

Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Fluglärms: aktueller Wissensstand (Literaturlauswertung)

Rainer Guski (Ruhr-Universität Bochum)

Mathias Basner (University of Pennsylvania)

Mark Brink (ETH Zürich)

Im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Bochum, Fakultät für Psychologie der Ruhr-Universität, am 27.09.2012

Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Fluglärms: aktueller Wissensstand (Literatúrauswertung)

Rainer Guski (Ruhr-Universität Bochum)

Mathias Basner (University of Pennsylvania)

Mark Brink (ETH Zürich)

Im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Bochum, am 27.09.2012

1	EINFÜHRUNG	3
1.1	ÜBERSICHT ÜBER DIE DURCHFÜHRTE LITERATURRECHERCHEN.....	3
1.2	MÖGLICHER BEITRAG DER LÄRMWIRKUNGSFORSCHUNG ZUM LÄRMSCHUTZ	4
1.3	EINFÜHRUNG INS THEMA SCHLAF	6
1.3.1	<i>Funktion und Bedeutung des Schlafs</i>	6
1.3.2	<i>Indikatoren des gestörten Schlafs im Kontext von Lärmwirkungsstudien</i>	8
1.4	CHARAKTERISIERUNG DES (NÄCHTLICHEN) FLUGLÄRMS.....	13
1.4.1	<i>Fluglärm: Emission, Messung und Berechnung</i>	13
1.4.2	<i>Charakter der Fluglärm-Immission / Besonderheiten des Fluglärms</i>	14
1.4.3	<i>Der Dauerschallpegel L_{eq} und andere Beschreibungsmasse zur Prognose nächtlicher Fluglärm-Wirkungen</i>	15
2	DARSTELLUNG DES AKTUELLEN WISSENSSTANDS	22
2.1	AKUTE WIRKUNGEN VON FLUGLÄRM AUF DEN SCHLAF U. FOLGEWIRKUNGEN FLUGLÄRMGESTÖRTEN SCHLAFS AM TAG 23	
2.1.1	<i>Literaturübersicht zu den akuten Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf und zu den Folgewirkungen fluglärmgestörten Schlafs am Tag</i>	26
2.2	LANGZEITFOLGEN NÄCHTLICHER LÄRMBELASTUNG.....	35
2.2.1	<i>Übersichtsarbeiten</i>	38
2.2.2	<i>Originalstudien I: Studien mit Kindern</i>	40
2.2.3	<i>Originalstudien II: Kardiovaskuläre Effekte (Blutdruck, Hypertonie, Herzinfarkt)</i>	44
2.2.4	<i>Originalstudien III: Medikamentengebrauch und Medikamentenverschreibung</i>	48
2.2.5	<i>Originalstudien IV: Endokrine Biomarker</i>	50
2.2.6	<i>Zusammenfassung Abschnitt 2.2</i>	51
2.3	BELÄSTIGUNG DURCH FLUGLÄRM IN DER NACHT UND ZU RANDZEITEN	52
2.4	AUSWIRKUNGEN UNTERSCHIEDLICHER NÄCHTLICHER FLUGBETRIEBSBESCHRÄNKUNGEN AUF DEN SCHLAF	54
2.4.1	<i>Das durchschnittliche Schlafverhalten der mitteleuropäischen Bevölkerung</i>	55
2.4.2	<i>Störungen des Nachtschlafs in den frühen Morgenstunden</i>	58
2.4.3	<i>Spitzenstunden der Lärmbelastung der Betroffenen am Abend</i>	59
3	WISSENSCHAFTLICHES FAZIT	61
4	ZUSAMMENFASSUNG	65
5	LITERATUR	69

1 Einführung

Vergleicht man die in systematischen Bevölkerungsbefragungen zur Störung und Belästigung durch Verkehrslärm erhobenen Angaben der Betroffenen von Fluglärm, Straßenverkehrs- und Eisenbahnlärm untereinander, so stellt sich regelmäßig heraus, dass der Fluglärm bei vergleichbaren energieäquivalenten Dauerschallpegeln die höchsten Belästigungswerte erreicht (Miedema & Oudshoorn, 2001). Wenn der Flughafen Nachtbetrieb aufweist, dann gehört nächtlicher Fluglärm zu denjenigen Störungen, die in der Bewertung durch die Betroffenen einen besonders hohen Rang einnehmen. So zeigte sich in einer Untersuchung der Lärmbeschwerden am Flughafen Manchester (Hume, Gregg, Thomas & Terranova, 2003), dass etwa doppelt so viele Beschwerden die Zeitspanne zwischen 23:00 und 06:00 Uhr betrafen als zwischen 06:00 und 23:00 Uhr. Das Nachtflugproblem wird auch dadurch verschärft, dass sich in epidemiologischen Untersuchungen zunehmend statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen der 24-Stunden-Lärmbelastung und Krankheitsrisiken zeigen, wobei dem nächtlichen Lärm oft eine besonders hohe Bedeutung zukommt – beispielsweise hinsichtlich Bluthochdruck unter Fluglärm-Belastung (Jarup, Babisch, Houthouijs et al., 2008).

1.1 Übersicht über die durchgeführten Literaturrecherchen

Der nachfolgende Text beruht im Wesentlichen auf Literaturrecherchen in den über die jeweilige Institution der Autoren zugänglichen elektronischen Bibliotheken (v.a. PubMed, ISI, EBSCO, EmBase, OPAQ, PsycInfo) und ihrem eigenen Literaturfundus zu den in der Ausschreibung dieses Vorhabens genannten Themen. Weiterhin wurden drei Reviews zum Zusammenhang zwischen Lärm und Gesundheit herangezogen (Michaud, Fidell, Pearsons et al., 2007; Perron, Tétreault, King et al. 2012; WHO, 2009) und hinsichtlich derjenigen Literatur ausgewertet, die sich speziell mit Fluglärm beschäftigt. Für die quantitativen Aussagen des vorliegenden Berichts zum Zusammenhang zwischen Fluglärm und Gesundheit wurde nur solche Literatur in Betracht gezogen, die seit 1990 in Fachzeitschriften mit „peer review“ erschienen ist und konkrete empirische Ergebnisse zum Einfluss von Fluglärm auf den Schlaf, auf weitere biologisch-medizinische Parameter (wie z.B. Blutdruck, Erkrankungsrisiken), auf Belästigungs- und Störungsurteile oder auf die Leistungsfähigkeit der Betroffenen am nächsten Morgen beschreibt. Die Beschränkung auf Literatur aus Fachzeitschriften hat den Vorzug, dass diese in der Regel schon vor Drucklegung von unabhängigen Gutachtern bewertet und ggf. von den Autoren geändert wurde. Für eine Beschränkung auf die Zeit seit 1990 wurde deshalb entschieden, weil ältere Veröffentlichungen meist sowohl hinsichtlich der operationellen und akustischen Charakteristiken des untersuchten Flugbetriebs als auch der verwendeten Methodik nicht ohne weiteres mit heutigen Untersuchungen vergleichbar sind. Um einen Hinweis auf die Menge des zu betrachtenden Ausgangsmaterials zu geben, sei hier nur erwähnt, dass eine PubMed-Recherche zur Fachliteratur seit 1990 in allen Feldern mit den Stichwörtern „noise“ and „aircraft“ and „sleep“ Mitte Juni 2012 insgesamt 91 Ergebnisse erbrachte, von denen jedoch nur 37 die genannten Qualitätsansprüche erfüllten und in englischer oder deutscher Sprache vorlagen.

Weiterhin soll dieser Text keine quantitative Meta-Analyse beschreiben, sondern eher eine narrativ-qualitative Analyse der aktuellen Forschungsergebnisse, die allerdings auch quantitative Aussagen

über das Ausmaß der nächtlichen Fluglärmwirkungen für verschiedene medizinische oder psychologische Endpunkte zulässt, beispielsweise für physiologische Aufwachreaktionen, Störungen der Schlafstruktur, Leistungsparameter und berichtete Schlafqualität.

