Die Umsetzung der DLR-Studie in einer lärmmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept

Mathias Basner, Ullrich Isermann und Alexander Samel

Zusammenfassung Das Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) führte zwischen 1999 und 2004 umfangreiche Studien zum Einfluss von Nachtfluglärm auf den Schlaf durch. Die Ergebnisse der Feldstudie wurden vom Regierungspräsidium Leipzig im Planfeststellungsbeschluss für den Ausbau des Verkehrsflughafens Leipzig/Halle dazu genutzt, ein Nachtschutzkriterium aufzustellen. Der Ausbau des Flughafens Leipzig/Halle zu einem Frachtdrehkreuz wird durch eine hohe Anzahl prognostizierter nächtlicher Flugbewegungen mit starken Belastungen der betroffenen Bevölkerung einhergehen und erfordert entsprechend wirksame Schutzkriterien. In diesem Beitrag werden Methodik und Ergebnisse der DLR-Feldstudie beschrieben. Besondere Beachtung findet der Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel eines Fluggeräuschs und der Wahrscheinlichkeit aufzuwachen. Die in der Feldstudie so ermittelte Dosis-Wirkungsbeziehung wird dazu genutzt, wirkungsbezogene Schutzzonen auszuweisen, die sich von den bisherigen Schutzzonen, welche allein auf akustischen Kriterien beruhen, qualitativ und quantitativ unterscheiden. Es wird diskutiert, warum NAT- und L_{eq}-Kriterien auch in ihrer Kombination nur bedingt dazu geeignet sind, die Wirkungen von Nachtfluglärm auf den Schlaf adäquat zu beschreiben. Das auf den Ergebnissen der DLR-Feldstudie beruhende Nachtschutzkonzept für den Flughafen Leipzig/Halle wird vorgestellt und begründet: (1) im Mittel soll weniger als eine zusätzliche Aufwachreaktion pro Nacht durch Fluglärm hervorgerufen werden, (2) erinnerbares Erwachen soll möglichst vermieden werden, (3) das Wiedereinschlafen soll trotz Fluglärm möglichst wenig beeinträchtigt sein. Präventivmedizinische Maßnahmen zur Kompensation einer eingeschränkten Bevölkerungsrepräsentativität der untersuchten Feldstudienpopulation werden ausführlich diskutiert.

Schlüsselwörter Fluglärm – Schlaf– Polysomnographie – Aufwachreaktion

The application of the DLR-study for a medical evaluation of a protective concept on adverse effects of nocturnal aircraft noise

Summary The Institute of Aerospace Medicine at the German Aerospace Center (DLR) investigated the influence of nocturnal aircraft noise on sleep, mood and performance in extensive laboratory and field studies between 1999 and 2004. The results of the field studies were utilized by the Regional Council of Leipzig for the establishment of a noise protection plan during the night in the official approval process of the expansion of Airport Leipzig/Halle. The airport will be extended to a fright-hub. Therefore, it is expected that people living in the vicinity of the airport will be relevantly exposed to aircraft noise especially during the night, and preventive measures for the protection of the residents have to be taken accordingly. Methods and results of the DLR field study are described in this publication. Special attention is given to the association of the maximum sound pressure level of an aircraft noise event and the probability to wake up in the night. The dose-response relationship established in the field study was used to set up noise protection zones directly related to the effects of nocturnal aircraft noise on sleep. These protection zones differ qualitatively and quantitatively from zones that are solely based on acoustical criteria and which have been predominantly used in the past. It is shown that, even in their combination, NAT- and L_{eq}-criteria are not fully suitable for an adequate description of the effects of nocturnal aircraft noise on sleep. The noise protection plan for Airport Leipzig/Halle, which is based on the results of the DLR field study, is presented and substantiated: (1) on average, there should be less than one additional awakening induced by aircraft noise, (2) awakenings recalled in the morning should be avoided as much as possible, (3) aircraft noise should interfere as little as possible with the process of falling asleep again. The representativeness of the participants of the field study was not absolute. Preventive measures were taken to compensate for this lack of not being representative for everyone living in the vicinity of Airport Leipzig/Halle. These measures are discussed in detail.

Key Words Aircraft Noise – sleep – polysomnography – awakening

1 Einleitung

Die Flughafen Leipzig/Halle GmbH (FLHG) plant eine Ausweitung des Flugbetriebs. Um das steigende Verkehrsaufkommen zu bewältigen, soll neben der bestehenden Start- und Landebahn Nord die Start- und Landebahn Süd gedreht und auf 3 600 m Länge erweitert werden. Durch die geplante Ausbaumaßnahme soll ein voneinander unabhängiges Parallelbahnsystem entstehen, welches den gleichzeitigen Betrieb von Starts und Landungen ermöglicht. Der Flugbetrieb wird für das Jahr 2015 mit ca. 81 000 Flugbewegungen während der sechs verkehrsreichsten Monate prognostiziert [1]. Von diesen Bewegungen sollen ca. 45 600 am Tage zwischen 6 und 22 Uhr und ca. 35 400 in der Nacht zwischen 22 und 6 Uhr stattfinden. Die Bewegungen während der Nacht sollen überwiegend aus dem Betrieb eines Fracht-Hubs resultieren.

Mit Schreiben vom 10. August 2004 bat das Regierungspräsidium Leipzig (RPL) das DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, aufgrund des umfangreichen Datenmaterials zum Einfluss von Nachtfluglärm auf den Menschen, welches im Rahmen des DLR/HGF-Projekts „Leiser Flugverkehr“ erhoben wurde, und der daraus abgeleiteten Ergebnisse, Vorschläge für ein Nachtschutzkonzept zu entwickeln.

Nach Abschluss eines sorgfältigen Abwägungsprozesses und Konsultation des Sachverständigen für Lärmmedizin und Lärmpsychologie Prof. Dr. Dr. *Kastner* [2] entschied das RPL, ein Nachtschutzkonzept für den Flughafen Leipzig/Halle zu entwickeln, das maßgeblich auf den Ergebnissen der DLR-Feldstudie [3] und damit auf den neuesten zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen sollte. Am 4. November 2004 erging der Planfeststellungsbeschluss

Dr. med. Mathias Basner, Dr. Alexander Samel,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln.
Dr. Ullrich Isermann,
DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen.

Eingang des Manuskripts: 27. Mai 2005.

[1], und kurz darauf entschied das Logistikunternehmen DHL, sein europäisches Frachtdrehkreuz von Brüssel nach Leipzig zu verlegen.

2 Methodik der DLR-Feldstudie

Das DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin führte zwischen 1999 und 2004 umfangreiche Labor- und Feldstudien zur Wirkung von nächtlichem Fluglärm auf Schlaf, Leistung und Befinden des Menschen durch. Die Felduntersuchungen, auf deren Erkenntnisse das Schutzkonzept für den Flughafen Leipzig/Halle maßgeblich beruht, sollen im Folgenden kurz hinsichtlich Studiendesign und Methodik dargestellt werden. Für eine detaillierte Beschreibung sei an dieser Stelle auf die Zusammenfassung des Endberichts der Studie verwiesen [3]. Im Zeitraum September 2001 bis November 2002 wurden zwei Feldstudien mit je 32 Versuchspersonen bei Anwohnern des deutschlandweit mit am stärksten durch nächtlichen Fluglärm belasteten Flughafens Köln-Bonn durchgeführt. Die Versuchspersonen wurden über neun aufeinander folgende Nächte untersucht (Montagabend bis Donnerstagmorgen der darauf folgenden Woche).

2.1 Versuchspersonen

Die Teilnehmer der Feldstudie wurden in einem mehrstufigen Verfahren ausgewählt. Sie waren zwischen 19 und 61 Jahre alt (Mittelwert: 38 Jahre). 56 % der Teilnehmer waren weiblich, entsprechend 44 % männlich. Die Versuchspersonen waren altersentsprechend schlafgesund und normal hörend. Eine genaue Beschreibung des Auswahlverfahrens und der Studienteilnehmer findet sich im Forschungsbericht DLR-FB 2004/7D [3] auf den Seiten 7 bis 13. Auf die Bevölkerungsrepräsentativität der untersuchten Versuchspersonen wird in Abschn. 5.6 näher eingegangen.
Die Untersuchung wurde durch die Ethikkommission der Ärztekammer Nordrhein genehmigt. Alle Teilnehmer wurden entsprechend der Deklaration von Helsinki über den Versuchsablauf aufgeklärt und konnten jederzeit ohne Angabe von Gründen die Teilnahme beenden.

2.2 Elektrophysiologie

Während der Nacht wurden kontinuierlich elektrophysiologische Signale der Versuchspersonen erfasst. Diese beinhalteten Elektroenzephalogramm (Hirnströme, EEG), Elektrookulogramm (Augenbewegungen, EOG), Elektromyogramm (Muskelanspannung, EMG), Elektrokardiogramm (Herzströme, EKG), Atembewegungen, Fingerpulsamplitude, Position im Bett und Aktimetrie. Mit den Signalen EEG, EOG und EMG, der sog. Polysomnographie, ist es möglich, den Schlaf in verschiedene Stadien zu klassifizieren [4]. Man unterscheidet Wachsein und Schlaf. Der Schlaf wird wiederum in den REM-Schlaf, in dem schnelle Augenbewegungen (rapid eye movements) beobachtet werden können, und NREM-Schlaf unterteilt. Der NREM-Schlaf selbst gliedert sich in die vier Schlafstadien S1, S2, S3 und S4. Die Stadien S3 und S4 zusammen werden auch als Tiefschlaf bezeichnet. Diese Bezeichnung entstand, weil Menschen aus diesen Schlafstadien heraus besonders schwer erweckbar sind [5]. Dem Tiefschlaf wird, ähnlich wie dem REM-Schlaf, eine besonders wichtige Funktion für die regenerative Wirkung des Schlafprozesses beigemessen [6]. Die Stadien Wach und S1 scheinen hingegen nicht bzw. nur sehr gering zur Erholungsfunktion des Schlafs beizutragen [7].
Jede Nacht wird in 30 s lange Abschnitte, auch Epochen genannt, unterteilt. Bei der Analyse wird jeder Epoche durch einen geschulten Auswerter eines der o. g. Schlafstadien zugewiesen. Bislang existieren keine verlässlichen automatischen Verfahren zur Schlafstadienklassifikation. Aus den o. g. Gründen handelt es sich bei der Polysomnographie in Durchführung und Auswertung um eine sehr aufwändige Methode, die deshalb in der Vergangenheit nur in vergleichsweise kleinen Studien zum Einsatz kam. Nur mit der Polysomnographie ist es jedoch möglich, Aussagen über strukturelle Aspekte des Schlafs zu treffen. Die deutlich weniger aufwändige Methodik der Aktigraphie, die versucht, durch Informationen über Bewegungen eines Handgelenks Rückschlüsse auf Schlafqualität und Schlafquantität zu ziehen, muss als eine der Polysomnographie deutlich unterlegene Methode angesehen werden. Mit 64 Versuchspersonen und 576 Untersuchungsnächten ist die DLR-Studie die bislang größte Feldstudie zum Thema Nachtfluglärm und Schlaf, in der die Polysomnographie eingesetzt wurde.

2.3 Akustik

In den Feldstudien wurde das Verhalten der Versuchspersonen auf den tatsächlich am Köln-Bonner-Flughafen auftretenden Nachtfluglärm untersucht, d. h. es wurden keine zusätzlichen Geräusche über Lautsprecher eingespielt. Dabei wurde gleichzeitig mit drei Klasse-1-Schallpegelmessern (NC10, Cortex Instruments) gemessen. Ein Schallpegelmesser (#1) zeichnete die Außengeräusche mit einem in 2 m Entfernung vor dem Fenster angebrachten Mikrofon auf, während zwei weitere Schallpegelmesser (#2 und #3) die Innengeräusche möglichst nah am Ohr des Schläfers erfassten.
Der Schallpegel (L_{AS} und L_{lin}) wurde kontinuierlich über die gesamte Nacht gemessen und aufgezeichnet. Sobald ein bestimmter Hintergrundpegel (L_{90}) überschritten wurde (i. d. R. um mehr als 4 dB), zeichnete #1 das tatsächliche Geräusch mit einer Frequenz von 24 kHz solange auf, bis die Differenz zum Hintergrundpegel wieder weniger als 4 dB betrug, mindestens jedoch 30 s lang. Die einzelnen Geräusche wurden als WAV-Dateien abgelegt. Hiermit war eine Identifizierung der Geräuschquelle (Flugzeug, Straßenverkehr, Schienenverkehr etc.) möglich. Gleichzeitig wurde mit dem Beginn der Aufzeichnung Schallpegelmesser #2 getriggert, der das Geräusch dann ebenfalls und zeitgleich mit #1, nun allerdings im Schlafraum, aufzeichnete. Durch die zeitsynchrone Aufnahme des Geräuschs innen und außen konnten demnach Aussagen über die Dämpfungseigenschaften der Fenster und des Mauerwerks gewonnen werden.
Das Triggersignal wurde zeitgleich mit den elektrophysiologischen Signalen mit einer Abtastrate von 8 Hz aufgezeichnet, so dass eine ereigniskorrelierte Auswertung von akustischen und elektrophysiologischen Signalen mit einer Auflösung von maximal 125 ms ermöglicht wurde.
Ein dritter Schallpegelmesser (#3) zeichnete Geräusche im Schlafraum dann auf, sobald dort ein bestimmter Hintergrundpegel überschritten wurde (auch hier i. d. R. um mehr als 4 dB). Hiermit konnten Geräusche identifiziert werden, die allein im Haus entstanden (z. B. Schnarchen, Türenschlagen), und durch Schallpegelmesser #2, da dieser von außen getriggert wurde, nicht hätten bestimmt werden können.

