber weitgehend parallel verlaufen. Das Verfahren ermöglicht sicher eine valide Erkennung passagerer Beschleunigungen der Herzschlagfrequenz, nicht aber die valide Erfassung von Aufwachreaktionen. Der Einsatz dieses Verfahrens in groß angelegten Untersuchungen scheint verfrüht zu sein, da seine Validität im Hinblick auf die damit angestrebte Prognose langfristiger gesundheitlicher Folgen noch ungeklärt ist, auch wenn zu vermuten ist, dass die mit dem Verfahren erfasste Reaktion eine Bedeutung für die Entwicklung kardiovaskulärer Erkrankungen haben könnte.

Zur Dokumentation subjektiver Reaktionen auf den nächtlichen Lärm wurden Schlaferleben, Müdigkeit, Schläfrigkeit und Belästigung mit international etablierten und validierten Fragebögen genutzt.

Die zur statistischen Analyse eingesetzten Verfahren, insbesondere die multivariablen Regressionsmodelle und die Berücksichtigung möglicher Prädiktoren, werden vom WBQ als angemessen erachtet.

3.4 Umgang mit Problemen

Durch technische Mängel bei der polysomnografischen Aufzeichnung des Schlafs im Jahr 2011 war die beabsichtigte Schlaftiefenanalyse (d.h. eine aufgrund des Signalverlaufs im EEG unverfälschte epochenweise Zuordnung von Schlafstadien) nicht möglich. Auf der Basis aufwändiger und zeitraubender Fehleranalysen konnte das Studienteam am DLR die Ursache jedoch eingrenzen. Einer anschließenden statistischen Analyse zufolge konnten wesentliche Schlafparameter für Vergleiche mit den 2012 ebenfalls polysomnografisch erfassten Schlafdaten genutzt werden, namentlich Wechsel ins Wachstadium W.

Die von den Autoren mit dem WBQ abgesprochenen und durchaus umfangreichen Prozeduren zur Prüfung der Verwendbarkeit der EEG-Daten (vgl. Anhang 1) wurden vom WBQ sehr begrüßt und als angemessen befunden. Den Autoren ist hier ein sehr gewissenhaftes Arbeiten zu attestieren.

Auch die Weiterentwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Detektion von Aufwachreaktionen (VMM) hat sich als schwieriger herausgestellt als zunächst antizipiert. Hier wurde das ursprüngliche Ziel, die VMM als Alternative zur Detektion des Aufwachens mittels PSG zu etablieren, nicht erreicht. Die Expositions-Wirkungskurven für die vegetativ-motorischen Reaktionen verlaufen parallel zu den Expositions-Wirkungskurven für lärmbedingtes Aufwachen, liegen aber signifikant darüber. Deren Validität im Hinblick auf gesundheitliche Folgen ist noch zu ermitteln.

3.5 Prüfung und Bewertung der Vollständigkeit und Qualität

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Autoren des Berichts alle im Angebot/Auftrag adressierten Fragestellungen bearbeitet haben. Dem Studienteam des DLR ist ein in allen Belangen wissenschaftlich zu nennendes Vorgehen zu bescheinigen. Die korrekte Arbeit der Autoren findet ihren Niederschlag z.B. in der Auswahl und der Aufbereitung der auf das Ziel der Studie fokussierenden Literatur sowie der Formulierung der daraus abgeleiteten Hypothesen, und insbesondere auch bei der Ursachen- und Lösungssuche im Zusammenhang mit den hardwarebedingten PSG-Aufzeichnungsfehlern im Jahr 2011.

3.6 Einschätzung der diskutierten Ergebnisse und deren Einordnung sowie der getroffenen Schlussfolgerungen

Eine Diskussion der Ergebnisse anhand der einschlägigen Literatur wird von den Autoren eher zurückhaltend geführt. Diskussionsbeiträge finden sich allerdings vermehrt an mehreren Stellen des Ergebnisteils. Schlussfolgerungen ergeben sich häufig von selbst.

Aus der Sicht des WBQ sollten abschließend folgende Ergebnisse hervorgehoben werden:

- *Kernruhezeit:* Auf Frühschläfer, die am Ende der Nacht nur wenig fluglärmexponiert sind, hat die Einführung der Kernruhezeit einen durchaus positiven Effekt, die Aufwachhäufigkeit war – abhängig von der Anzahl der Überflüge – insgesamt geringer. Unter Umständen könnte sich ein langsames Einsetzen des morgendlichen Flugverkehrs auch für Spätschläfer positiv auswirken.
- *Subjektive Bewertung des Flugverkehrs und Störungen des Schlafs:* Personen, die dem Flughafen und den Änderungen des Flugbetriebs eher positiv gegenüber stehen, reagierten physiologisch weniger stark auf Fluglärm. Hieraus lassen sich möglicherweise präventive Ansätze entwickeln.
- *Vergleichbarkeit unterschiedlicher Flughäfen:* Die 2001 untersuchten Anrainer des Flughafens Köln/Bonn waren objektiv stärker in ihrem Schlaf gestört als die Anrainer des Frankfurter Flughafens. Daraus ließe sich – auch unter Berücksichtigung von in der Literatur veröffentlichten Expositions-Wirkungskurven anderer Flughäfen – mit gebotener Zurückhaltung der Schluss ziehen, dass die für einen bestimmten Flughafen errechneten Kurven kaum generalisierbar sind.

4 Empfehlung des WBQ

Insgesamt bescheinigt der WBQ den Autoren einen qualitativ guten und inhaltlich vollständigen Bericht vorgelegt zu haben. Der Wissenschaftliche Beirat Qualitätssicherung (WBQ) hat nach ausführlicher Kommentierung der vorgängig abgegebenen Entwurfsversion des Endberichts durch seine Mitglieder diesen in seiner Fassung vom 07.09.2015 auf seiner Sitzung vom 09.09.2015 angenommen und empfiehlt dem UNH, den Bericht zu veröffentlichen.