Vorab noch eine Anmerkung: Wenn in diesem Text Dezibel (dB) genannt werden, ist immer der A-bewertete Schallpegel gemeint (dB(A)). Wir haben das „(A)“ nur zum Zwecke der besseren Lesbarkeit weggelassen.

1.2 Möglicher Beitrag der Lärmwirkungsforschung zum Lärmschutz

Die Lärmwirkungsforschung beschäftigt sich auf drei verschiedenen zeitlichen Ebenen und mit sehr verschiedenen Methoden mit der Frage der Auswirkungen von Lärm auf das Verhalten und die Gesundheit der Menschen:

- (1) Auf der Ebene der kurzfristigen Wirkungen werden Labor- und Feldstudien durchgeführt, die vor allem zum Ziel haben, die unmittelbaren Auswirkungen einzelner Lärmereignisse auf psychologische und physiologische Zustände im betroffenen Menschen zu erfassen (z.B. akute Lautheits-, Lästigkeits- und Störungsurteile sowie akute EEG-, Kreislauf- und Muskelaktivitätsreaktionen,
- (2) auf der Ebene der mittelfristigen Wirkungen werden vor allem Feldstudien durchgeführt, die zum Ziel haben, die statistischen Zusammenhänge zwischen habituellen psychologischen und physiologischen Zuständen im längerfristig (d.h. über Wochen und Monate) lärmbelasteten Menschen zu erfassen (z.B. zeitlich integrierte Lästigkeits- und Störungsurteile sowie Veränderungen von Kreislauf- und Schlaf in längerfristig exponierten Personen), und
- (3) auf der Ebene der langfristigen Wirkungen werden vor allem epidemiologische Methoden angewendet, bei denen z.B. Krankenkassendaten zu diagnostizierten Krankheiten oder Arzneimittelverschreibungen von Patienten über mehrere Jahre statistisch mit deren aktueller oder über mehrere Jahre andauernden Lärmbelastung am jeweiligen Wohnort assoziiert werden. Im günstigsten Fall werden hier zusätzliche Befragungen an bestimmten Risiko- und Kontrollgruppen durchgeführt, um die weiteren zum Krankheitsrisiko beitragenden Faktoren (Confounder) zu erfassen und damit den kausalen Anteil der Lärmbelastung besser einschätzen zu können.

Diese drei grundsätzlich verschiedenen Zugänge haben ihre Vor- und Nachteile. Beispielsweise können unmittelbar erfasste Lärmwirkungen meist hinsichtlich möglicher Confounder gut kontrolliert werden (vor allem im Labor), erlauben aber keine Aussagen über die langfristigen Wirkungen auf die Gesundheit. Bei den Feldstudien zu mittelfristigen Wirkungen können Forscher die äußeren Umstände der Untersuchungen (z.B. Probandenauswahl, Untersuchungsorte und Lärmbelastung) weniger gut kontrollieren, dafür erlauben mittelfristige Wirkungen bei Vorliegen plausibler theoretischer Modelle (z.B. dem allgemeinen Stressmodell) schon eher Aussagen über längerfristige Gesundheitsfolgen. Epidemiologische Studien haben den theoretischen Vorteil, die Prävalenz, Inzidenz und Langfristigkeit gesundheitlicher Zustände erfassen und mit der Lärmbelastung über mehrere Jahre statistisch assoziieren zu können; nachteilig ist allerdings, dass die Qualität der medizinischen und akustischen

Daten teilweise fraglich ist. Beispielsweise können Daten privater Krankenkassen in der Regel nicht verwendet werden, und historische Daten zur Lärmbelastung an einem bestimmten Wohnort sind schwer zu beschaffen und teilweise mit heutigen Daten kaum vergleichbar, weil sich z.B. Verkehrswege und/oder Berechnungsverfahren über die Jahre geändert haben.

Für alle drei Ebenen gilt, dass die statistischen Beziehungen zwischen der Lärm-Exposition einerseits und den akuten, mittelfristigen und langfristigen Wirkungen andererseits bestenfalls zu Expositions-Wirkungskurven führen, die unter bestimmten zeitlichen, methodischen und Umwelt-Bedingungen erhalten wurden. Bei Expositions-Wirkungsanalysen wird das Ausmaß einer bestimmten Reaktion (z.B. Anteil lärmbedingter Aufwachreaktionen) ins Verhältnis zur Lärmbelastung (z.B. als Maximalpegel oder Mittelungspegel) gesetzt. Hier zeigt sich regelmäßig, dass es – wenn überhaupt -- kontinuierliche Beziehungen gibt, die keinen „Knick“ aufweisen, welcher als eine sprunghafte Änderung der Wirkung bei Änderung der Belastung interpretiert werden könnte. Das bedeutet, dass solche Kurven selbst keinen Hinweis auf mögliche Grenzwertsetzungen bieten. Sie können aber benutzt werden, um in der gesellschaftlichen Diskussion über die Zumutbarkeit von Lärm mit empirischen Daten zu argumentieren.

Wissenschaft kann darüber hinaus dazu beitragen, die Frage zu beantworten, wie stark die in einzelnen Untersuchungen erhaltenen Kurven von ihren jeweiligen Untersuchungsbedingungen abhängen, bzw. wie weit sie darüber hinaus generalisiert werden können. Dies geschieht in der Regel durch Wiederholung der Untersuchung mit denselben Methoden an anderen Standorten. Auch wenn die Methoden nicht immer exakt vergleichbar sind, hat dieser Versuch in der Belästigungsforschung schon eine gewisse Tradition, die dazu führte, dass wir seit einigen Jahren in der Europäischen Union sogenannte „Standardkurven“ haben, die z.B. das Ausmaß der durchschnittlichen oder hohen Belästigung aus 20 Fluglärm-Untersuchungen in Relation zum L_{den} setzt (Miedema & Oudshoorn, 2001) darstellen. Diese Kurven wurden wegen ihres Alters kritisiert und inzwischen im wissenschaftlichen Bereich aktualisiert (Guski, 2004; Janssen, Vos, Van Kempen et al. 2011), aber eine Umsetzung in den politischen Bereich ist noch nicht in Sicht. In der Schlafforschung sind wir noch nicht so weit; hier werden zunächst meist die am Flughafen Köln-Bonn erhaltenen Kurven (Basner, Buess, Elmenhorst et al., 2004) benutzt, um über die Zumutbarkeit von Nachtfluglärm zu beraten und zu entscheiden, ohne genau zu wissen, ob diese Daten auf andere Flughäfen mit einem weniger ausgeprägten Nachtflugbetrieb oder gar auf die Situation an einem neuen oder wesentlich geänderten Flughafen übertragbar sind.

1.3 Einführung ins Thema Schlaf

1.3.1 Funktion und Bedeutung des Schlafs

Der Schlaf ist ein aktives und äußerst komplexes Geschehen, in dem vielfältige physiologische Prozesse ablaufen (z.B. Proteinbiosynthese, Ausscheidung spezifischer Hormone, oder die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten), die im weitesten Sinne der Erholung und damit der Vorbereitung auf die nächste Wachphase dienen. Ungestörter Schlaf von ausreichender Dauer ist unerlässlich für den Erhalt von psychomotorischer Leistungsfähigkeit und Gesundheit (Banks & Dinges, 2007). Die Schlafforschung nutzt experimentelle (an Mensch und Tier) und epidemiologische Studien zur Aufklärung der Funktionen des Schlafes.