2.4 Methodik der ereigniskorrelierten Auswertung

Fluglärm ist intermittierend auftretender Lärm, d. h. die einzelnen Fluggeräusche sind aufgrund ihres zeitlichen Abstands deutlich voneinander abgrenzbar. Mit ereigniskorrelierter Auswertung ist eine Analyse gemeint, die zeitlich einen direkten Zusammenhang zwischen dem Auftreten eines Fluggeräuschs und der Reaktion des beobachteten Menschen auf das Fluggeräusch herstellt. Durch die simultane Aufzeichnung der elektrophysiologischen und der akustischen Signale wird eine ereigniskorrelierte Auswertung überhaupt erst ermöglicht.

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

Die Reaktionen des schlafenden Menschen auf Fluggeräusche sind unspezifisch, weil sie auch während des natürlichen, nicht durch Geräusche gestörten Schlafs beobachtet werden können. Reaktionen, die während eines Fluggeräuschs auftreten, lassen sich anhand elektrophysiologischer Kriterien allein nicht von spontanen Reaktionen unterscheiden. Gerade deshalb ist es notwendig, akustische und elektrophysiologische Aufzeichnungen zu synchronisieren, um diese Differenzierung vornehmen zu können.

Da spontane Reaktionen unregelmäßig vorkommen, können sie auch während eines Fluggeräuschs auftreten. Wenn man daher im Zusammenhang mit einem Fluggeräusch eine Reaktion beobachtet, ist zu fragen, wie häufig die beobachtete Reaktion auch ohne das Fluggeräusch, also spontan, aufgetreten wäre. In der Epidemiologie spricht man in diesem Zusammenhang von attributablen Risiken. Die Wahrscheinlichkeit einer durch das Geräusch induzierten Reaktion $P_{\text{induziert}}$ errechnet sich als

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

Zusätzlich muss die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass sich das spontane Reaktionsverhalten auch zwischen zwei Fluggeräuschen, also in der lärmfreien Zeit, durch den Fluglärm verändert. Insbesondere eine Erhöhung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen zwei Fluggeräuschen würde Kriterien, die sich zeitlich ausschließlich auf das Reaktionsverhalten während eines Fluggeräuschs und kurz danach beschränken, in ihrer Gültigkeit in Frage stellen. Die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit zwischen zwei Fluggeräuschen unterschied sich jedoch in der Laborstudie, unabhängig von Anzahl und Lautstärke der Fluggeräusche, nicht von der in lärmfreien Basisnächten beobachteten spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit [8].

Mit dem Begriff „Lärmfenster“ wird der Zeitraum nach dem Beginn eines Fluggeräuschs bezeichnet, der auf eine Reaktion des Schlafenden überprüft wird. Das Lärmfenster wurde so gewählt, dass die Wahrscheinlichkeit einer induzierten Reaktion auf Fluggeräusche ($P_{\text{induziert}}$ in Gl. (1)) maximiert wurde. Es hatte in den Feldstudien eine Länge von drei Epochen (90 s).

In der Vergangenheit wurden mehrere potenzielle Indikatoren für lärmbedingte Schlafstörungen identifiziert und vorgeschlagen. An dieser Stelle wird etwas detaillierter auf ihre Beschreibung eingegangen, da in der Literatur zur Lärmwirkungsforschung immer wieder die Begriffe „Arousal“, „Aufwachreaktion“ und „erinnerbares Aufwachen“ vermengt werden.

Grundsätzlich finden Aktivierungen des Organismus Ausdruck in Frequenz- und Amplitudenänderungen von EEG und EMG. Dauern diese Aktivierungen 3 s oder länger an, werden sie als ein EEG-Arousal bezeichnet [9; 10]. Die Aktivierungen müssen mindestens 15 s andauern, um zu einer Klassifikation der Schlafepoche als Stadium Wach zu führen [4]. Wenn der Wechsel in das Stadium Wach aus einem der anderen Schlafstadien erfolgt, spricht man von einer Aufwachreaktion. Je länger die Aktivierung andauert, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Schläfer sein Wachbewusstsein wiedererlangt und sich am nächsten Tag an die Wachperiode erinnert. In diesem Fall spricht man von einem „erinnerbaren Aufwachen“. Es wird deutlich, dass es sich bei EEG-Arousal, Aufwachreaktionen und erinnerbarem Aufwachen um verschiedene Ausprägungsformen desselben Mechanismus handelt, die sich vorwiegend in der Dauer unterscheiden.

Die Verwirrung um diese Begriffe wird dadurch verstärkt, dass der Ausdruck „Arousal“ häufig allgemein im Sinne von „Aktivierung“ gebraucht wird. Die o. b. „EEG-Arousal“ werden deshalb begrifflich von den sog. „vegetativen Arousal“ getrennt. Vegetative Arousal sind Aktivierungen des sympathischen Nervensystems, die u. a. mit einer Beschleunigung der Herzfrequenz und einem Anstieg des Blutdrucks einhergehen. Vegetative Arousal und EEG-Arousal können, müssen aber nicht gleichzeitig auftreten [11].

Schlaftiefenwechsel, ein weiterer häufig gebrauchter Indikator, treten beim Übergang von einem Schlafstadium in ein anderes auf. Im Zusammenhang mit Lärmwirkungen werden i. d. R. nur solche Schlaftiefenwechsel berücksichtigt, die zu einer Verflachung des Schlafs führen, z. B. der Wechsel vom Tiefschlafstadium S4 in das oberflächlichere Stadium S2.

Bei fast allen in der Vergangenheit durchgeführten Studien, in denen die Polysomnographie zum Einsatz kam, wurden Aufwachreaktionen als primärer Indikator für durch Geräusche aus der Umwelt hervorgerufene Schlafstörungen benutzt. Aus folgenden Gründen sind Aufwachreaktionen als derartige Indikatoren besonders gut geeignet [12]:

- Eine Aufwachreaktion ist die stärkste Ausprägung einer Aktivierung des Organismus im Schlaf. Dementsprechend groß sind die Folgen für die regenerative Funktion des Schlafs.
- Aufwachreaktionen sind relativ spezifisch, d. h. sie treten spontan im Vergleich zu anderen Indikatoren selten auf. In den 112 ungestörten Basisnächten der Experimentalgruppe im Labor wurden im Mittel ca. 24 Aufwachreaktionen pro Nacht beobachtet [3]. Spontane Schlaftiefenwechsel traten mit im Mittel ca. 52 Wechseln pro Nacht mehr als doppelt so häufig auf. *Mathur* und *Douglas* [13] untersuchten das spontane Auftreten von EEG-Arousal nach ASDA-Kriterien [9]. Sie beobachteten im Mittel ca. 21 Arousal pro Stunde Schlaf. Legt man die mittlere in den Basisnächten der Laborstudie beobachtete Schlafzeit (SPT) von 411,5 min zugrunde, entspricht dieser Wert ca. 144 spontanen EEG-Arousal pro Nacht. Dieser Umstand erschwert bei der Bewertung von

EEG-Arousal die Grenzziehung zwischen noch normal und schon pathologisch. *Raschke* [14] konstatierte deshalb: *„Als Schlussfolgerung aus den derzeitigen Erkenntnissen lässt sich klar sagen, dass die Mikro-Arousals der ASDA in der Lärmwirkungsforschung als Indikator für Schlafstörungen und Lärmbelästigungen nicht einsetzbar sind, da sie ohnehin beim Gesunden in Abhängigkeit vom Lebensalter zwischen 10 und 20 pro Stunde betragen [...] und in diesem Bereich als normal angesehen werden können.“* Dennoch sind wir der Meinung, dass es sich lohnen kann, den Einfluss von Fluglärm auf die EEG-Arousal-Dichte zu untersuchen. Dazu wird aktuell zunächst ein Sub-Datensatz in Kooperation mit der Universität Dortmund und der Universität Marburg analysiert.

- Es wurde beobachtet, dass Aufwachreaktionen im Gegensatz zu Arousal mit uni-modalen und prolongierten Herzfrequenzbeschleunigungen einhergehen [15]. In eigenen Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Stärke und/oder die Häufigkeit von Herzfrequenzbeschleunigungen stark herabgesetzt sind, wenn nicht gleichzeitig eine Aufwachreaktion im EEG beobachtet wird [8]. Gerade das regelmäßige Auftreten dieser nächtlichen vegetativen Reaktionen scheint jedoch eine mögliche Ursache für die Entstehung von Bluthochdruck und den damit verbundenen Erkrankungen des Gefäßsystems (Herzinfarkt, Schlaganfall) zu sein [16]. Schlaftiefenwechsel oder kurze Arousal allein führen nicht in dem Ausmaß zu vegetativen Aktivierungen wie Aufwachreaktionen.
- Kriterien, die das generelle Auftreten von Aufwachreaktionen regulieren, beschränken gleichzeitig die Anzahl möglicher erinnerbarer Aufwachreaktionen und sorgen damit dafür, dass die Güte des Schlafs hoch eingeschätzt wird. Schlaftiefenwechsel und Arousal werden hingegen am nächsten Tag nicht erinnert, da sie nicht zu einer Erlangung des Wachbewusstseins führen.

Die Sensitivität des Indikators „Aufwachreaktion“ ist auch ausreichend hoch, denn in den Laborstudien wurde bei Maximalpegeln oberhalb von 45 dB keine Reaktionsschwelle gefunden, im Feld lag sie mit ca. 33 dB nur 6 dB über dem Hintergrundpegel (s. u.).

Das Schlafstadium S1, das oberflächlichste der vier NREM-Schlafstadien, trägt nicht oder kaum zur Erholungsfunktion des Schlafs bei und wurde als eine typische Folge erhöhter Schlaffragmentierung beobachtet [7]. Aus diesem Grund wurde nicht nur der Wechsel in das Stadium Wach, sondern auch der für die Schlafgüte relevante Schlaftiefenwechsel in das Stadium S1 als Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen in der Analyse dieser Studie berücksichtigt. Für diesen Indikator wird auch der Begriff „Schlaffragmentierungs-Index“ (SFI) benutzt. Es wurde nachgewiesen, dass dieser Index hoch mit der Anzahl Arousal nach ASDA-Kriterien korreliert [16; 17]. Mit dieser präventivmedizinischen Vorgehensweise wurde der Anteil geräuschinduzierter Reaktionen erhöht, ohne die Spezifität des Indikators gravierend zu verringern. Auch andere Forschergruppen favorisieren diese Vorgehensweise [18]. Wenn im Folgenden von Aufwachreaktionen gesprochen wird, ist daher implizit immer ein Wechsel vom Schlafstadium REM, S4, S3 oder S2 in das Schlafstadium S1 oder Wach gemeint. Dennoch ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der DLR-Studie mit in der Vergangenheit durchgeführten Studien grundsätzlich gegeben, da die Einbeziehung des Schlafstadiums S1 zu einem Anheben der Dosis-Wirkungsbeziehung von weniger als 1% führt [8].

Die Aufwachwahrscheinlichkeit hängt nicht nur vom Maximalpegel des Fluggeräuschs ab. Einerseits spielen andere akustische Eigenschaften des Geräuschs, wie die spektrale Zusammensetzung oder die Dauer, eine Rolle. Andererseits moderieren situative und individuelle Faktoren die Reaktion des Organismus auf Fluggeräusche im Schlaf [3; 19]. Daher müssen, um allein den Einfluss des Maximalpegels eines Fluggeräuschs zu bestimmen, die übrigen moderierenden Faktoren kontrolliert werden. In einem Regressionsmodell ist dies möglich und wird dort auch als Adjustierung bezeichnet.

Da es sich bei dem Auftreten einer Aufwachreaktion um eine dichotome abhängige Variable (ja/nein) handelt, wurde ein logistisches Regressionsmodell verwendet. Die beobachteten Reaktionen sind jedoch nicht unabhängig, da jede Versuchsperson mehrfach mit Fluggeräuschen beschallt wurde und demnach mit mehreren Werten in die Analyse einging. Mit einer logistischen Regression mit Zufallseffekten (random effects logistic regression) wurde eine Analyseform gewählt, welche u. a. die o. b. Abhängigkeit der Daten berücksichtigte [20].

3 Ergebnisse der DLR-Feldstudie

Insgesamt gingen 61 von 64 Versuchspersonen mit insgesamt 483 Untersuchungsnächten, in denen während der Schlafperiode 15 556 Fluggeräusche aufgezeichnet wurden, in die endgültige Auswertung ein. Die erste Nacht wurde wegen des sog. First-Night-Effects nicht in der Analyse berücksichtigt [21]. Wie sich bei der Auswertung der Daten herausstellte, litt eine Versuchsperson an einer intrinsischen Schlafstörung (REM-Schlaf assoziierte Bewegungsstörung), die eine Analyse der Daten nicht sinnvoll machte. Eine weitere Versuchsperson schnarchte dauerhaft so stark, dass keines der untersuchten Lärmereignisse ungestört war (s. u.). Aus diesem Grund wurden die Daten dieser Versuchsperson und die des gleichzeitig untersuchten Lebenspartners nicht in die endgültige Analyse mit aufgenommen.

Im Gegensatz zur Laborstudie herrschten in der Feldstudie keine kontrollierten Bedingungen vor. Das Hervortreten eines Geräuschs aus dem Hintergrund (Emergenz) wurde in der Vergangenheit neben dem Maximalpegel als wichtige Einflussvariable für das Auftreten einer Aufwachreaktion identifiziert [19]. In der Feldstudie wurde daher der Hintergrundpegel jeweils als energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{AS,eq}$ in der Minute vor dem Beginn eines Fluggeräuschs bestimmt. Die Werte lagen zwischen 16,4 und 58,3 dB mit einem Median von 27,1 dB. 258 von 15 556 Fluggeräuschen wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da ihre Emergenz kleiner oder gleich 0 dB war.

Zwischen zwei Fluggeräuschen und auch während eines Fluggeräuschs können Fremdgeräusche auftreten, die sowohl innerhalb als auch außerhalb des Schlafraums entstehen können. Diese Fremdgeräusche wurden in der Feldstudie identifiziert. Ein Fluggeräusch ging nur dann in die Auswertung ein, wenn folgende Bedingungen erfüllt waren: In der Minute vor dem Beginn des Fluggeräuschs waren nur Geräusche vom Probanden selbst (außer Schnarchen) oder eines vorangehenden Flugzeugs erlaubt. Der Ausschluss von diesen anderen Fluggeräuschen hätte zu einer Unterschätzung der Aufwachwahrscheinlichkeit in Zeiten mit hohem Flugverkehrsaufkommen und damit zu einer systematischen Verzerrung führen können. Wenn während des Flug-

geräuschs gleichzeitig ein Fremdgeräusch eintrat, das eine Aufwachreaktion unabhängig vom Fluggeräusch hätte hervorrufen können, wurde dieses Fluggeräusch während der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Vom Probanden selbst hervorgerufene Geräusche, die als Reaktion auf das Fluggeräusch entstehen können, wurden dagegen explizit nicht ausgeschlossen. Insgesamt trafen die Bedingungen auf 10 658 Fluggeräusche zu, auf denen die unten vorgestellten Ergebnisse der Regressionsmodelle beruhen.

In der Feldstudie wurden sog. „virtuelle Fluggeräusche" benutzt, um die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit zu ermitteln: Bei jedem Fluggeräusch wurde in den jeweils sieben anderen Nächten derselben Versuchsperson zum gleichen Zeitpunkt nach Schlafbeginn überprüft, ob sich ein Fluggeräusch im Lärmfenster befand, und wenn nein, ob spontan eine Aufwachreaktion oder ein Wechsel in das Stadium S1 auftraten oder nicht.

In **Tabelle 1** ist das Ergebnis eines multivariablen logistischen Regressionsmodells mit Zufallseffekt dargestellt, das auf den Daten der Feldstudie beruht. Neben dem Maximalpegel ($L_{AS,max}$) und dem Hintergrundpegel (L_{eq}_1min) ist auch der signifikante Interaktionsterm zwischen $L_{AS,max}$ und L_{eq}_1min im Modell enthalten. Als weitere statistisch signifikante Moderatoren beinhaltet das Modell zusätzlich das Schlafstadium, in dem sich die Versuchsperson vor Auftreten des Fluggeräuschs befand (die beiden Indikatorvariablen Tiefschlaf vorher und REM vorher), und die verstrichene Schlafzeit (in Epochen) als erklärende Variablen.

Die Aufwachwahrscheinlichkeit steigt mit größer werdendem Maximalpegel $L_{AS,max}$ oder Hintergrundpegel ebenso wie mit einer Zunahme der verstrichenen Schlafzeit (positive Koeffizienten). Die Wahrscheinlichkeit, aus dem Tiefschlaf geweckt zu werden, ist kleiner als im Schlafstadium 2, aus dem REM-Schlaf hingegen größer als im Schlafstadium 2. Dennoch handelt es sich beim Schlafstadium 2 um das empfindlichste Schlafstadium bezüglich lärminduzierter Aufwachreaktionen, da der Anteil spontaner Aufwachreaktionen im REM-Schlaf deutlich höher war als im Schlafstadium 2 (s. Gl. (1)). Die signifikante Interaktion zwischen Maximalpegel und Hintergrundpegel zeigt, dass sich die Steilheit der Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen $L_{AS,max}$ und Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Hintergrundpegel ändert; damit wird die Bedeutung der Emergenz eines Fluggeräuschs verdeutlicht.

In **Bild 1** ist der Zusammenhang zwischen Maximalpegel eines Fluggeräuschs und Aufwachwahrscheinlichkeit basierend auf dem in Tabelle 1 aufgeführten Regressionsmodell dargestellt (schwarze Linie). Für die Abbildung wurde der

Tabelle 1. Ergebnisse einer logistischen Regression mit Zufallseffekt (Statistiksoftware Egret, Version 2.0.31). Die Ergebnisse beruhen auf 61 Versuchspersonen, 483 Untersuchungsnächten und 10 658 Fluggeräuschen. –2logL = 6 659,8 bei 10 650 Freiheitsgraden.

Variable	Koeffizient	Standardfehler	*p*-Wert
Konstante	–7,0734	0,8816	< 0,001
$L_{AS,max}$	0,0946	0,0185	< 0,001
L_{eq}_1min	0,1319	0,0327	< 0,001
$L_{AS,max}$ x L_{eq}_1min	–0,0027	0,0007	< 0,001
Schlafzeit	0,0006	0,0002	< 0,001
Tiefschlaf vorher	–0,3205	0,1161	0,0058
REM vorher	0,4195	0,0733	< 0,001
Zufallseffekt	0,3395		0,0540

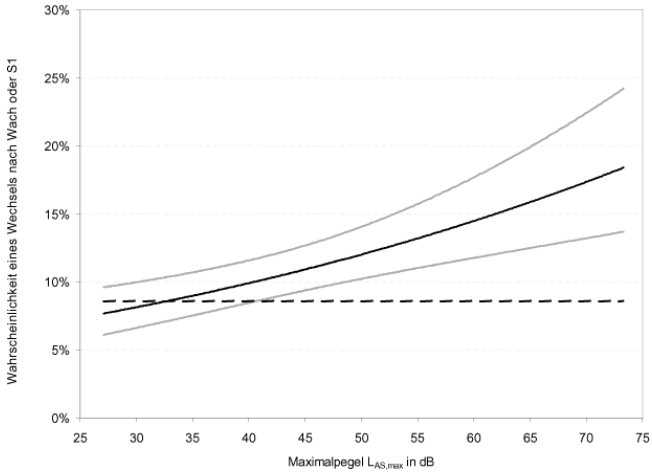

Bild 1. Der gezeigte Zusammenhang zwischen Maximalpegel eines Fluggeräuschs und Wahrscheinlichkeit eines Wechsels nach Wach oder Schlafstadium S1 beruht auf den in Tabelle 1 dargestellten Ergebnissen. Annahmen: Hintergrundpegel = 27,1 dB konstant (Median), Schlafstadium vor Auftreten des Lärmereignisses = S2, verstrichene Schlafzeit = 601 Epochen (Mitte der zweiten Nachthälfte). Gezeigt sind neben dem Punktschätzer (schwarze Linie) das 95%-Konfidenzintervall (graue Linien) und die spontane Reaktionswahrscheinlichkeit (gestrichelte schwarze Linie).

Hintergrundpegel mit konstant 27,1 dB (Median) angenommen. Aus präventivmedizinischen Gründen wurde als Schlafstadium vor dem Fluggeräusch S2, also das geräuschempfindlichste Stadium für fluglärminduzierte Aufwachreaktionen, angenommen. Für die verstrichene Schlafzeit wurde ein Wert von 601 Epochen (ca. 5 h) gewählt, was in der Feldstudie der Mitte der zweiten Nachthälfte entsprach. Der höchste im Feld gemessene Maximalpegel lag innen bei 73,2 dB. Die mit virtuellen Lärmereignissen berechnete spontane Aufwachwahrscheinlichkeit betrug im Mittel 8,6 % (gestrichelte schwarze Linie). Die Abbildung verdeutlicht, dass in der DLR-Feldstudie ein Schwellenwert von etwa 33 dB gefunden wurde, d. h. erst bei Maximalpegeln oberhalb 33 dB kam es zu einer Zunahme der unter Fluglärm beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeit im Vergleich zur spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit. Der Schwellenwert lag damit nur etwa 6 dB über dem angenommenen Hintergrundpegel. Diese Beobachtung erscheint physiologisch plausibel: Erstes fluglärminduziertes Erwachen sollte dann zu beobachten sein, wenn das menschliche Gehör dazu in der Lage ist, das Fluggeräusch vom Hintergrundgeräusch zu differenzieren. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit knapp oberhalb der Schwelle entsprechend gering ist. So ist bei einem Fluggeräusch-Maximalpegel von 34 dB damit zu rechnen, dass gerade einmal zwei von 1 000 Menschen durch derartigen Fluglärm geweckt werden.

Die Präzision der Schätzung kann an der Weite des 95%-Konfidenzintervalls abgelesen werden (graue Linien in Bild 1). Sie ist über den gesamten Wertebereich des Maximalpegels aufgrund der großen Fallzahlen hoch und schwankt zwischen 3,1 % bei 39 dB und 10,5 % bei 73,2 dB.

Wie bereits erläutert, handelt es sich bei Aufwachreaktionen um unspezifische Reaktionen, die auch ohne den Einfluss von Fluglärm beobachtet werden können. Die Wahrscheinlichkeit einer fluglärminduzierten Aufwachreaktion errechnet sich aus der unter Fluglärm beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeit (schwarze Linie in Bild 1) minus der spontan beobachteten Aufwachwahrscheinlichkeit (gestri-

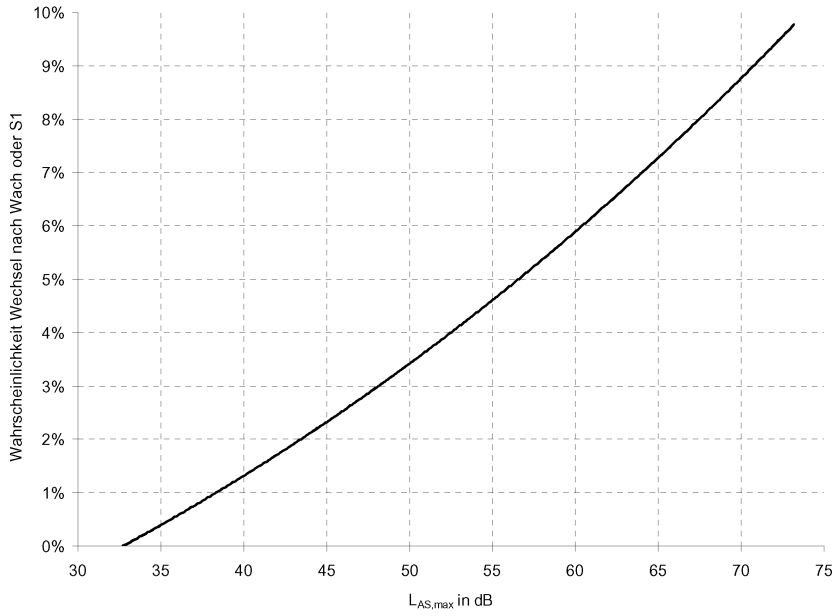

Bild 2. Abhängigkeit einer fluglärminduzierten Aufwachreaktion in Abhängigkeit vom Maximalpegel des Fluggeräuschs. Reaktionen treten bei Maximalpegeln oberhalb von ca. 32,7 dB auf. Diese Schwelle liegt damit nur ca. 6 dB über dem angenommenen Hintergrundpegel von 27,1 dB.

chelte schwarze Linie in Bild 1). Die Abhängigkeit der fluglärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit vom Maximalpegel eines Fluggeräuschs bildet die Grundlage des in Abschn. 5.2 beschriebenen Nachtschutzkonzepts und ist in **Bild 2** dargestellt.

Die Regressionslinie kann zwischen 32,7 dB und 73,2 dB mit einem Polynom zweiten Grades approximiert werden. Die Aufwachwahrscheinlichkeit in % ergibt sich als:

$$P_{AWR} = 1{,}894 \cdot 10^{-3}\, L^2_{AS,max} + 4{,}008 \cdot 10^{-2}\, L_{AS,max} - 3{,}3243 \qquad (2)$$

Die mit dem Polynom ermittelten Reaktionswahrscheinlichkeiten weichen innerhalb des angegebenen Wertebereichs weniger als 0,1 % von der Original-Regressionslinie ab.

Für die Bewertung von fluglärminduzierten Aufwachreaktionen ist neben der Anzahl auch die Dauer der Reaktionen wichtig. Wie bereits näher erläutert, steigt die Wahrscheinlichkeit, sich am nächsten Morgen an eine Aufwachreaktion zu erinnern, mit zunehmender Dauer einer Aufwachreaktion an. Die Ergebnisse der DLR-Laborstudien zeigten, dass die Aufwachdauer u.a. vom Maximalpegel der eingespielten Lärmereignisse abhing. Je lauter ein Geräusch war, desto länger blieben die Versuchpersonen wach (s. **Bild 3**).

Bei Fluggeräuschen mit Maximalpegeln ≤ 65 dB schliefen die Versuchspersonen schnell wieder ein. Nach 1,5 min war deskriptiv kein Unterschied mehr zwischen dem Anteil Wiedereingeschlafener und dem spontan Erwachter zu erken-

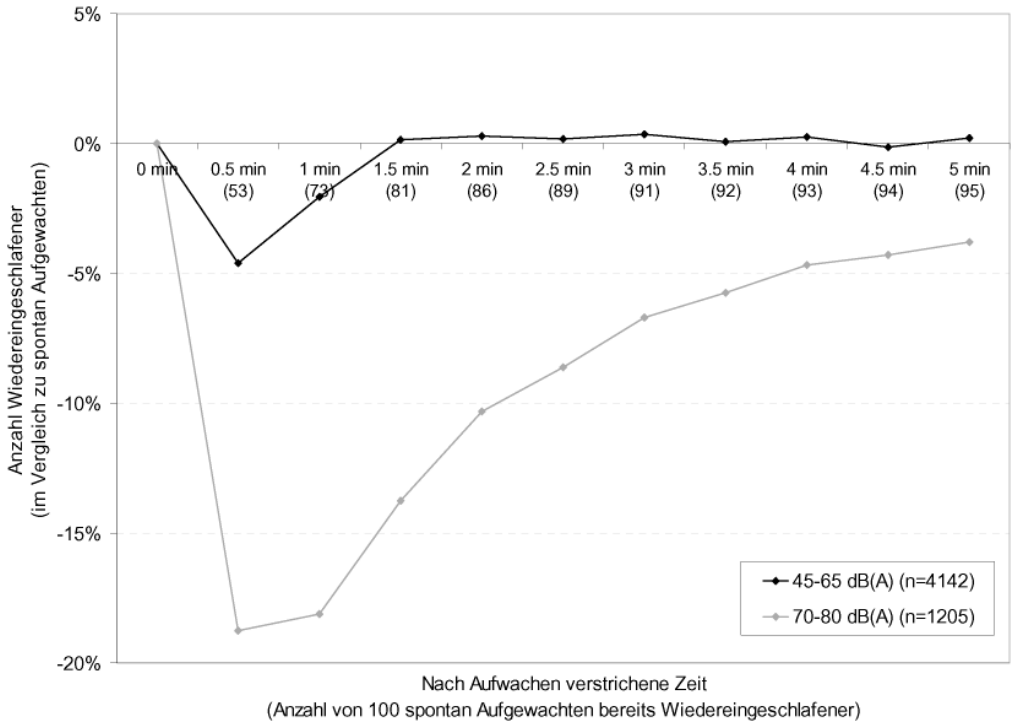

Bild 3. Abhängigkeit der Aufwachdauer vom Maximalpegel des Fluggeräuschs und im Vergleich zu spontanen Aufwachreaktionen.