Experimentelle Studien

Wichtige Hinweise auf die Funktionen des Schlafes erhält man durch die Beobachtung von Menschen, die nicht schlafen (akuter Schlafentzug, über Stunden und Tage anhaltender Schlafentzug) oder über einen längeren Zeitraum zu wenig (chronisch partieller Schlafentzug, z.B. 4 Stunden Schlaf pro 24 h über einen Zeitraum von 2 Wochen) schlafen. Chronisch partieller Schlafentzug kann auch durch eine Störung des Schlafs entstehen, die intern (z.B. Atemaussetzer im Schlaf, Asthma) oder extern (z.B. Fluglärm, hohe Raumtemperatur) begründet sein kann (Raschke & Fischer, 1997). In diesem Fall verbringt der Schlafende zwar ausreichend Zeit im Bett, die Störung führt aber zu einer Fragmentierung des Schlafes und zu einer Änderung der Schlafstruktur (Basner, Griefahn & Van den Berg, 2010). Im Folgenden sollen einige wichtige experimentelle Hinweise für die Bedeutung des Schlafs aus der Schlafforschung beispielhaft wiedergegeben werden:

Aufmerksamkeit: Schlafentzug führt regelmäßig und frühzeitig zur Einschränkung der Aufmerksamkeit, d.h. die Fähigkeit, sich auf eine Aufgabe dauerhaft zu konzentrieren wird mit zunehmendem Schlafentzug immer schwerer (Goel, Rao, Durmer & Dinges, 2009). In extremen Fällen kommt es zu kurzen Schlafattacken (*microsleep*), die z.B. im Straßenverkehr oder bei der Bedienung schwerer Maschinen verheerende Folgen haben können. Da Aufmerksamkeit praktisch für alle anderen höheren kognitiven Funktionen eine Voraussetzung ist, werden auch letztere durch Schlafentzug beeinträchtigt.

Konsolidierung von Gedächtnisinhalten: Schlaf ist sowohl wichtig für die ungestörte Aufnahme von neu Erlebtem (*encoding*) als auch für dessen Speicherung (*consolidation*) im Langzeitgedächtnis (Diekelmann & Born, 2010). Im Schlaf werden sozusagen wichtige Inhalte aus dem Arbeitsspeicher auf die Festplatte geschrieben (Nervenverbindungen verfestigt) und weniger wichtige Inhalte gelöscht (Nervenverbindungen getrennt, *synaptic downscaling*), so dass am nächsten Tag der volle Arbeitsspeicher für die Aufnahme neuer Erlebnisse zur Verfügung steht. Der Organismus gelangt im Schlaf sogar zu neuen Erkenntnissen (Wagner, Gais, Haider et al. 2004). Außerdem erfolgt im Schlaf eine Trennung von Emotionen und Gedächtnis, so dass am Ende dieses Prozesses die Erinnerung ohne die Emotion steht (Walker, 2010). Zu wenig oder gestörter Schlaf ist möglicherweise Ursache für die fehlerhafte Verarbeitung von negativen Erlebnissen (Posttraumatisches Stresssyndrom).

Stoffwechsel: Es konnte in mehreren experimentellen Studien nachgewiesen werden, dass Schlafentzug zu einer Störung des Zuckerstoffwechsels mit verminderter Insulinausschüttung bei gleichzeitig erhöhter Insulinresistenz führt (Buxton, Cain, O'Connor et al., 2012a; Spiegel, Tasali, Leproult & Van, 2009). Dies kann als Vorstufe für eine Zuckerkrankheit angesehen werden.

Immunsystem: Ungestörter Schlaf von ausreichender Dauer ist auch für das Immunsystem von Bedeutung (Besedovsky, Lange & Born, 2011). So war z.B. die Antikörperproduktion nach Grippeimpfung durch Schlafentzug im Vergleich zu einer Kontrollgruppe verringert (Spiegel, Sheridan & Van, 2002). Schlafentzug scheint zu einer Unterdrückung des Immunsystems zu führen, wodurch die Entstehung bösartiger Tumoren gefördert werden könnte (Blask, 2009). Die International Agency for Research on Cancer kam 2007 zu dem Entschluss, dass mit einer Beeinträchtigung der zirkadianen Rhythmik einhergehende Schichtarbeit wahrscheinlich zur Entstehung von Krebs im Menschen beiträgt.

Blutdruck: Während des Schlafs kommt es zu einer deutlichen Reduktion des Blutdrucks (sogenanntes *dipping*), die für die Blutdruckregulation von erheblicher Bedeutung zu sein scheint (Sayk, Becker, Teckentrup et al., 2007). Experimentell gestörter Schlaf führt zu erhöhtem Blutdruck sowohl in der Nacht (Carrington & Trinder, 2008) als auch am Folgetag (Morrell, Finn, Kim et al., 2000). Es ist plausibel, dass diese Blutdruckerhöhungen, auch wenn sie anfangs vorübergehend und reversibel sind, langfristig zu einer Erhöhung des Blutdrucks und zu einer Zunahme kardiovaskulärer Folgeerkrankungen führen (Babisch & van Kamp, 2009).

Epidemiologische Studien

Epidemiologische Studien sind Beobachtungsstudien, die den Zusammenhang zwischen Risikofaktoren (hier: dauerhaft verkürzter Schlaf) und der Entstehung von Krankheiten untersuchen. In den vergangenen 10 Jahren ist eine große Anzahl von (zunehmend auch prospektiven) epidemiologischen Studien veröffentlicht worden, die das geringste Krankheitsrisiko und Sterberisiko für eine von den Studienteilnehmern selbst berichtete Schlafzeit von 7-8 Stunden finden. Sowohl kürzere als auch längere Schlafzeiten gehen mit erhöhten Krankheitsrisiken einher. Eine dauerhaft verkürzte Schlafzeit (7 Stunden und kürzer) wurde mit den folgenden Krankheiten in Verbindung gesetzt:

- Übergewicht (Lyytikäinen, Rahkonen, Lahti & Lallukka, 2011; Seegers, Petit, Falissard et al., 2011; Watanabe, Kikuchi, Tanaka & Takahashi, 2010),
- kardiovaskuläre Erkrankungen (King, Knutson, Rathouz et al., 2008; Knutson, 2010),
- Diabetes (Beihl, Liese & Haffner, 2009; Yaggi, Araujo & McKinlay, 2006),
- Abnahme kognitiver Leistungsfähigkeit (Ferrie, Shipley, Akbaraly et al., 2011; Kronholm, Sallinen, Suutama et al., 2009), und
- Sterblichkeit (Cappuccio, D'Elia, Strazzullo & Miller, 2010; Gallicchio & Kalesan, 2009; Kronholm, Laatikainen, Peltonen et al., 2011).

Nach den obigen Ausführungen dürfte kaum ein Zweifel daran bestehen, dass ungestörter und ausreichend langer Schlaf von herausragender Bedeutung für Leistungsfähigkeit und Gesundheit ist. Dieser Schluss findet in einem Editorial der American Academy of Sleep Medicine und der Sleep Re-

search Society mit dem Titel "Sleep: A Health Imperative" Bestätigung (Luyster, Strollo, Zee & Walsh, 2012). Die Autoren kommen zu folgendem Schluss: "*Chronic sleep deficiency, defined as a state of inadequate or mistimed sleep, is a growing and underappreciated determinant of health status. Sleep deprivation contributes to a number of molecular, immune, and neural changes that play a role in disease development, independent of primary sleep disorders. These changes in biological processes in response to chronic sleep deficiency may serve as etiological factors for the development and exacerbation of cardiovascular and metabolic diseases and, ultimately, a shortened lifespan. Sleep deprivation also results in significant impairments in cognitive and motor performance which increase the risk of motor vehicle crashes and work-related injuries and fatal accidents.*"

Die gesundheitliche Bedeutung von Schlaf ist deshalb auch relevant für die Bewertung von Fluglärmwirkungen auf Schlaf. Hier steht jedoch nicht die grundsätzliche Frage der gesundheitlichen Bedeutung von Schlaf im Vordergrund, sondern vielmehr, ab welchem Grad einer fluglärmbedingten Schlafstörung mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu rechnen ist. Letzteres wird in den folgenden Kapiteln detailliert besprochen.