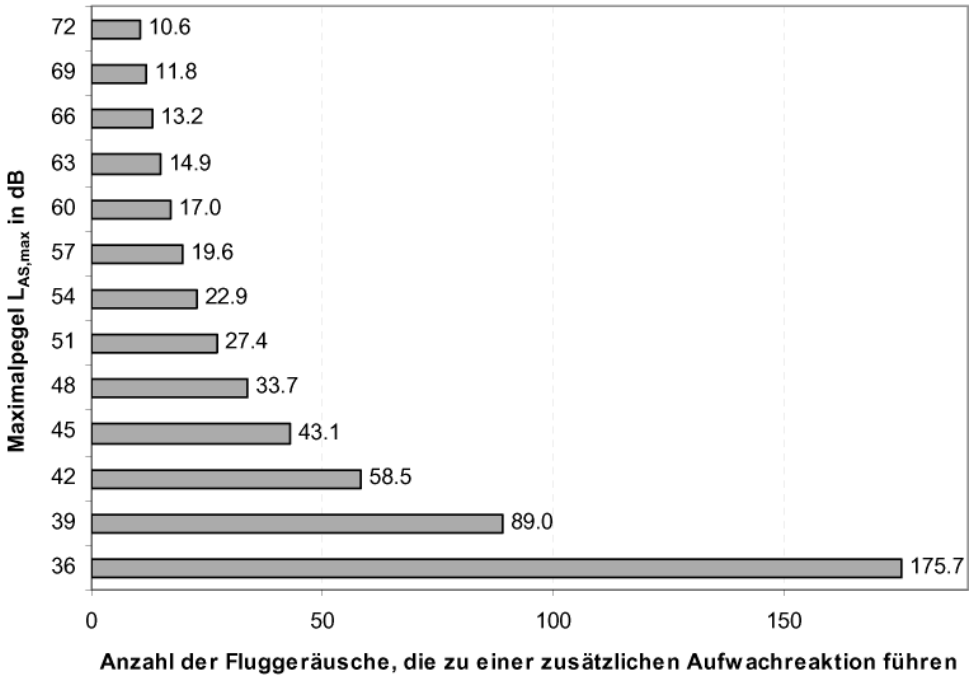

Bild 4. Anzahl der Fluggeräusche, die zu einer zusätzlichen Aufwachreaktion führen, in Abhängigkeit vom Maximalpegel. Ergebnisse basieren auf der in der Feldstudie gefundenen Dosis-Wirkungsbeziehung (s. Bild 2).

nen. Bei Maximalpegeln von 70 dB und mehr ergaben sich dagegen z. T. erhebliche Unterschiede in der Rate der wieder Eingeschlafenen, d. h. es wurden prolongierte Aufwachreaktionen gefunden, die potenziell am nächsten Tag erinnert wurden.

4 Diskussion von Fluglärmschutzkriterien

Aktuell diskutierte Konzepte für den Schutz der Nachtruhe sehen häufig eine Kombination von einem „number above threshold“ (NAT)- und einem L_{eq}-Kriterium vor. An dieser Stelle kann keine ausschöpfende Diskussion von Vor- und Nachteilen dieser Kriterien geliefert werden, es soll jedoch trotzdem kurz auf die Problematik eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung und Diskussion ist dem Bericht von *Isermann* und *Schmid* [22] zu entnehmen.

4.1 NAT-Kriterien

NAT-Kriterien beruhen auf der Annahme, dass unterhalb eines Grenzwerts oder einer Schwelle keine oder nur noch geringe Fluglärmwirkungen auftreten. In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass bei Flughafenanwohnern bereits ab einem $L_{AS,max}$ von ca. 33 dB mit fluglärminduzierten Aufwachreaktionen zu rechnen ist, d. h. erst unterhalb dieser Schwelle wurden keine Reaktionen mehr beobachtet. Aktuelle Vorschläge für NAT-Werte liegen mit 52 bis 55 dB deutlich oberhalb dieser Schwelle, so dass Reaktionen, die durch Fluggeräusche mit Maximalpegeln zwischen der Schwelle und dem vorgeschlagenen NAT-Wert ausgelöst werden, keine Berücksichtigung finden. Theoretisch ist somit eine beliebige Anzahl von Fluggeräuschen unterhalb des NAT-Werts erlaubt, ohne dass das NAT-Kriterium verletzt wird.

In NAT-Kriterien wird zudem lediglich die Anzahl der erlaubten Überschreitungen des NAT-Werts festgelegt, nicht jedoch, wie hoch die einzelnen Überschreitungen ausfallen dürfen. Somit bleibt ein NAT-Kriterium von 4 x 52 dB bei vier Fluggeräuschen mit einem Maximalpegel von 53 dB genauso unverletzt wie bei vier Fluggeräuschen mit einem Maximalpegel von 73 dB. Die Dosis-Wirkungsbeziehung der DLR-Feldstudie zugrunde gelegt (s. Bild 2), ist im ersten Fall jedoch davon auszugehen, dass ca. 16 von 100 Flughafenanwohnern durch die vier Überschreitungen zusätzlich aufwachen, während im letzten Fall bei ca. 39 von 100 Flughafenanwohnern, also bei mehr als doppelt so vielen, mit einer zusätzlichen Aufwachreaktion zu rechnen ist.

4.2 $L_{eq(3)}$-Kriterien

Eine Halbierung der Anzahl der Fluggeräusche bedeutet bei unverändertem Typen-Mix, dass der energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{eq(3)}$ um 3 dB sinkt. Kriterien, die ausschließlich auf dem $L_{eq(3)}$ beruhen, gehen demnach implizit davon aus, dass neben der Energieäquivalenz auch eine Wirkungsäquivalenz vorliegt, d. h. dass eine Verminderung des $L_{eq(3)}$ um 3 dB auch zu einer Halbierung der hervorgerufenen Wirkung führt, also z. B. zu einer Reduktion der Anzahl induzierter Aufwachreaktionen um 50 %.

In **Bild 4** wird anschaulich anhand der Ergebnisse der DLR-Feldstudie dargestellt, dass diese Wirkungsäquivalenz für den Schlaf nicht gegeben ist. In Anlehnung an den in der Epidemiologie häufig benutzten Begriff „numbers needed to harm“ ist hier in Abhängigkeit vom Maximalpegel die Anzahl der Fluggeräusche dargestellt, die genau eine zusätzliche Aufwachreaktion hervorruft, wobei angenommen wurde, dass es sich bei den Fluggeräuschen um voneinander unabhängige Ereignisse handelt.

Eine Reduzierung des Maximalpegels von z. B. 72 dB auf 69 dB erlaubt bei gleicher Wirkung nicht eine Verdoppelung der Anzahl der Fluggeräusche, sondern lediglich eine Zunahme um 11 % von im Mittel 10,6 auf 11,8 Bewegungen. Die prozentuale Zunahme der Anzahl der Bewegungen bei Reduktion des Maximalpegels um 3 dB steigt von 11 % bei einer Senkung des Maximalpegels von 72 auf 69 dB kontinuierlich auf ca. 97 % bei einer Senkung von 39 auf 36 dB, d. h. erst bei

Werten sehr nahe an der Schwelle von 33 dB kann eine Wirkungsäquivalenz hinsichtlich der durch Fluggeräusche induzierten Aufwachreaktionen beobachtet werden.

4.3 Kombination von NAT- und $L_{eq(3)}$-Kriterien

Die Kombination von einem NAT- mit einem $L_{eq(3)}$-Kriterium bietet folgende potenzielle Vorteile:

- Der $L_{eq(3)}$ wird durch laute Geräusche stark beeinflusst. Sollten die Geräusche, die oberhalb des NAT-Werts liegen, deutlich lauter als dieser sein, würde das schnell zu einer Verletzung des $L_{eq(3)}$–Kriteriums führen.
- Die Anzahl der Fluggeräusche mit Maximalpegeln zwischen der Reaktionsschwelle (33 dB) und dem NAT-Wert kann nicht beliebig erhöht werden, ohne das $L_{eq(3)}$-Kriterium zu verletzen. Insbesondere bei hohen Bewegungszahlen wird der $L_{eq(3)}$ das Kombinationskriterium dominieren. Wie schnell eine Verletzung des $L_{eq(3)}$-Kriteriums vorliegt, hängt hierbei natürlich maßgeblich von der Höhe des vorgeschlagenen $L_{eq(3)}$-Grenzwerts ab.

Dennoch werden die oben angesprochenen Probleme der Einzelkriterien durch eine Kombination beider Kriterien nicht vollständig aufgehoben: Hinsichtlich Anzahl und Maximalpegel der Fluggeräusche zwischen Schwelle und NAT-Wert sind verschiedene Konstellationen denkbar, die gerade nicht zur Verletzung des $L_{eq(3)}$–Kriteriums führen, aber dennoch eine relevante Anzahl fluglärminduzierter Aufwachreaktionen hervorrufen (s. Bild 4). In einer Publikation des niederländischen Gesundheitsrats wird davon berichtet, dass sich bei vorgegebenem L_{night} die ungünstigste Situation hinsichtlich eines direkten biologischen Effekts von Einzelschallereignissen auf den Schlaf dann ergibt, wenn die einzelnen Fluggeräusche alle ca. 5 dB über der Effektschwelle liegen [23]. Hierbei handelt es sich um ein – allerdings realitätsfernes – worst case scenario.

4.4 Vorstellung eines wirkungsbezogenen Kriteriums

Wie bereits erläutert, dominieren in den Vorschlägen für Fluglärmschutzkriterien für die Nacht aktuell Kombinationen von NAT- und L_{eq}-Kriterien. Die Umsetzung derartiger Kriterien erfolgt i. d. R. durch Ausweisung von Lärmkonturen, d. h. Kurven, auf denen ein vorgegebener Grenzwert erreicht wird. Für die Ausweisung solcher Konturen – die oft als Schutzzonen interpretiert werden – werden Immissionswerte wie Maximalpegel, Geräuschdauer und Geräuschhäufigkeit in der Umgebung eines Flughafens rechnerisch ermittelt. Grundlage einer solchen Immissionsberechnung ist dabei eine Flugbetriebsprognose, für die Flugbewegungszahlen und Flugzeugmix innerhalb eines bestimmten Bezugszeitraums vorgegeben sind. Lärmkonturen wurden bislang ausschließlich anhand akustischer Parameter ausgewiesen, z. B. durch Bereiche, in denen ein festgelegter $L_{eq(3)}$ überschritten wird (z. B. 50 dB außen) oder in denen ein bestimmter Maximalpegel häufiger als in einer vorgegebenen Anzahl überschritten wird (z. B. 6 x 75 dB außen). Bei der Ausweisung von rein akustischen Schutzgebieten für die Nacht geht man implizit davon aus, dass die Störungen des Schlafs durch Fluglärm außerhalb dieser Gebiete ohne die Anbringung zusätzlichen Schallschutzes zumutbar sind.

Die in dieser Studie ermittelte Dosis-Wirkungsbeziehung für fluglärminduzierte Aufwachreaktionen (s. Bild 2) kann dazu verwendet werden, mithilfe des in der Immissionsprognose bestimmten Maximalpegels wirkungsspezifische Größen explizit auszuweisen.

Die durchschnittliche Anzahl an Aufweckreaktionen an einem bestimmten Immissionsort ergibt sich aus der dort auftretenden Häufigkeitsverteilung der A-bewerteten Maximalschallpegel $n(L_{AS,max})$ als

$$N_{AWR} = \int_{-\infty}^{\infty} f_{AWR}\left(L_{AS,max}\right) \cdot n\left(L_{AS,max}\right) \mathrm{d}L. \qquad (3)$$

Die Funktion f_{AWR} ergibt sich aus Gl. (2) als

$$f_{AWR}\left(L_{AS,max}\right) = \max\left(1{,}894 \cdot 10^{-5} L_{AS,max}^2 + \right.$$
$$\left. + 4{,}008 \cdot 10^{-4} L_{AS,max} - 3{,}3243 \cdot 10^{-2}; 0\right) \qquad (4)$$

Die Maximumfunktion gewährleistet hier, dass unterhalb des bei etwa 33 dB liegenden Schwellenwerts keine negativen Beiträge auftreten. Die Annahme, dass die Funktion f_{AWR} oberhalb des in die Regression eingegangen Maximalwerts von etwa 73 dB noch gültig ist, ist natürlich willkürlich. Allerdings ergibt sich in der Praxis daraus keine Schwierigkeit: Innenpegel dieser Größenordnung treten i. d. R. nur im ohnehin hoch belasteten direkten Nahbereich des Flughafens auf.