1.3.2 Indikatoren des gestörten Schlafs im Kontext von Lärmwirkungsstudien

"Sleep is of the brain, by the brain and for the brain" (Hobson, 2005). Die Polysomnographie, d.h. die gleichzeitige Aufzeichnung von Hirnstrombild (Elektroenzephalographie, EEG), Augenbewegungen (Elektrooculographie, EOG) und Anspannungszustand der Muskulatur (Elektromyographie, EMG), ist nach wie vor der Goldstandard zur Messung schlafbezogener Phänomene. Basierend auf speziellen Regelwerken wird die Nacht normalerweise in 30-Sekunden dauernde Abschnitte unterteilt (Iber, Ancoli-Israel et al., 2007; Rechtschaffen, Kales, Berger et al., 1968) In Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz des Hirnstrombildes, spezifischer Muster im EEG, Anspannungszustand der Muskulatur im EMG, und dem Auftreten langsamer oder schneller Augenbewegungen im EOG wird jedem 30-Sekunden Abschnitt ein Schlafstadium zugewiesen. Man unterscheidet Wach von Schlaf. Der Schlaf wird unterteilt in den REM-Schlaf (auch Traumschlaf oder *Rapid Eye Movement Sleep* genannt) und den Nicht-REM Schlaf, wobei letzterer wiederum in den Leichtschlaf (Stadien S1 und S2) und den Tiefschlaf (Stadien S3 und S4) unterteilt wird. Tiefschlaf und REM-Schlaf scheinen besonders wichtig für die Erholungsfunktion des Schlafes zu sein (Stickgold, 2005). Wach und S1 sind typische Indikatoren für einen gestörten oder fragmentierten Schlaf, und sie tragen nicht (oder nur sehr begrenzt) zur Schlaferholung bei (Wesensten, Balkin & Belenky, 1999). Selbst kürzere Aktivierungen in EEG und EMG (≥ 3 Sekunden, so genannte Arousals) die nicht lange genug andauern um als Stadium Wach klassifiziert zu werden, können mit der Polysomnographie detektiert werden (Bonnet, Doghramji, Roehrs et al., 2007). Diese Arousals (s. *Abbildung 1*) werden normalerweise von einer Reaktion des vegetativen Nervensystems begleitet (Basner, Griefahn, Müller et al. 2007; Basner, Müller, Elmenhorst et al., 2008).

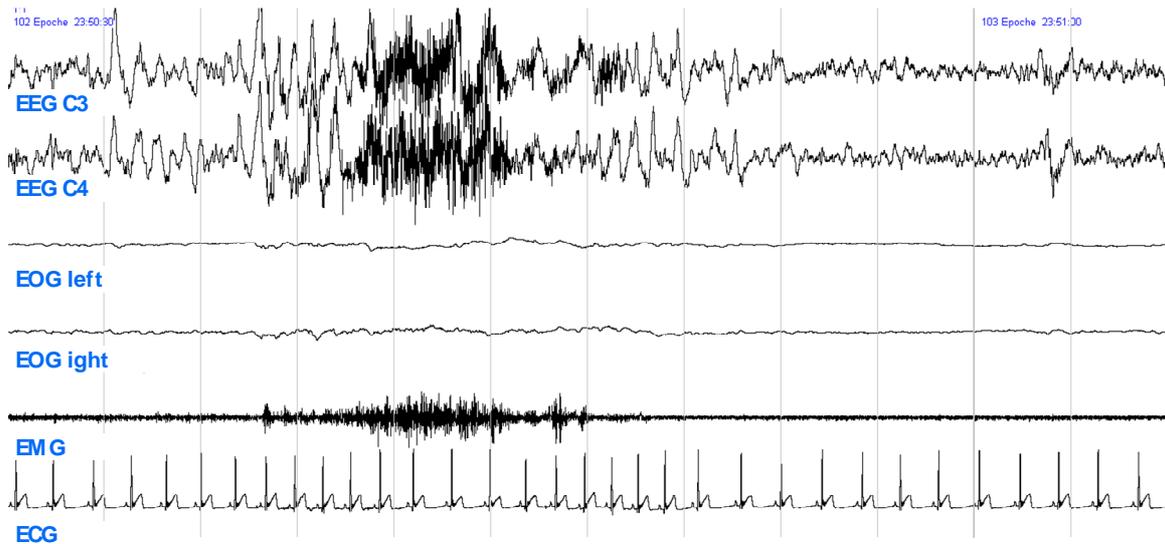


Abbildung 1: Beispiel eines EEG-Arousal nach (Bonnet et al., 1992; Iber et al., 2007). Ein Anstieg des Anspannungszustandes der Muskulatur (mit entsprechendem Artefakt im Hirnstrombild) und ein Anstieg der EEG-Frequenz sind die definierenden Merkmale des EEG-Arousal. In diesem Beispiel wird das EEG-Arousal von einem vegetativen Arousal (d.h. einem Anstieg der Herzfrequenz) begleitet.

Der menschliche Organismus erkennt, bewertet und reagiert auf Geräusche auch im Schlaf (Oswald, Taylor & Treisman, 1960). Das sogenannte Aufsteigende Retikuläre Aktivierende System (ARAS) ist Teil des menschlichen Arousal systems, und am stärksten in Wachphasen aktiviert. Es erhält Eingaben von verschiedenen sensorischen Systemen (u.a. auch dem auditorischen System) und leitet diese Informationen z.B. zum Atem- und Kreislaufzentrum im Hirnstamm und durch den Thalamus zur Großhirnrinde weiter. Der Thalamus hat eine Filterfunktion, d.h. in Abhängigkeit von der sensorischen Information und dem momentanen Zustand des Zentralnervensystems (ZNS) wird die Information entweder zur Großhirnrinde weitergeleitet oder nicht (Dang-Vu, McKinney, Buxton et al., 2010). Wenn sie weitergeleitet wird, kann sie zu einer Aktivierung der Großhirnrinde führen, die, wenn die Person schläft, den Schlaf entsprechend stören oder fragmentieren kann. Aus diesen Beobachtungen folgen mehrere wichtige Schlüsse für Fluglärmwirkungen auf den Schlaf:

(1) Die Reaktion des Organismus auf den Schlaf basiert nicht auf einem Alles-oder-Nichts Prinzip, d.h. nicht jedes Lärmereignis wird eine bewusst wahrgenommene Aufwachreaktion hervorrufen. Vielmehr handelt es sich um eine feingradige Reaktion die (abhängig vom akustischen Stimulus und dem momentanen Zustand des ZNS) von (a) keiner oder einer minimalen physiologischen Reaktion (mit Standardgerät nicht detektierbar), (b) einer isolierten vegetativen Reaktion (z.B. Anstieg von Herzfrequenz und Blutdruck), (c) einer Aktivierung der Großhirnrinde in unterschiedlichem Ausmaß (subtile Frequenzänderung im EEG, EEG-Arousal, Schlafstadienwechsel in ein leichteres Schlafstadium, Schlafstadienwechsel ins Stadium Wach) bis zu (d) einem vollständigen Arousal der Großhirnrinde mit Wiedererlangung des Wachbewusstseins führen kann (s. Abbildung 2).

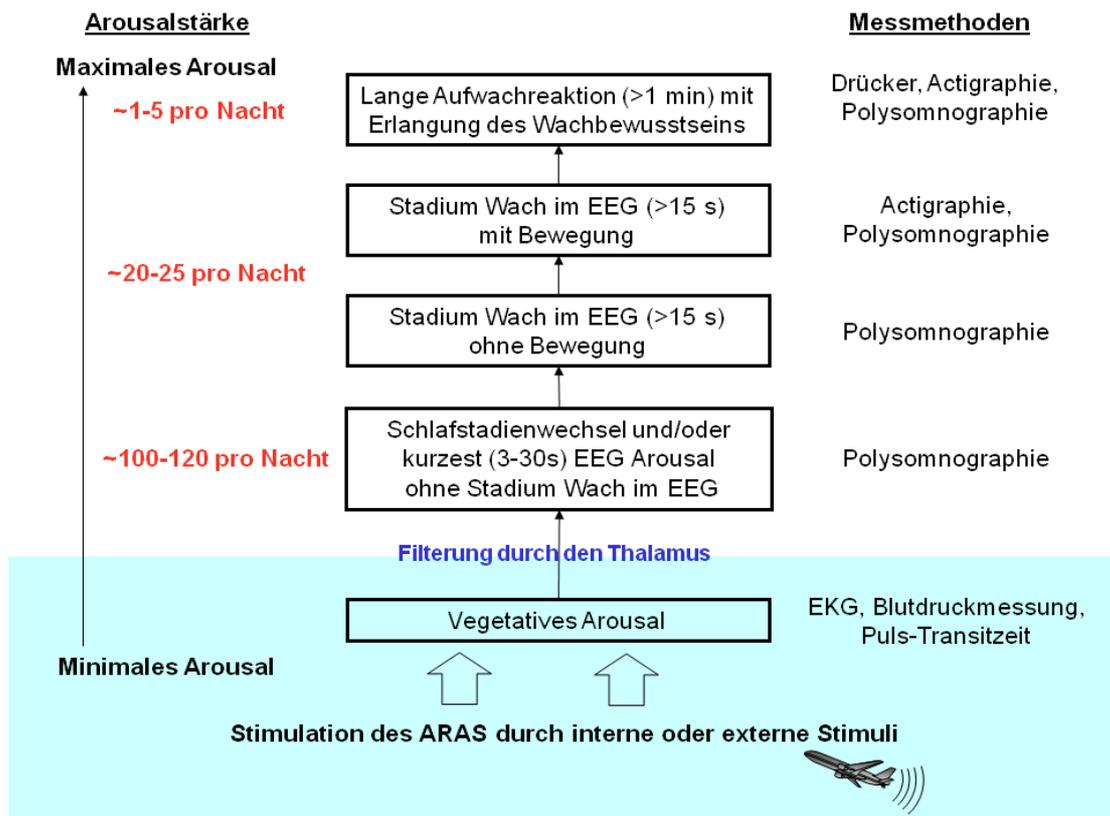


Abbildung 2: Die Reaktionen des schlafenden Organismus auf externe Stimuli (Beispiel Fluglärm, vereinfachtes Schema).

Es ist plausibel und allgemein akzeptiert, dass stärkere Arousals (z.B. lange Aufwachreaktionen mit Wiedererlangung des Wachbewusstseins) größere Konsequenzen für die Schlaferholung haben als weniger ausgeprägte Arousals (z.B. vegetative Arousals), insbesondere da erstere letztere regelmäßig beinhalten, aber nicht umgekehrt. Aus gleichem Grund treten lange Aufwachreaktionen spontan (d.h. in ruhigen Nächten) deutlich seltener auf als z.B. kurze EEG-Arousals. Das bedeutet jedoch nicht, dass kürzere Arousals ohne Konsequenz für die Schlaferholung sind. Im Gegenteil wird angenommen, dass viele kurze ZNS-Arousals den Schlaf fragmentieren und die Schlaferholung beeinträchtigen können, ohne zu einer relevanten Veränderung der Makrostruktur des Schlafs (d.h. Gesamtschlafzeit, Schlafstadienverteilung) zu führen (Bonnet, 1985, 1986; Guilleminault, Abad, Philip & Stoohs, 2006), auch wenn die Unabhängigkeit der beiden Prozesse Gegenstand aktueller Diskussion ist (Bonnet, 2000; Wesensten et al., 1999). Letztendlich hat die Überzeugung, dass kurze EEG-Arousals wichtig für die Schlaferholung sind, zur Definition von EEG-Arousals durch die American Sleep Disorders Association in 1992 geführt. EEG-Arousals werden heute routinemäßig und weltweit in Schlaflaboren erhoben (Bonnet, Carley, Carskadon et al., 1992).

(2) ZNS-Arousals stellen einen physiologischen Teil des Schlafprozesses dar, und sie haben keine pathologische Bedeutung, solange keine bestimmte physiologische Anzahl überschritten ist (als Anhaltspunkt für die Anzahl spontaner Ereignisse in ungestörten Nächten s. rote Zahlen in *Abbildung 2*) (Bonnet & Arand, 2007). Da eine Vielzahl von externen und internen Stimuli ZNS-Arousals im Schlaf auslösen können (Raschke & Fischer, 1997), sind letztere unspezifisch (d.h. nicht spezifisch für Fluglärm).

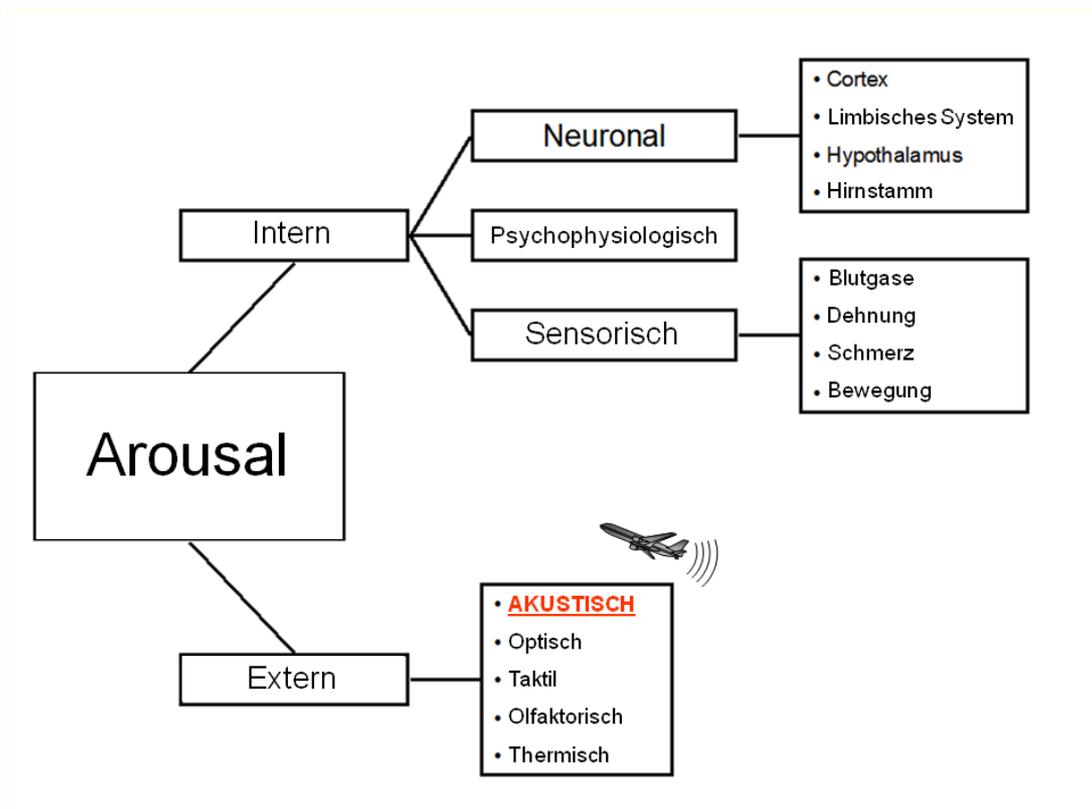


Abbildung 3: Interne und externe Übertragungswege für ZNS-Arousal, modifiziert nach Raschke und Fischer (1997).

Hieraus folgt: Wenn ein ZNS-Arousal (egal welchen Grades) im Zusammenhang mit einem Fluggeräusch beobachtet wird, ist nicht sicher, dass das Arousal tatsächlich durch das Fluggeräusch hervorgerufen wurde, weil es möglich ist, dass - zufällig und gleichzeitig - ein anderer interner oder externer Stimulus das Arousal hervorgerufen hat. Deshalb kann nur ein Teil der beobachteten Arousal Fluggeräuschen zugeordnet werden. Es wurden verschiedene Verfahren vorgeschlagen, diesen Anteil rechnerisch zu bestimmen (für eine detaillierte Diskussion s. Brink, Basner, Schierz et al. (2009)). Diese Tatsache beeinflusst auch die Bewertung der Bedeutung einer zusätzlich durch Fluglärm hervorgerufenen Reaktion: Offensichtlich ist ein zusätzliches EEG-Arousal (mit mehr als 100 spontan auftretenden Arousal in lärmfreien Nächten) sehr wahrscheinlich weniger abträglich für die Schlafertholung als eine zusätzliche EEG-Aufwachreaktion (20-25 in lärmfreien Nächten) oder eine zusätzliche lange Aufwachreaktion mit Wiedererlangung des Wachbewusstseins. (1-5 in lärmfreien Nächten).