Die Anpassung eines Fluglärmberechnungsverfahrens an die rechnerische Ermittlung der durchschnittlichen Anzahl von Aufweckreaktionen stellt dann kein Problem dar, wenn das Verfahren Pegelhäufigkeitsverteilungen liefern kann (wie z. B. das deutsche AzB-Verfahren, das bei dieser Untersuchung benutzt wurde). Allerdings wird in der Praxis eine Pegelhäufigkeitsverteilung i. d. R. durch Pegelklassen einer bestimmten Breite mit dem Klassenmittelwert $L_{AS,max,i}$ realisiert. In diesem Fall geht Gl. (3) in eine Summendarstellung über:

$$N_{AWR} = \sum_{i} f_{AWR}\left(L_{AS,max,i}\right) \cdot n\left(L_{AS,max,i}\right). \qquad (5)$$

Bei einer derartigen Diskretisierung ist mit einem Einfluss der Pegelklassenbreite zu rechnen. Daher wurden bei den

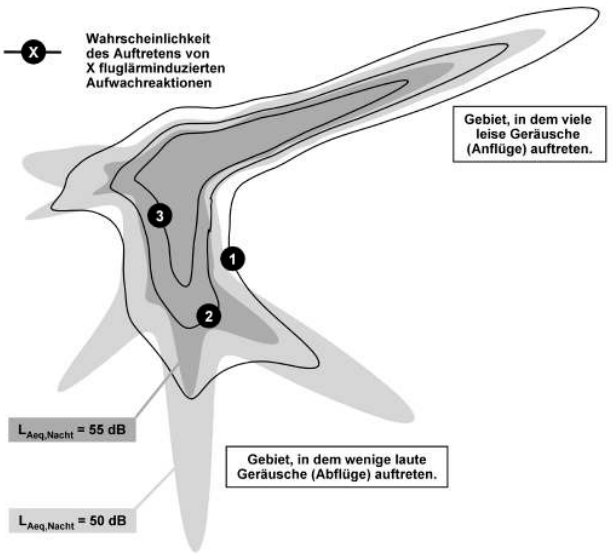

Bild 5. Wirkungsprognose für den Frankfurter Flughafen: im Mittel eine, zwei oder drei zusätzliche Aufwachreaktionen durch Fluggeräusche (schwarze Linien), $L_{eq(3)}$ = 55 dB (dunkelgrau), $L_{eq(3)}$ = 50 dB (hellgrau). Zugrunde liegt ein Flugbetrieb mit etwa 25 000 Nachtbewegungen in den sechs verkehrsreichsten Monaten.

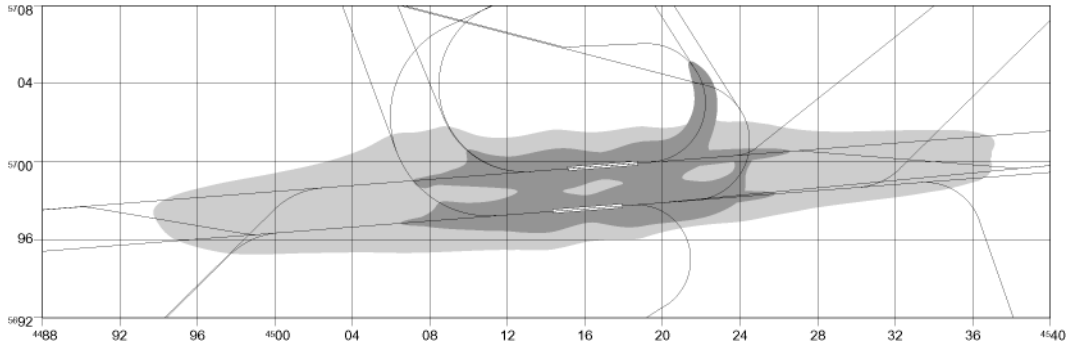

Bild 6. Nachtschutzgebiet für den Flughafen Leipzig/Halle (Planfall 2015), bestehend aus der Kombination von einem Gebiet, außerhalb dessen mit weniger als einer zusätzlichen fluglärminduzierten Aufwachreaktion zu rechen ist (hellgrau, Realverteilung), und einem Gebiet, in dem ein Fluggeräuschmaximalpegel von 80 dB (außen) höchstens einmal erreicht oder überschritten wird (dunkelgrau, 100 : 100).

für diesen Bericht durchgeführten Berechnungen zunächst 0,2 dB Pegelklassen zugrunde gelegt, um Effekte der Klassenbreite zu minimieren. Außerdem wurde – wie in der Praxis bei der Berechung von NAT-Kriterien mittlerweile üblich – von mit einer Standardabweichung von 3 dB normalverteilten Maximalpegeln anstelle der sich aus dem AzB-Formalismus ergebenden diskreten Pegelwerte ausgegangen.

Diese Umsetzung von Gl. (3) ist allerdings nur eine erste Herangehensweise an das Problem. Hinsichtlich der Integration des Formalismus in ein Fluglärmberechnungsverfahren bestehen sicherlich noch Möglichkeiten der Optimierung. Dementsprechende Modelluntersuchungen werden zurzeit durchgeführt.

Mit diesem Verfahren kann für jeden Immissionsort die Anzahl der zusätzlich durch Fluglärm induzierten Aufwachreaktionen prognostiziert und somit das Schutzbedürfnis der betroffenen Bevölkerung besser quantifiziert werden. Dies wird anhand von **Bild 5** verdeutlicht, in dem für den Frankfurter Flughafen zwei auf $L_{eq(3)}$-Kriterien basierende Schutzzonen mit drei Gebieten verglichen wurden, außerhalb derer mit im Mittel weniger als einer, zwei oder drei zusätzlichen Aufwachreaktionen durch Fluglärm zu rechnen ist.

Man erkennt offensichtliche qualitative Unterschiede: Die durch die schwarzen Linien ausgewiesenen Gebiete sind insbesondere in den Bereichen deutlich größer, in denen viele Überflüge mit vergleichsweise geringen Maximalpegeln (Landungen) beobachtet werden, dagegen in Bereichen, in denen eher weniger Überflüge mit vergleichsweise hohen Maximalpegeln stattfinden (Starts), deutlich kleiner. Hierdurch wird bestätigt, dass $L_{eq(3)}$-Kriterien insbesondere in Bereichen mit vielen aber leiseren Geräuschen nicht wirkungsäquivalent sind.

5 Nachtschutzkonzept

5.1 Ziele des Nachtschutzkonzepts

Ziel eines Nachtschutzkonzepts muss es sein, die betroffene Bevölkerung vor den negativen Folgen nächtlichen Fluglärms zu schützen. Die primäre Wirkung nächtlichen Fluglärms liegt in der Störung des Nachtschlafs, dessen regenerative Funktion entsprechend eingeschränkt werden kann. Das kann kurzfristig zu erhöhter Müdigkeit und verminderter Leistungsfähigkeit am Tage führen. Zudem sind Belästigungsreaktionen durch bewusst in der Nacht wahrgenommene Fluggeräusche möglich. Es wird kontrovers diskutiert, ob eine wiederholte lärmbedingte Störung des Nachtschlafs langfristig zu anderen als den o. g. Gesundheitsstörungen führen kann, z. B. zu einer Erhöhung des Herzinfarktrisikos [24 bis 26]. Diese Gesundheitsstörungen wären gesellschafts- und gesundheitspolitisch von erheblicher Bedeutung. Aufgrund multifaktorieller Assoziationen mit anderen Risikofaktoren und langer Induktionszeiten der untersuchten Krankheitsbilder stellt es sich allerdings als ausgesprochen schwierig dar, kausale Zusammenhänge zwischen Verkehrslärm und Gesundheitsstörungen nachzuweisen. Eine Studie, die dieses für nächtlichen Fluglärm zeigen würde, existiert bislang nicht [23].

Um dieses Dilemma zu überwinden, beruht das vorgestellte Nachtschutzkriterium auf zwei Annahmen:

(1) Aufgrund der vorhandenen biologischen Plausibilität wird die Hypothese aufgestellt, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen primär gestörtem Schlaf und langfristigen Gesundheitsstörungen besteht. Im Umkehrschluss ist mit langfristigen Gesundheitsstörungen dann mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr zu rechnen, wenn es gelingt, primäre Schlafstörungen zu minimieren.

(2) Es wird davon ausgegangen, dass es sich beim Menschen – wie bei allen Lebewesen – um ein anpassungsfähiges System in dem Sinne handelt, dass Belastungen in gewissen Grenzen kompensierbar sind, ohne zu nachteiligen Folgen für den Organismus zu führen. Dementsprechend ist es nicht notwendig, Belastungen gänzlich auszuschalten. Gleichzeitig wird angenommen, dass es sehr empfindliche Individuen gibt, die schon geringe Belastungen nicht kompensieren können, genauso wie es sehr robuste Individuen gibt, die starke Belastungen ohne Folgen ertragen.

An dieser Stelle wird betont, dass aus medizinischer Sicht passiver Schallschutz nur als ultima ratio eingesetzt werden sollte. Lärmmindernde Maßnahmen sehr unterschiedlicher Art (z. B. an der Quelle, d. h. am Flugzeug, bei An- und Abflugverfahren etc.) sind Gegenstand intensiver Forschung. Zwar ist eine rasche Umsetzung dieser Forschungsresultate nur begrenzt und mit einigem Zeitverzug möglich, da Entwicklungszyklen und Verfahrensumsetzungen eher mittel- bzw. langfristigen als kurzzeitigen Charakter haben, allerdings kann auch damit gerechnet werden, dass bei einem Planfall 2015 innerhalb der nächsten zehn Jahre flugzeugbezogene und andere Lärmminderungsmaßnahmen zu einigen Verbesserungen bezüglich der Lärmentstehung bzw. zur Lärmvermeidung führen werden [27]. Wenn emissionsseitige Lärmminderungsmaßnahmen durch technische Entwicklungen am Fluggerät konsequent verfolgt und in entsprechende langfristige Schutzkonzepte für verkehrliche und operative Maßnahmen integriert werden, können bodengebundene, immissionsabhängige Schutzmaßnahmen (Schallschutz) diesen angepasst werden.

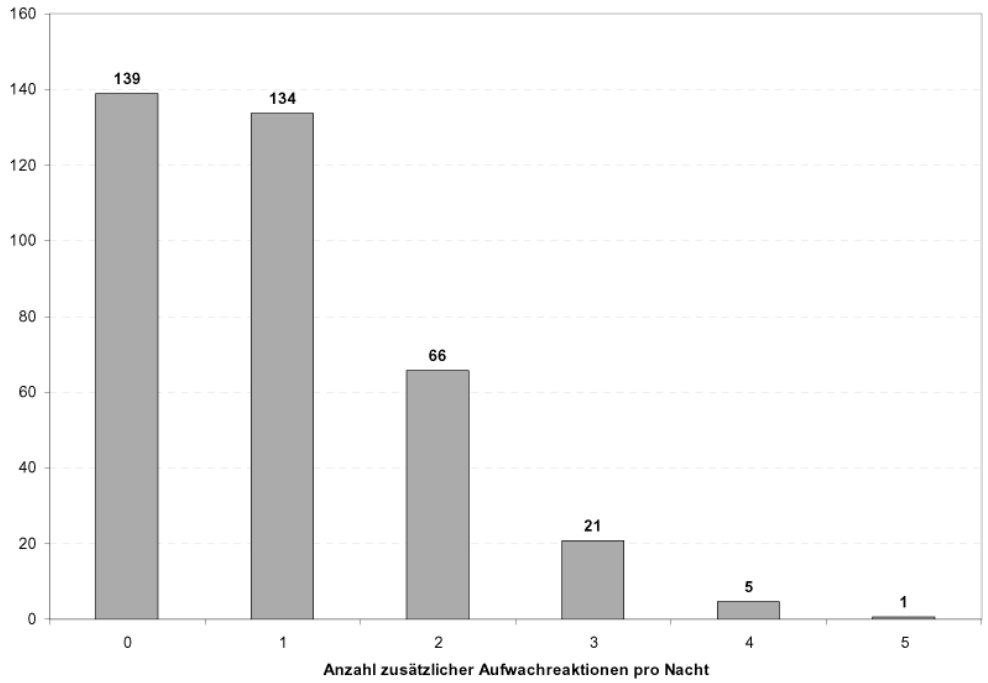

Bild 7. Verteilung der Anzahl zusätzlich durch Fluglärm hervorgerufener Aufwachreaktionen pro Nacht auf das Jahr bei Einhalten des Kriteriums „im Mittel weniger als eine zusätzliche Aufwachreaktion pro Nacht" (hier: 0,98 zusätzliche Aufwachreaktionen pro Nacht).

5.2 Vorstellung des Nachtschutzkonzepts

Grundsätzlich beruht das Schutzkonzept auf drei unterschiedlichen Schutzzielen, die eng miteinander verknüpfte Dimensionen des Nachtschlafs erfassen (s. Abschnitt 2.4):

(1) Im Mittel soll weniger als eine Aufwachreaktion pro Nacht zusätzlich durch Fluglärm induziert werden. Die Definition dieser elektrophysiologisch nachweisbaren Aufwachreaktion ist durch die klassische Methode von *Rechtschaffen* et al. [4] gegeben (siehe Abschn. 2.4).

(2) Fluglärminduziertes erinnerbares Erwachen soll möglichst vermieden werden.

(3) Das Wiedereinschlafen soll trotz Fluglärm möglichst wenig beeinträchtigt werden.