Es besteht grundsätzlich kein Konsens darüber, welcher Grad eines ZNS-Arousal als Indikator für einen durch Fluglärm gestörten Schlaf herangezogen werden soll (s. verschiedene Abstufungen eines ZNS-Arousal in *Abbildung 2*). Zumindest im deutschsprachigen Raum haben sich jedoch EEG-Aufwachreaktionen (kurz: Aufwachreaktionen) als Indikator für durch Fluglärm gestörten Schlaf durchgesetzt, da sie einen guten Kompromiss zwischen Sensitivität (alle relevanten Ereignisse werden erkannt) und Spezifität (möglicherweise irrelevante Ereignisse werden nicht berücksichtigt) darzustellen scheinen. EEG-Aufwachreaktionen finden im Schutzkonzept für den Flughafen Leipzig/Halle (Basner, Samel & Isermann, 2006), beim Züricher Fluglärmindex (ZFI) (Brink, Schreckenberg, Thomann & Basner, 2010) und beim Frankfurter Nachtindex (FNI) (Schreckenberg, Basner & Thomann, 2009) Anwendung. Aufwachreaktionen sind als ein Wechsel aus einem der Schlafstadien S1, S2, S3,

S4 oder REM in das Stadium Wach definiert. Als solche muss das für Aufwachreaktionen typische Muster in EEG, EOG und EMG mindestens die Hälfte einer 30 Sekunden Epoche bestimmen, damit letztere als Wach klassifiziert wird. In einer ungestörten achtstündigen Nacht eines gesunden Schlafers treten im Mittel ca. 20-25 spontane Aufwachreaktionen auf (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011; Bonnet & Arand, 2007). Grundsätzlich steigt die Wahrscheinlichkeit der Wiedererlangung des Wachbewusstseins mit der Dauer einer Aufwachreaktion (Basner & Siebert, 2006). Lange Wachphasen werden am nächsten Tag erinnert und führen zu einer schlechteren Einschätzung von Schlafqualität und Schlafquantität. Zudem können Fluggeräusche nur in Phasen bewussten Wachseins wahrgenommen und zu Belästigung führen. Längere lärmbedingte Aufwachreaktionen stellen deshalb eine besonders gravierende Störung dar. Die meisten (spontanen und lärmbedingten) Aufwachreaktionen sind jedoch zu kurz, als dass sie am nächsten Tag erinnert werden (Basner & Siebert, 2006).

In der Vergangenheit wurden folgende Gründe für die Eignung von Aufwachreaktionen als Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen vorgebracht:

1. Aufwachreaktionen stellen einen guten Kompromiss bezüglich Sensitivität und Spezifität dar, so dass alle relevanten Schlafstörungen erfasst werden. Die potenzielle Erinnerungsfähigkeit von Aufwachreaktionen und die Assoziation von Aufwachreaktionen mit eingipfligen und verlängerten Aktivierungen des autonomen Nervensystems (Sforza, Chapotot, Lavoie et al., 2004), die langfristig Ursache kardiovaskulärer Folgeerkrankungen sein können (Muzet, 2007), bestimmen hier die medizinische Relevanz. Arousals, also kürzere Aktivierungsreaktionen, führen weder zu erinnerbarem Erwachen noch zu ausgeprägten vegetativen Aktivierungen (Basner et al., 2007; Sforza, Jouny & Ibanez, 2000).
2. Die Anzahl zusätzlicher Aufwachreaktionen korreliert gut mit Veränderungen der Schlafstruktur, die ebenfalls als Schlafstörung klassifiziert werden. So werden ca. 45% der Varianz in der Änderung des Tiefschlafanteils durch die Anzahl zusätzlicher Aufwachreaktionen aufgeklärt (Basner & Samel, 2005).
3. Es herrscht Einigkeit unter Schlafforschern, dass lärmbedingte Aufwachreaktionen eine relevante Schlafstörung darstellen (Ollerhead et al., 1992). Auch neueste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Aufwachreaktionen einen geeigneten Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen darstellen (Basner, Glatz, Griefahn et al., 2008; Griefahn, Bröde, Marks & Basner, 2008).

In der Lärmwirkungsforschung werden neben der Polysomnographie andere Methoden eingesetzt, um den Einfluss von Lärm auf den Schlaf zu quantifizieren (s. *Abbildung 2* rechts). Hier sind insbesondere Fragebögen, signalisiertes Erwachen (die Versuchsperson drückt einen Knopf, wenn sie in der Nacht aufwacht), das Elektrokardiogramm (EKG) und die Aktometrie zu nennen. Im Vergleich zur Polysomnographie sind diese Methoden in der Regel weniger sensitiv und haben geringere Aussagekraft, da nur in der Polysomnographie Hirnströme gemessen werden, mit denen Schlafstadien bestimmt werden können. Auf der anderen Seite sind sie weniger invasiv, d.h. sie beeinflussen den Schlaf weniger stark als die Polysomnographie, bei der viele Sensoren appliziert werden müssen. Sie sind außerdem weniger aufwändig und kostengünstiger, weshalb mit den gleichen Mitteln größere Probandenkollektive untersucht werden können. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Aufzeichnungsmethoden werden ausführlich in Basner, Müller et al. (2008) und Basner, Brink & Elmenhorst,

(2012) besprochen. Bei der Beurteilung der einzelnen Studien zu Fluglärmwirkungen auf den Schlaf (s. 2.1.1) muss die Methodik, die zur Messung schlafbezogener Phänomene eingesetzt wurde, entsprechend berücksichtigt werden.

1.4 Charakterisierung des (nächtlichen) Fluglärms

In diesem Kapitel werden die spezifisch lärmwirkungsrelevanten Merkmale der Fluglärm-Belastung aus primär akustischem Blickwinkel erörtert. Hierbei wird der Fokus dezidiert auf nächtliche Wirkungen, insbesondere *Aufwachreaktionen* gelegt und aufgezeigt, welche spezifischen Charakteristika des Fluglärms für solche Wirkungen bedeutsam sind. Es werden außerdem einige grundsätzliche, vor allem im lärmschutzrechtlichen Kontext relevante Fragen zur Angemessenheit von energie- bzw. mittelwertsbasierten Lärm-Metriken für die Vorhersage von Wirkungen auf den Schlaf diskutiert.

1.4.1 Fluglärm: Emission, Messung und Berechnung

Flugzeuge gehören zu den stärksten technischen Schallquellen überhaupt. Beim Überflug in einigen hundert Metern Distanz entstehen Pegel, die während mehrerer Sekunden in einem größeren Umkreis die sprachliche Kommunikation unterbrechen oder stark beeinträchtigen. Fluglärm enthält in der Regel sehr bedeutende tieffrequente Anteile, welche durch leichte Bauteile an Häusern nur schwach gedämpft werden. Er wird daher im Rauminnen auch bei geschlossenen Fenstern als störend wahrgenommen.

Die verschiedenen emissionsseitigen Quellen des Flugzeuglärms am Luftfahrzeug selber bzw. den Triebwerken sind in *Abbildung 4* dargestellt.