Bild 6 zeigt das für den Flughafen Leipzig/Halle vorgeschlagene Nachtschutzgebiet, welches auf der Prognose für den Planfall 2015 beruht. Es besteht aus der Kombination von zwei Konturen: Außerhalb der hellgrau dargestellten Kontur ist mit im Mittel weniger als einer fluglärminduzierten Aufwachreaktion zu rechnen. Diese Kontur beruht auf der zu erwartenden Realverteilung der Betriebsrichtungen. Außerhalb der dunkelgrau dargestellten Kontur wird ein Fluggeräusch-Maximalpegel von 80 $dB_{außen}$ höchstens einmal erreicht oder überschritten. Diese Kontur beruht auf einer 100 : 100-Verteilung der Betriebsrichtungen.

5.3 Im Mittel weniger als eine fluglärminduzierte Aufwachreaktion pro Nacht

Im Mittel soll pro Nacht weniger als eine Aufwachreaktion zusätzlich durch Fluglärm hervorgerufen werden. Es ist zunächst klar, dass eine Person entweder aufwacht oder nicht, d. h. auf der individuellen Ebene und innerhalb einer Nacht ergeben nicht ganzzahlige Werte für die Anzahl an Aufwachreaktionen keinen Sinn, bei Betrachtung mehrerer Nächte allerdings durchaus. Zur Verdeutlichung: Das Kriterium „weniger als eine Aufwachreaktion pro Nacht" wäre z. B. dann verletzt, wenn der Schläfer 365 mal im Jahr zusätzlich durch Fluglärm geweckt werden würde. Es wäre hingegen nicht verletzt, wenn der Schläfer 364 mal im Jahr zusätzlich durch Fluglärm aufwachte. Das heißt, die Bedingung wäre z. B. gerade dann erfüllt, wenn der Schläfer in 364 Nächten genau einmal und in einer Nacht nicht zusätzlich durch Fluglärm aufwacht. Diese Zahlen müssen vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass im Mittel ca. 24 spontane Aufwachreaktionen pro Nacht bzw. ca. 8 760 spontane Aufwachreaktionen pro Jahr zu erwarten sind [3].

Ob und wie oft ein Flughafenanwohner durch Fluglärm tatsächlich aufwacht, hängt neben dem Flugverkehrsaufkommen und anderen situativen und individuellen Faktoren in der speziellen Nacht letztlich auch vom Zufall ab. So ist es möglich, dass ein Flughafenanwohner in einer Nacht häufiger als einmal zusätzlich durch Fluglärm geweckt wird, z. B. zweimal. Damit das Kriterium nicht verletzt wird, muss gewährleistet sein, dass der Flughafenanwohner in einer anderen Nacht keinmal zusätzlich durch Fluglärm aufwacht, sozusagen um das zweimalige Aufwachen zu kompensieren. Selbiges gilt für eine noch höhere Anzahl von Aufwachreaktionen in einer Nacht: Sollte ein Flughafenanwohner in einer Nacht viermal zusätzlich durch Fluglärm aufwachen, muss dieses durch drei Nächte kompensiert werden, in denen er nicht zusätzlich geweckt wird, damit das Kriterium nicht verletzt wird.

Mit einer Monte-Carlo-Markov-Chain(MCMC)-Simulation wurde überprüft, wie sich die Anzahl der zusätzlich durch Fluglärm induzierten Aufwachreaktionen auf die Nächte eines Jahres verteilt. Hierzu wurden zufällig Fluggeräusche aus der in der Feldstudie gefundenen Maximalpegelverteilung gezogen. Mit der in Bild 2 dargestellten Dosis-Wirkungskurve wurde die zu dem gezogenen Maximalpegel zugehörige Aufwachwahrscheinlichkeit bestimmt. Per Zufallsgenerator wurde in Abhängigkeit von der Aufwachwahrscheinlichkeit ermittelt, ob eine Aufwachreaktion auftrat oder nicht. Dieses Verfahren wurde wiederholt und die Aufwachwahrscheinlichkeiten solange aufaddiert, bis das Kriterium von im Mittel einer zusätzlich durch Fluglärm induzierten Aufwachreaktion gerade nicht verletzt war, d. h. die Reaktion auf das Fluggeräusch, die zu einer Verletzung des Kriteriums führte, wurde nicht mehr gewertet. Mit diesem

Vorgehen wurden insgesamt 1 000 000 Fluglärmnächte simuliert.
Im Mittel wurden mit dieser Methode 0,98 zusätzliche Aufwachreaktionen pro Nacht beobachtet, was zeigt, dass das Kriterium in der Simulation tatsächlich nicht verletzt wurde. Dieser Wert entspricht ca. 358 zusätzlichen Aufwachreaktionen pro Jahr. Die Verteilung der zusätzlichen 358 Aufwachreaktionen auf die 365 Nächte eines Jahres ist in **Bild 7** dargestellt.
In 139 Nächten ist mit keiner, in 134 Nächten mit einer, in 66 Nächten mit zwei und in 21 Nächten mit drei zusätzlich durch Fluglärm hervorgerufenen Aufwachreaktionen zu rechnen. Mit vier oder fünf zusätzlichen Aufwachreaktionen ist extrem selten und mit sechs oder mehr zusätzlichen Aufwachreaktionen praktisch nicht zu rechnen.
Bei diesen Reaktionen handelt es sich um elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen nach der Definition von *Rechtschaffen* et al. [4], die i. d. R. zu kurz sind, um am nächsten Tag erinnert zu werden. Dennoch gilt es aus medizinischer Sicht, fluglärmbedingte Aufwachreaktionen möglichst zu vermeiden [28]. Inwieweit elektrophysiologisch nachweisbare Aufwachreaktionen langfristig zu einer Beeinträchtigung von Gesundheit, Lebensqualität oder psychologischen Veränderungen beitragen, ist bisher nicht geklärt [29]. Da Aufwachreaktionen mit vegetativen Aktivierungsreaktionen (Herzfrequenzbeschleunigung, Blutdruckerhöhung) einhergehen, ist eine Beeinträchtigung des Herz-Kreislauf-Systems im Sinne einer Gesundheitsgefährdung bei langfristigem und wiederholtem Auftreten aber zumindest biologisch plausibel [15]. Es ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings unklar, wie viele zusätzliche durch (Flug-)Lärm induzierte Aufwachreaktionen tolerabel sind, ohne dass es zu mittel- und langfristigen Einschränkungen des Wohlbefindens und der Gesundheit kommt. In Anbetracht der großen Anzahl spontaner Aufwachreaktionen und der hohen Variabilität in verschiedenen Nächten einer Person wird es jedoch aus medizinischer Sicht nicht als notwendig erachtet, zusätzliche Aufwachreaktionen gänzlich zu vermeiden. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass in Gebieten, in denen im Mittel weniger als eine zusätzlich durch Fluglärm hervorgerufene Aufwachreaktion beobachtet wird, eine Gesundheitsgefährdung ausgeschlossen werden kann.

5.4 Erinnerbares Aufwachen

Mit zunehmender Dauer einer Aufwachreaktion steigt gleichzeitig das Risiko, sich am nächsten Morgen an diese Aufwachreaktion zu erinnern. Erinnerbare Aufwachreaktionen korrelieren mit der subjektiven Einschätzung von Schlafqualität und Schlafquantität: Je höher die Anzahl erinnerbarer Aufwachreaktionen, umso schlechter werden Schlafqualität (Feldstudie: $r_{Spearman} = -0{,}316$) und Schlafquantität (Feldstudie: $r_{Spearman} = -0{,}269$) eingeschätzt. Auch spielen in der Schlafperiode auftretende Fluggeräusche nur dann für Belästigungsreaktionen eine Rolle, wenn sie vom Flughafenanwohner bewusst wahrgenommen werden, d. h. wenn dieser das Wachbewusstsein durch eine längere Wachphase wieder erlangt hat [23].
Erinnerbare Aufwachreaktionen stellen somit eine erhebliche Störung des Schlafs dar, da sie, zusätzlich zu einer Fragmentierung des Schlafs, psychologisch nachteilig sind und damit langfristig eine psychosomatische Gesundheitsbeeinträchtigung nicht ausgeschlossen werden kann. Sie müssen daher bei der Beurteilung des durch Fluglärm gestörten Schlafs besondere Beachtung finden. Aus medizinischer Sicht sind zusätzliche durch Fluglärm hervorgerufene erinnerbare Aufwachreaktionen möglichst zu vermeiden.
Durch das im Abschn. 5.3 vorgestellte Kriterium, welches die Anzahl fluglärminduzierter Aufwachreaktionen unabhängig von der Dauer der verursachten Aufwachreaktion definiert, wird gleichzeitig die Anzahl möglicher erinnerbarer Aufwachreaktionen beschränkt. Auch ist ein Großteil der spontanen Aufwachreaktionen zu kurz, um am nächsten Morgen erinnert zu werden. In den Laborstudien wurde jedoch beobachtet, dass sich die Dauer von lärminduzierten Aufwachreaktionen mit steigendem Maximalpegel verlängert (s. a. [3], S. 61). Dieses wurde insbesondere für Maximalpegel > 65 dB beobachtet (s. Bild 3).
Aus diesem Grund sollten im Schlafraum auftretende Maximalpegel von Fluggeräuschen > 65 dB möglichst vermieden werden, da sich das Risiko, dass eine durch Fluglärm mit Maximalpegeln > 65 dB induzierte Aufwachreaktion am nächsten Tag erinnert wird, erheblich erhöht. Für ein gekipptes Fenster, 15 dB Pegeldifferenz zwischen außen und innen vorausgesetzt, bedeutet die in Bild 6 dunkelgrau dargestellte Kontur 1 x 80 $dB_{außen}$, dass außerhalb der Kontur ein Maximalpegel von 65 dB im Mittel höchstens einmal pro Nacht im Schlafraum erreicht oder überschritten wird. Diese Formulierung erinnert grundsätzlich an die Definition des Nachtschutzgebiets aufgrund der in der DLR-Feldstudie gefundenen Dosis-Wirkungsbeziehung (s. Abschn. 5.3). Ziel des 1 x 65 dB_{innen}-Kriteriums ist es, regelmäßig auftretende Maximalpegel von > 65 dB im Schlafraum zu verhindern. Da es gilt, durch Fluglärm hervorgerufene erinnerbare Aufwachreaktionen möglichst zu vermeiden, beruht diese Kontur auf einer 100 : 100-Verteilung der Betriebsrichtungen, ist also auf den worst case abgestellt.
Die Kontur 1 x 65 dB_{innen} erfüllt aber noch einen anderen Zweck: In der Feldstudie wurden innen keine Maximalpegel von Fluggeräuschen über 73,2 dB gemessen. Formal ist die in Bild 2 dargestellte Dosis-Wirkungsbeziehung deshalb nur bis zu Werten von 73,2 dB anwendbar. Gleichzeitig nimmt die Präzision der Dosis-Wirkungsbeziehung im Bereich hoher Maximalpegel aufgrund der geringeren Fallzahlen ab. Durch die Einschränkung, dass Maximalpegel ≥ 65 dB im Schlafraum höchstens einmal pro Nacht erreicht werden dürfen, spielen der eingeschränkte Wertebereich und die etwas geringere Präzision der Dosis-Wirkungsbeziehung im Bereich über 65 dB nur noch eine untergeordnete Rolle.

5.5 Wiedereinschlafen

Das Wiedereinschlafen spielt in der Diskussion und in der Literatur zur Wirkung von Lärm auf den Menschen bisher praktisch keine Rolle. Der Großteil der Analysen befasst sich ausschließlich mit der Wirkung des Lärms auf den Schlafenden. Dabei wird außer Acht gelassen, dass der Schläfer immerhin ca. 7 % der Schlafperiode wach verbringt [30]. In diesen Situationen können Fluggeräusche den Schlaf negativ beeinflussen, indem sie das Wiedereinschlafen behindern. Der Einfluss von Fluglärm auf das Wiedereinschlafen wird in [3] auf S. 63 in Abbildung 5.11 dargestellt.
Für den Prognosefall 2015 werden für den Flughafen Leipzig/Halle in der Nacht, bedingt durch den Frachtumschlag, zwei Zeiträume mit besonders hohem Verkehrsaufkommen prognostiziert: Zwischen 0:00 Uhr und 1:30 Uhr wird mit ca.

60 Landungen pro Stunde und zwischen 4:00 Uhr und 5:30 Uhr mit bis zu 50 Starts pro Stunde gerechnet [31]. Durch den kurzen mittleren Fluggeräuschabstand von ein bis anderthalb Minuten ist das Risiko, dass Flughafenanwohner am Wiedereinschlafen gehindert werden, in diesen Spitzenzeiten besonders hoch. Ist man bereits so lange wach, dass man seine Umgebung bewusst wahrnimmt, können diese Situationen zu starken Belästigungsreaktionen führen. So beschweren sich Flughafenanwohner besonders häufig über in den frühen Morgenstunden auftretende Fluggeräusche. Der zu dieser Uhrzeit verminderte Schlafdruck führt neben niedrigeren Weckschwellen auch dazu, dass es erschwert wird, wieder einzuschlafen, insbesondere wenn vermehrt Geräusche von Flugzeugen auftreten und dann eventuell bewusst wahr genommen werden.

Es bedarf weiterer Analysen, um die Folgen des für den Flughafen Leipzig/Halle prognostizierten Verkehrsaufkommens während der Spitzenzeiten für das Wiedereinschlafen anhand der in der Feldstudie am Flughafen Köln-Bonn ermittelten Daten zu beurteilen. Diese Analysen werden dadurch erschwert, dass der Anteil der Anwohner, der durch ein Fluggeräusch am Einschlafen gehindert wird, wach bleibt und durch weitere Fluggeräusche immer wieder am Einschlafen gehindert werden kann. Im statistischen Sinne handelt es sich nicht mehr um unabhängige, sondern um bedingte Wahrscheinlichkeiten, die sich in Abhängigkeit von der Vorgeschichte ändern können.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Planfeststellungsbeschlusses lagen noch keine Ergebnisse dieser recht komplexen Analyse vor. Um trotzdem das Wiedereinschlafen möglich zu machen, entschied das Regierungspräsidium Leipzig deshalb wie folgt ([1], S. 329): *„Die Planfeststellungsbehörde hat entschieden, dass das Schutzziel, die Gewährung des Wiedereinschlafens bei Fluglärm, erfüllt sein muss. Aufgrund der vorliegenden Kenntnislücke hat sie deshalb zunächst pragmatisch die erforderliche Pegeldifferenz in dem Bereich, der durch die Kontur der Pegeldifferenz von 25 dB(A) gekennzeichnet ist, um 3 dB(A) erhöht. Sie hat sich ferner die Planergänzung vorbehalten, sobald auch hierzu eine Empfehlung des DLR aufgrund der empirischen Untersuchung des DLR vorliegt.“*

Die Analysen zum Wiedereinschlafen sind noch nicht abgeschlossen. Die Ergebnisse der Analyse des Wiedereinschlafens werden auf einem Modell beruhen, in dem auf Basis der in der Feldstudie erzielten Ergebnisse zwischen zwei Zuständen unterschieden wird: Wach und Schlaf. Die Übergänge zwischen diesen beiden Zuständen sind variabel. Folgende Einflüsse auf die Übergangswahrscheinlichkeiten werden im Modell berücksichtigt: Maximalpegel $L_{AS,max}$ des Fluggeräuschs, verstrichene Schlafzeit, Art des aktuellen Zustands (Wach/Schlaf) und die im gleichen Zustand verbrachte Zeit. Aus diesem Modell sollen die Wahrscheinlichkeiten für fluglärmbedingte Hindernisse für das Wiedereinschlafen auch hinsichtlich erinnerbarer Wachzeiten prognostiziert werden. Es stellt sich dabei auch die Frage, ob eine Beschränkung der Anzahl fluglärminduzierter Aufwachreaktionen und das Kriterium 1 x 80 $dB_{außen}$ ausreichen, um ein möglichst ungestörtes Wiedereinschlafen zu gewährleisten. Die Ergebnisse dieser Analyse und die daraus abgeleiteten Empfehlungen werden gesondert veröffentlicht.

5.6 Präventivmedizinische Maßnahmen für die praktische Anwendung des Schutzkonzepts

Die Teilnehmer der Feldstudie wurden in einem mehrstufigen Auswahlprozess bestimmt, in dem Bewerber, welche die Auswahlkriterien der Studie nicht erfüllten, von einer Teilnahme ausgeschlossen wurden. Aus diesem Grund war die untersuchte Population nicht vollständig repräsentativ für die Population, auf die die Studienergebnisse übertragen werden sollen.

Einige Interessensgruppen argumentieren, dass sich für die Teilnahme an den DLR-Studien grundsätzlich nur junge, gesunde und besonders lärmunempfindliche Freiwillige zur Verfügung stellten. Diesen Eindruck können wir nach Durchführung der Studien nicht bestätigen. Überdurchschnittlich viele Versuchspersonen nahmen an der Studie teil, weil sie auf den nächtlichen Fluglärm empfindlich reagierten und sich durch diesen belastet und belästigt fühlten. 13 % der Feldstudienteilnehmer beschwerten sich vor der Studie mindestens einmal schriftlich beim Flughafenbetreiber über den Fluglärm. 19 % der Teilnehmer nahmen mindestens einmal bei einer Unterschriftenaktion oder Demonstration gegen Fluglärm teil. Der Anteil der Feldstudienteilnehmer, die sich vor der Studie mittel, stark oder sehr stark durch Fluglärm belästigt fühlten, betrug 75 %, im Vergleich zu 15 % einer im Jahr 2000 erhobenen repräsentativen Bevölkerungsstichprobe [32]. Der Selektionsprozess hat demnach, zum Teil beabsichtigt, eher in Richtung einer Selektion von Lärmbetroffenen und Lärmempfindlichen stattgefunden.

Die Ausschlusskriterien für die Feldstudie wurden aufgestellt, um zu gültigen Ergebnissen für die Gruppe der untersuchten Versuchspersonen zu gelangen. Diese interne Validität ist Voraussetzung für die Übertragung der Ergebnisse auf eine größere Grundgesamtheit von durch nächtlichen Fluglärm belasteten Menschen (externe Validität). Zudem sollten Menschen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit bei gleichem Maximalpegel weniger stark auf Fluglärm reagieren, von der Studienteilnahme ausgeschlossen werden. Dabei handelt es sich um einen konservativen Ansatz im Sinne der betroffenen Bevölkerung. Es macht z. B. wenig Sinn, Schwerhörige in die Untersuchung einzuschließen, da sie mit hoher Sicherheit bei gleichem Maximalpegel mit geringerer Wahrscheinlichkeit auf ein Fluggeräusch reagieren als Hörgesunde.

Die einzelnen Auswahlkriterien sollen an dieser Stelle nicht im einzelnen kommentiert werden. Ein genauere Besprechung findet sich in [3], S. 7-10. Die Relevanz einer eingeschränkten Bevölkerungsrepräsentativität wird insbesondere aus zwei Gründen in Frage gestellt: Zum einen bedeutet eine eingeschränkte Bevölkerungsrepräsentativität nicht, dass diejenigen, für die die Studienpopulation nicht repräsentativ war, automatisch empfindlicher auf nächtlichen Fluglärm reagieren. Wie bereits näher erläutert, zielten einige Auswahlkriterien darauf, besonders unempfindliche Bewerber von der Untersuchung auszuschließen. Zum anderen wurden in der Versuchsanordnung der DLR-Studie und ergänzend bei der Aufstellung des Nachtschutzkriteriums im Planfeststellungsbeschluss Maßnahmen ergriffen, um auch Teile der Bevölkerung zu schützen, für die die Studienpopulation primär nicht repräsentativ war:

- Der Schlaf wurde mit der empfindlichen Methode der Polysomnographie untersucht. Studien, die eine Signalisierung des Wachseins durch den Probanden erfordern (sog.

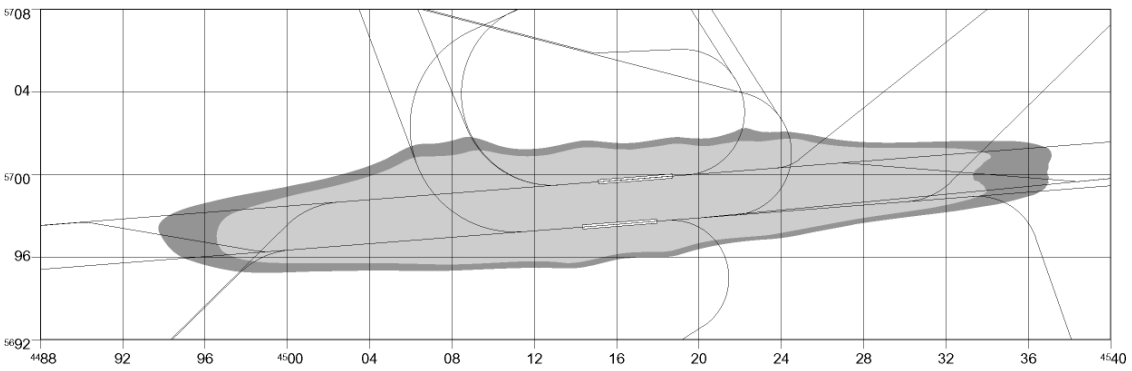

Bild 8. Gebiete außerhalb derer im Mittel mit weniger als einer zusätzlichen fluglärminduzierten Aufwachreaktion zu rechnen ist. Vergleich von präventivmedizinischem Ansatz (Schlafstadium S2, Mitte 2. Nachthälfte, äußeres Gebiet) mit einem Ansatz, der auf den in der Stichprobe gefundenen Daten beruht (inneres Gebiet). Durch den präventivmedizinischen Ansatz wird das Schutzgebiet um 28 % (entspricht 43 km²) vergrößert.

Drückermethode), gehen mit geringeren Reaktionswahrscheinlichkeiten einher [33].

- Als Indikator für eine Störung des Schlafs wurde nicht nur ein Wechsel in das Stadium Wach, sondern auch ein Schlaftiefenwechsel in das oberflächliche Schlafstadium S1 gewählt (s. Abschn. 2.4).
- Bei der Berechnung der Dosis-Wirkungskurve, auf der das Nachtschutzgebiet beruht, wurde davon ausgegangen, dass sich der Schläfer in der gesamten Nacht im oberflächlichen Schlafstadium (S2) und in der Mitte der empfindlicheren zweiten Nachthälfte befindet. In der Realität besteht eine normale Nacht nur zu etwa 50 % aus Schlafstadium S2. Hierdurch kommt es zu einer Verschiebung der Dosis-Wirkungskurve zu höheren Aufwachwahrscheinlichkeiten, als wenn die reale Schlafstadienverteilung zugrunde gelegt würde. Allein diese Maßnahme führt dazu, dass sich das Schutzgebiet von 156 km² um 28 % auf 199 km² vergrößert (s. **Bild 8**).
- Das untersuchte Lärmfenster wurde in der Feldstudie mit 90 s so gewählt, dass der Anteil fluglärminduzierter Aufwachreaktionen maximiert wurde.
- Es wurden vorwiegend Versuchspersonen für die Studie ausgesucht, die sich vor der Studie stärker durch Fluglärm belästigt fühlten (s. o.). In den Laborstudien konnte gezeigt werden, dass diese Menschen bei gleichen Maximalpegeln häufiger aufwachen als Menschen, die sich nicht oder nur wenig durch Fluglärm belästigt fühlen [3].
- Versuchspersonen mit Gesundheitszuständen, bei denen von einer geringeren Lärmempfindlichkeit auszugehen war (z. B. Hypakusis, Hypersomnie), wurden von einer Studienteilnahme ausgeschlossen.
- Für die Berechnung des Nachtschutzgebiets wurden die sechs verkehrsreichsten Monate zugrunde gelegt.
- Schutzbedürftigen Einrichtungen und schwer erkrankten Privatpersonen wird ein zusätzlicher Schutz durch Erhöhung des erforderlichen Schalldämmmaßes um 3 dB gewährt.
- Die Empfehlung, im Mittel weniger als eine zusätzlich durch Fluglärm hervorgerufene Aufwachreaktion pro Nacht zuzulassen, ist präventivmedizinisch sinnvoll. Sie ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass 24 spontan auftretende Aufwachreaktionen pro Nacht auftreten.

Gleichzeitig wird betont, dass durch die aufgestellten Schutzkriterien jenen, die nicht in unmittelbarer Nähe der Grenzlinie einer Schutzzone wohnen, zusätzlicher Schutz gewährt wird: Eine Person, deren Wohnhaus gerade in ein Schutzgebiet fällt, erhält einen Lüfter, der es ihr erlaubt, die Fenster während der Nacht zu schließen. Hierdurch kommt es zu einer zusätzlichen Dämpfung von ca. 10 dB, und die Wahrscheinlichkeit, durch Fluggeräusche geweckt zu werden, sinkt entsprechend der in Bild 2 dargestellten Dosis-Wirkungsbeziehung sprunghaft. Mit Annäherung an den Flughafen wächst die Aufwachwahrscheinlichkeit dann wieder langsam, bis der Einbau von besserem Schallschutz erforderlich wird, usw.

In der DLR-Feldstudie wurden 64 Versuchspersonen im Alter von 19 bis 61 Jahren in neun aufeinander folgenden Nächten untersucht. Insgesamt wurden 576 Probandennächte erfasst. Feldstudien zum Thema Fluglärm und Schlaf, in denen die empfindliche Polysomnographie zum Einsatz kam, sind rar. Sie sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

Vallet [36] publizierte 1980 Ergebnisse einer polysomnographischen Feldstudie zum Thema Fluglärm und Schlaf, in der 40 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 55 Jahren für vier aufeinanderfolgende Nächte untersucht wurden (160 Probandennächte). *Flindell* et al. [34] untersuchten 18 Versuchspersonen im Alter zwischen 30 und 40 Jahren in fünf aufeinanderfolgenden Nächten im Feld (90 Probandennächte). Die Autoren bezeichnen ihre Studie als eine Pilotstudie für

Studie	Anzahl Probanden	Anzahl Nächte	Altersbereich (Jahre)
Basner et al. 2004 [3]	64	576	19 bis 61
Hume et al. 2003 [12; 18]	46	178	20 bis 70
Flindell et al. 2000 [34]	18	90	30 bis 40
Ehrenstein et al. 1982 [35]	3	30–45	8 bis 10
Vallet et al. 1980 [36]	40	160	20 bis 55

Tabelle 2. Übersicht über Feldstudien zum Einfluss von Nachtfluglärm auf den Schlaf, in denen die Polysomnographie eingesetzt wurde. In der von *Hume* at al. publizierten Studie wurde der Schalldruckpegel nur außen registriert.