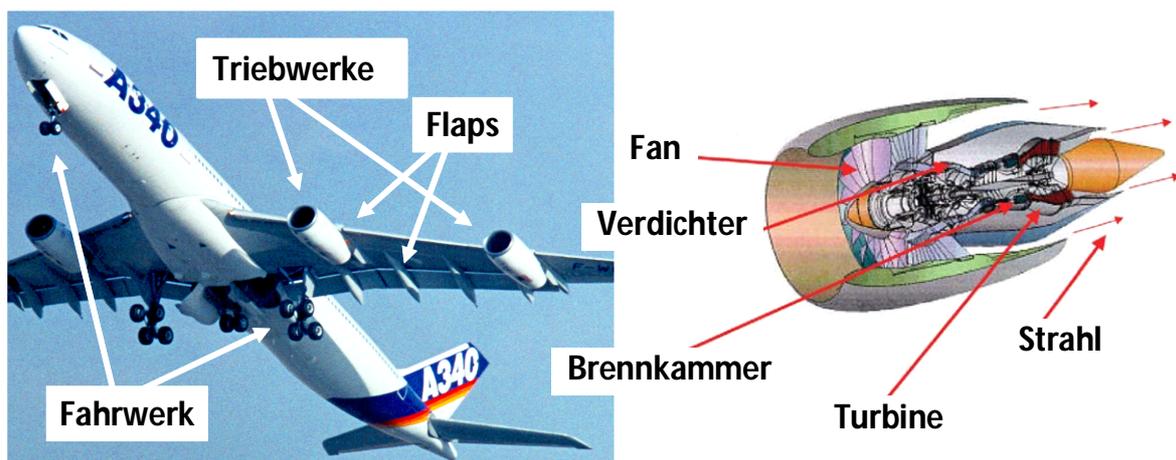


Abbildung 4: Lärmquellen am Flugzeug und am Triebwerk

Am Rumpf, den Tragflächen und Auftriebshilfen (Flaps) und am (ausgefahrenen) Fahrwerk des Flugzeugs entstehen im Flug aerodynamische Umströmungs-Geräusche. In der Startphase sind diese vernachlässigbar, da der energetisch überwiegende Lärm-Anteil auf die auf Vollast hochgefahrenen Triebwerke entfällt. Im Reiseflug, d.h. in großer Höhe, sind Flugzeuge am Boden kaum vernehmbar

womit sich das Fluglärmproblem grundsätzlich auf die Umgebung von Flughäfen beschränkt. Beim Triebwerk wird Lärm hauptsächlich durch die Verwirbelungen des nach hinten ausgestoßenen heißen Abgasstrahls mit der Umgebungsluft erzeugt. Der Kern des Strahls strömt mit hoher Geschwindigkeit aus und bildet eine regelmäßige Abfolge von Stoßwellen mit einem hohen Energieanteil oberhalb von etwa 1000 Hz. Um den Strahlkern entsteht deshalb eine stark turbulente Mischzone, deren Wirbel im Bereich unter 1000 Hz die primären Quellen des Triebwerk lärms darstellen. Wesentlich geringere Schall-Anteile werden durch den Fan und die dahinterliegenden Triebwerkskomponenten nach vorne und zur Seite hin abgestrahlt. Jede Geräusch-Komponente hat hierbei ein spezifisches Spektrum, welches wiederum je nach Betriebszustand variieren kann (Bütikofer, 2008; Empa, 2011). Ein entscheidender Schritt hin zu erträglicheren Lärmemissionen war die Entwicklung und der Einsatz von Mantelstromtriebwerken seit Ende der 60er Jahre. Als Mantelstrom wird der vom Fan angesogene Anteil der Luft (typischerweise etwa 80-90%) bezeichnet, der nicht durch Verdichter, Brennkammer und Turbine geleitet, sondern außen herum geführt wird und infolgedessen den stark beschleunigten Abgasstrahl der Turbine mit einem schalldämmenden Luftmantel umhüllt.

Aufgrund der großflächigen Verteilung sind Fluglärm-Immissionen akustisch weder zuverlässig noch flächendeckend messbar (dazu bräuchte es unzählige Mikrofone). Für die Beurteilung betrieblicher und flugtechnischer Maßnahmen sowie für die Raumplanung benötigt man aber i.d.R. ein flächendeckendes Prognoseverfahren. Das bedeutet, dass Fluglärm grundsätzlich berechnet werden muss. Daraus ergeben sich einige Besonderheiten: (1) Es gibt nur vergleichsweise wenig Flugzeugtypen, die von einigen wenigen Herstellern gebaut werden. Schall-Emissionsdaten (die für Immissions-Berechnungen benötigt werden) werden aus Wettbewerbsgründen von den Herstellern oft zurückgehalten. Eine Quellenvermessung des Fluggeräts muss deshalb meist von unabhängiger Stelle erfolgen. (2) Um den Berechnungsaufwand in einem überschaubaren Rahmen zu halten, sind effiziente Algorithmen und gezwungenermaßen Vereinfachungen nötig. Normalerweise wird ein Rastermaß von 100 m oder größer verwendet. Hindernisse kleiner als der Gitterabstand, wie z.B. Häuser, werden im Normalfall bei der Berechnung ignoriert.

1.4.2 Charakter der Fluglärm-Immission / Besonderheiten des Fluglärms

Lärm am Himmel unterscheidet sich grundsätzlich von anderen Formen des Lärms: Fluglärm ist schwer lokalisierbar und abgrenzbar, und man kann ihm nur schwer entfliehen. Typische von Anwohnern erlebte Fluglärm-Situationen sind vor allem durch Einzelereignisse mit relativ hohen Pegeln und dazwischen liegenden Lärmpausen charakterisiert, während Straßenlärm oft den Charakter eines Dauergeräusches annimmt. Hinzu kommen ein unterschiedliches Frequenzspektrum und ein fluglärmspezifischer zeitlicher Verlauf von Spitzen. Die Schallimmission am Boden kann bei Landfahrzeugen u.a. durch Schallschutzmauern zwischen Quelle und Empfänger verringert werden. Bei Flugzeugen können Immissionen nur durch Maßnahmen am Flugzeug selber oder durch geänderte Routenführungen (auf welche der Betroffene jedoch keinerlei Einfluss hat), oder durch bauliche Maßnahmen, z.B. Schallschutzfenster oder Dachisolation verringert werden, womit die Außenbereiche nicht geschützt werden können. Personen entwickeln ihr allgemeines Belastungsurteil und die Bewertung der Schallquelle aber offensichtlich weitgehend anhand von Erfahrungen im Außenbereich ihrer Wohnung (Wirth, 2004). Diese situativen Unterschiede bedeuten, dass Anwohner von Flughäfen qualitativ "anders" gestört werden als Anwohner von stark befahrenen Straßen, und sowohl die Ma-

ximalpegel als auch die Häufigkeiten der störenden Ereignisse bekommen bei Fluglärm einen höheren Stellenwert als bei gleichmäßigeren Geräuschen.

Es gibt auch einige gewichtige **strukturelle Unterschiede** zu anderen Verkehrsträgern. Bei der (geographischen) Verteilung des Fluglärms steht eine vergleichsweise kleine Zahl von Geschädigten einer großen Mehrheit von Nutznießern gegenüber. Außerdem sind die Betreiber von Flugzeugen meist privatwirtschaftliche Unternehmen, während die Betreiber von PKW in der Regel Privatpersonen sind. International nimmt die Tendenz zur Privatisierung von Flughafenbetrieben zu, während Straßen fast ausschließlich in staatlichem Besitz sind. Die Struktur-Unterschiede zwischen Straßen- und Luftverkehr lassen ein starkes Gewicht privatwirtschaftlicher Interessen und Vorteile bei der Luftfahrt erkennen (Guski, 1999). Die beim Fluglärm auf Verursacherseite, im Gegensatz z.B. zum Straßenverkehr, meist klar benennbaren Personen und Institutionen (Politiker, Behörden, Flughafen-Betreiber-gesellschaften etc.) erleichtern zudem die Adressierung von Lärmschutz-Forderungen. Erwähnenswert ist auch, dass beim Fluglärm wie in keinem anderen Gebiet der Lärmbekämpfung Grenzwerte eine direkte wirtschaftliche Auswirkung haben, da diese die Attraktivität eines Flughafens unmittelbar beeinflussen. Und wie nirgends sonst zeigt sich hier die Unvereinbarkeit zwischen einer wirtschaftlichen Nutzenmaximierung und den Erwartungen der Anrainer eines Flughafens an eine halbwegs erträgliche Lärmbelastung.