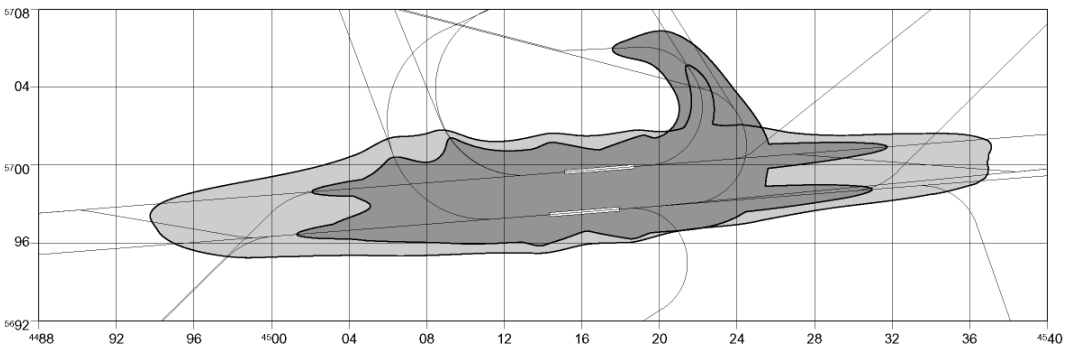

Bild 9. Vergleich von einem Gebiet, in dem 13 x 68 $dB_{außen}$ überschritten werden (dunkelgrau, 100 : 100, 129 km²), mit dem auf den Ergebnissen der DLR-Studie beruhenden Nachtschutzgebiet (hellgrau, 199 km²) für den Flughafen Leipzig/Halle.

eine eventuelle Erweiterung der Studie von *Ollerhead* et al. [12]. *Ehrenstein* [35] führte eine Feldstudie an drei Kindern im Alter von 8 bis 10 Jahren in der Umgebung des Münchener Flughafens durch. Da hier nach 21:30 Uhr praktisch kein Flugverkehr mehr stattfand, konnten nur die Zeiträume zwischen 20:00 Uhr und 21:30 Uhr hinsichtlich Fluglärm ausgewertet werden. *Ollerhead* et al. [12] führten eine Feldstudie mit Aktometern in der Umgebung von verschiedenen britischen Verkehrsflughäfen durch. 46 Versuchspersonen wurden in insgesamt 178 Probandennächten zusätzlich polysomnographisch untersucht. Die Auswertung der Polysomnographiedaten wurde 2003 von *Hume* et al. [18] publiziert. Der Schalldruckpegel wurde allerdings nicht im Schlafraum gemessen, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse stark eingeschränkt wird. In keiner der Studien wurden nicht gesunde Versuchspersonen untersucht.

6 Schlussfolgerungen

Von 1999 bis 2004 führte das DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin im Rahmen des DLR/HGF-Projekts „Leiser Flugverkehr“ umfangreiche Feldstudien zum Einfluss von Nachtfluglärm auf den Schlaf des Menschen durch, in denen der Schlaf mit der empfindlichen Methode der Polysomnographie gemessen wurde. Der in der Studie ermittelte Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel eines Fluggeräuschs und der Wahrscheinlichkeit aufzuwachen wurde genutzt, um ein wirkungsbezogenes Schutzkonzept aufzustellen. Vorteile eines solchen Schutzkonzepts gegenüber NAT-Kriterien, L_{eq}-Kriterien und Kombinationen aus NAT-Kriterien und L_{eq}-Kriterien wurden diskutiert.
Es ist vorgesehen, den Flughafen Leipzig/Halle zu einem Fracht-Hub auszubauen. Ein Großteil der Flugbewegungen wird in der Nacht erfolgen. Gleichzeitig soll der Flugbetrieb in der Nacht keinen Beschränkungen unterliegen, so dass in Spitzenzeiten mit bis zu 60 Flugbewegungen pro Stunde zu rechnen ist. Diese besonderen Gegebenheiten erfordern ein besonderes Konzept, um die Bevölkerung vor den negativen Folgen des nächtlichen Fluglärms zu schützen.
Das Regierungspräsidium Leipzig entschied sich dazu, die Forschungsergebnisse der DLR-Feldstudien für das Nachtschutzkonzept zu nutzen. Das Schutzkonzept beruht auf drei Säulen: Im Mittel soll weniger als eine zusätzliche Aufwachreaktion pro Nacht durch Fluglärm hervorgerufen werden, fluglärminduziertes erinnerbares Erwachen soll möglichst vermieden werden und das Wiedereinschlafen soll trotz Fluglärm möglichst unbeeinträchtigt sein.
Mit der Entscheidung für die Nutzung der DLR-Studienergebnisse wurde Neuland betreten, da bis zum damaligen Zeitpunkt ausschließlich akustische Kriterien für die Ausweisung von Schutzzonen benutzt wurden. Durch die Anwendung der DLR-Studienergebnisse vergrößerte sich die Nachtschutzzone im Vergleich zu einem Gebiet, das im im Auftrag des Flughafens erstellten lärmmedizinischen Gutachten vorgeschlagen wurde [37], um 55 % von 129 km² auf 199 km² (s. **Bild 9**). Dies wird mit entsprechenden finanziellen Mehrbelastungen des Flughafens bei der Installation von Schallschutz einhergehen. Gleichzeitig sind qualitative Unterschiede in der Form der Schutzzonen zu erkennen, die in Abschn. 4.4 begründet wurden.
Es wird an dieser Stelle betont, dass das Regierungspräsidium nicht zwischen richtig und falsch zu entscheiden hatte. Die im lärmmedizinischen Gutachten geäußerten Vorschläge beruhen auf einer sorgfältigen Analyse der zum Zeitpunkt der Erstellung verfügbaren wissenschaftlichen Literatur. Die Entscheidung des Regierungspräsidiums zur Nutzung der DLR-Feldstudienergebnisse muss deshalb vielmehr als ein Schritt betrachtet werden, die umfangreichen und neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse der DLR-Studie bewusst zu nutzen, um das Schutzniveau der betroffenen Bevölkerung zu erhöhen und damit der speziellen Situation des Flughafens Leipzig/Halle gerecht zu werden.

Literatur

[1] Planfeststellungsbeschluss für das Vorhaben Ausbau des Verkehrsflughafens Leipzig/Halle Start-/Landebahn Süd mit Vorfeld. Regierungspräsidium Leipzig, Leipzig, Az.: 14-0513.20-10/14, 4-11-2005.

[2] *Kastner, M.*: Ausbau Verkehrsflughafen Leipzig/Halle – Stellungnahme zu den medizinischen und psychologischen Auswirkungen des Fluglärms. Institut für Arbeitspsychologie und Arbeitsmedizin, Dortmund 2004.

[3] *Basner, M.; Buess, H.; Elmenhorst, D.; Gerlich, A.; Luks, N.; Maaß, H.; Mawet, L.; Müller, E. W.; Müller, U.; Plath, G.; Quehl, J.; Samel, A.; Schulze, M.; Vejvoda, M.; Wenzel, J.*: Nachtfluglärmwirkungen (Bd. 1): Zusammenfassung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), FB2004–07/D. Köln 2004.

[4] *Rechtschaffen, A.; Kales, A.; Berger, R. J.; Dement, W. C.; Jacobsen, A.; Johnson, L. C.; Jouvet, M.; Monroe, L. J.; Oswald, I.; Roffwarg, H. P.; Roth, B.; Walter, R. D.:* A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects. Hrsg.: Public Health Service, U.S. Government. Washington, D.C. 1968.

[5] *Williams, H. L.; Hammack, J. T.; Daly, R. L.; Dement, W. C.; Lubin, A.:* Responses to auditory stimulation, sleep loss and the EEG stages of

sleep. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology 16 (1964) S. 269-279.

[6] *Bonnet, M. H.*: Performance and sleepiness following moderate sleep disruption and slow wave sleep deprivation. Physiol.Behav. 37 (1986) Nr. 6, S. 915-918.

[7] *Wesensten, N. J.; Balkin, T. J.; Belenky, G.*: Does sleep fragmentation impact recuperation? A review and reanalysis. J.Sleep Res. 8 (1999) Nr. 4, S. 237-245.

[8] Wie schädlich ist Fluglärm? Die DLR-Studie zu akuten Schlafstörungen in der Kontroverse. VCD Tagungsband zur Tagung am 16. Juli 2004 in Bonn.

[9] EEG arousals: scoring rules and examples: a preliminary report from the Sleep Disorders Atlas Task Force of the American Sleep Disorders Association. Sleep 15 (1992) Nr. 2, S. 173-184.

[10] *Halasz, P.; Terzano, M.; Parrino, L.; Bodizs, R.*: The nature of arousal in sleep. J.Sleep Res. 13 (2004) Nr. 1, S. 1-23.

[11] *Rühle, K. H.; Raschke, F.; Hein, H.*: Arousals: Aktueller Stand, Klinische Bedeutung und offene Fragen. Somnology 5 (2001) Nr. 1, S. 24-45.

[12] *Ollerhead, J. B.; Jones, C. J.; Cadoux, R. E.; Woodley, A.; Atkinson, B. J.; Horne, J. A.; Pankhurst, F. L.; Reyner, L. A.; Hume, K.; Van, F.; Watson, A.; Diamond, I. D.; Egger, P.; Holmes, D.; McKean, J.*: Report of a Field Study of Aircraft Noise and Sleep Disturbance. 1992.

[13] *Mathur, R.; Douglas, N. J.*: Frequency of EEG arousals from nocturnal sleep in normal subjects. Sleep 18 (1995) Nr. 5, S. 330-333.

[14] *Raschke, F.*: Arousals bei Fluglärm – umweltbedingte Schlaf- und Gesundheitsstörungen aus schlafmedizinischer Sicht. In: *Bartels, K. H.; Ising, H.*: Nachtfluglärmproblematik. 1, S. 56-69. Berlin: Eigenverlag WaBoLu 2001.

[15] *Sforza, E.; Chapotot, F.; Lavoie, S.; Roche, F.; Pigeau, R.; Buguet, A.:* Heart rate activation during spontaneous arousals from sleep: effect of sleep deprivation. Clin. Neurophysiol. 115 (2004) Nr. 11, S. 2442-2451.

[16] *Morrell, M. J.; Finn, L.; Kim, H.; Peppard, P. E.; Badr, M. S.; Young, T.:* Sleep fragmentation, awake blood pressure, and sleep-disordered breathing in a population-based study. Am. J. Respir. Crit Care Med. 162 (2000) Nr. 6, S. 2091-2096.

[17] *Haba-Rubio, J.; Ibanez, V.; Sforza, E.*: An alternative measure of sleep fragmentation in clinical practice: the sleep fragmentation index. Sleep Med. 5 (2004) Nr. 6, S. 577-581.

[18] *Hume, K.; Van, F.; Watson, A.:* Effects of aircraft noise on sleep: EEG-based measurements. Manchester Metropolitan University 2003.

[19] *Griefahn, B.; Felscher-Suhr, U.; Höger, R.; Jedrusik, P.; Müller, J.; Schreckenberg, D.*: Erarbeitung von Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept – Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvertrag zwischen IfADo und Flughafen Frankfurt Main AG. 2001.

[20] *Hosmer, D. H.; Lemeshow, S.:* Applied Logistic Regression. 2nd Ed. New York: Wiley & Sons 2000.

[21] *Agnew, H. W., Jr.; Webb, W. B.; Williams, R. L.*: The first night effect: an EEG study of sleep. Psychophysiology 2 (1966) Nr. 3, S. 263-266.

[22] *Isermann, U.; Schmid, R.*: Bewertung und Berechnung von Fluglärm – Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. 1999.

[23] Effects of noise on sleep and health. Hrsg.: Health Council of the Netherlands. Publication no. 2004/14. The Hague 2004.

[24] *Babisch, W:* Traffic noise and cardiovascular disease: epidemiological review and synthesis. Noise and Health 2(2000) Nr. 8, S. 9-32.

[25] *Babisch, W.; Beule, B.; Schust, M.; Kersten, N.; Ising, H.*: Traffic noise and risk of myocardial infarction. Epidemiology 16 (2005) Nr. 1, S. 33- 40.

[26] *Morrell, S.; Taylor, R.; Lyle, D.:* A review of health effects of aircraft noise. Australian and New Zealand Journal of Public Health 21 (1997) Nr. 2, S. 221-236.

[27] *Isermann, U.*: Leiser Flugverkehr – Zusammenfassender Projekt-Abschlussbericht. 2004.

[28] *Akerstedt, T.; Billiard, M.; Bonnet, M.; Ficca, G.; Garma, L.; Mariotti, M.; Salzarulo, P.; Schulz, H.*: Awakening from sleep. Sleep Medicine Reviews 6 (2002) Nr. 4, S. 267-286.

[29] *Cluydts, R.*: Comparing the effects of sleep loss after experimental sleep deprivation and in clinical patients. Sleep Medicine Reviews 7 (2003) Nr. 4, S. 293-295.

[30] *Basner, M.; Samel, A.*: Effects of nocturnal aircraft noise on sleep structure. Somnology 9 (2005) Nr. 2, S. 84-95.

[31] Start- und Landebahn Süd mit Vorfeld – Darstellung der Spitzenstunden 2015 High-Case in Form eines Flugplans. Flughafen Leipzig/Halle GmbH, Sst. Lärm-/Umweltschutz. Leipzig 2004.

[32] *Ortscheid, J.; Wende, H.:* Lärmbelästigung in Deutschland – Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage. Z. Lärmbekämpf. 49 (2002) Nr. 2, S. 41-45.

[33] Quantities and procedures for description and measurement of environmental sound – part 6: methods for estimation of awakenings associated with aircraft noise events heard in homes. American National Standard, ANSI S12.9–2000/Part 6, 2000.

[34] *Flindell, I.; Bullmore, A.; Robertson, K.; Wright, N.; Turner, C.; Birch, C.; Jiggins, M.; Berry, B.; Davison, M.; Dix, M.*: Aircraft Noise and Sleep 1999 UK Trial Methodology Study. ISRV Consultancy Services, United Kingdom, Ref: 6131 R01, 2000.

[35] *Ehrenstein, W.; Schuster, M.; Müller-Limroth, W.*: Felduntersuchungen über Wirkungen von Lärm auf den schlafenden Menschen. 1982.

[36] *Vallet, M.; Gagneux, J. M.; Simonet, F.:* Effects of aircraft noise on sleep: an in situ experiment. ASHA reports No. 10, 1980.

[37] *Scheuch, K.; Jansen, G.*: Lärmmedizinisches Gutachten für das Vorhaben Flughafen Leipzig/Halle GmbH. 2004.