1.4.3 Der Dauerschallpegel L_{eq} und andere Beschreibungsmasse zur Prognose nächtlicher Fluglärm-Wirkungen

Im Allgemeinen werden zur Kennzeichnung von **Lärmimmissionen** in rechtlichen Kontexten und im Rahmen der Belästigungsforschung sogenannte Beurteilungspegel L_r (rating level) verwendet, welche aus der Summe akustischer Belastungsmaße und allfälliger Korrekturen für die Lärmart, den Informationsgehalt, den Ton- und die Impulshaltigkeit etc. gebildet werden. In den meisten Ländern wird im Rahmen der Lärmschutzgesetzgebung die Fluglärmbelastung mit dem Dauerschall-/Mittelungspegel L_{eq} oder eng damit verwandten Maßen beschrieben¹. So wird in den USA der L_{dn} , in der EU der L_{den} , ergänzt mit dem L_{Night} verwendet. Eine Reihe von weiteren Ansätzen für Lärmmaße wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt, wovon eine kleine Anzahl auch Eingang in gesetzliche Regelungen gefunden hat, wie z.B. der NNI, $L_{eq(4)}$, der Taktmaximalpegel, der Indice Psophique, etc. Meist korrelieren diese Maße untereinander recht stark. Allerdings ist es ernüchternd festzustellen, dass der Zusammenhang all dieser Maße mit individuellen Wirkungs-Parametern durchwegs schwach ist, dass also entweder Geräusch-Eigenschaften im Mittelungspegel nicht angemessen reflektiert werden oder *nicht-akustische* Einflüsse als wesentliche Determinanten der beobachteten Effekte (z.B. Belästigung) vermutet werden müssen. Zwar hat sich wiederholt gezeigt, dass der L_{eq} dasjenige Maß ist, welches mit den Rohwerten der pauschal beurteilten Störung und Belästigung am besten korreliert, was in Fachkreisen häufig ironisch mit "von allen schlechten Fluglärm-Maßen ist der L_{eq} immer noch das beste" kommentiert wird, aber die Varianzaufklärung verschiedener Wirkungen ist dennoch relativ schwach, was häufig Anlass gibt zur Diskussion, ob Lärmschutzregularien, die auf solchen erklärungsschwachen Größen basieren, dem Gegenstand überhaupt angemessen sind (Brink & Wunderli,

¹ Der äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} ist ein physikalisches Maß für die durchschnittlich auf einen Immissionsort einwirkende Schallenergie. Zu seiner Ermittlung werden die während der Beobachtungszeit anfallenden Einzelereignispegel aufsummiert und über die ganze Beobachtungszeit ausgeglichen.

2012; Meyer, 2011). Manche Untersuchungen zeigen eine stärkere Kovariation der pauschalen Belästigungs-Urteile mit dem Maximalpegel und der Überflughäufigkeit (vgl. Björkman, Ahrlin & Rylander, 1992; Kastka & Faust, 1998). Wieder andere zeigen, dass sich spezifische Wirkungen mit spezifischen akustischen Belastungsmaßen besser beschreiben lassen, so z.B. die Zufriedenheit mit der Ruhe der Wohngegend mit "Ruheigkeits-Indices" (Finke, 1980).

Die Charakteristik des Umweltlärms an Straßen und Flughäfen hat sich in den letzten Dekaden in einer Weise gewandelt, die durch den Mittelungspegel nicht angemessen reflektiert werden kann: Zwar sind einzelne überlaute Ereignisse seltener geworden, dafür ist jedoch die Menge nicht ganz so lauter Ereignisse so dramatisch gestiegen, dass es heute kaum noch Wohnviertel gibt, in denen es richtig ruhig ist; dies trifft ganz besonders für Gebiete zu, deren dominante Schallquelle der Straßenverkehr ist, aber inzwischen sind auch die weiteren Umgebungen von Flughäfen durch diese Veränderungen gekennzeichnet: In Entfernungen von 30-50 km vom Flughafen befinden sich die Flugzeuge zwar in einigen Kilometern Höhe, aber dafür sind mehrere gleichzeitig am Himmel und vermitteln den Eindruck eines kontinuierlichen Kommens und Gehens.

In Absehbarkeit der stetigen Verschärfung von Lärmschutz-Regularien ergab sich schon früh ein wirtschaftlicher Druck auf Flughäfen, Fluggesellschaften und Flugzeughersteller, die Entwicklung **lärmarmere Technik** zu forcieren. In der Folge wurden Einzelschallereignisse immer leiser, was gleichzeitig erheblich mehr Bewegungen ermöglichte, ohne allfällig definierte Grenzwerte zu überschreiten. Eine Reduktion des Emmissionspegels eines Flugzeugs um 20 dB (dies entspricht in etwa der Lärmreduktion, die zwischen 1970 und 2000 erzielt wurde) erlaubt bereits die 100-fache Anzahl von Bewegungen innerhalb desselben Grenzwertkriteriums (*Abbildung 5*).

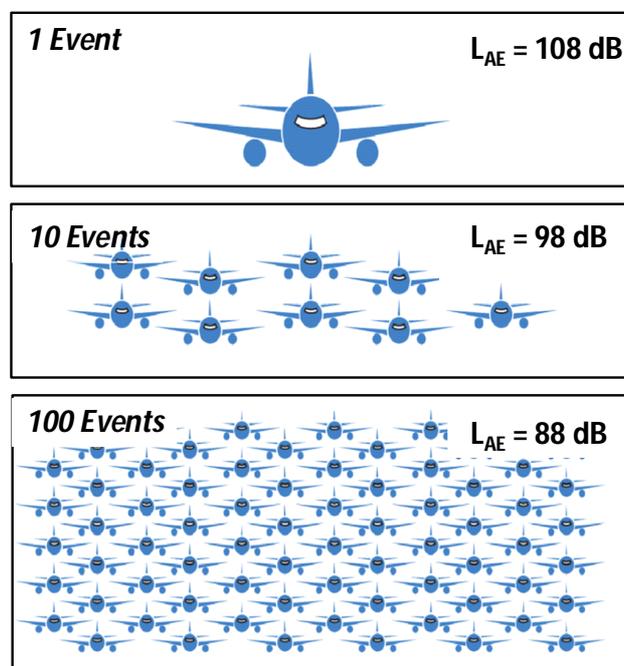


Abbildung 5: Schematische Darstellung möglicher "Flugzeug-Zusammensetzungen" die alle dieselbe mittlere Belastung (hier 60 dB über 16 Stunden) erzeugen. Der L_{AE} bezieht sich hier auf den Ereignispegel eines Überflugs.

Als Belastungsmaß für die Erklärung von (zumindest kurzzeitigen) **Wirkungen auf den Schlaf** sind mittelwertsbasierte energetische Pegelmaße, wie z.B. der L_{Night} , nach aktuellem Kenntnisstand nicht geeignet, da maßgebliche Einflüsse auf die Mikro- und Makrostruktur des Schlafes, d.h. auch auf die potentiell für gesundheitliche Langzeitwirkungen relevanten autonomen Arousal (s. Kapitel 1.3.2), nicht vom Mittelungspegel, sondern von der Pegelverlaufsstruktur und dem Maximalpegel einzelner Lärmereignisse abhängt. Hinsichtlich physiologischer Reaktionen im Schlaf hat sich die Beurteilung des *Einzelereignisses* gegenüber der energetischen Mittelung vieler Ereignisse beim Fluglärm (und teilweise auch beim Bahnlärm) als die bessere, d.h. wirkungsgerechtere Alternative erwiesen. Relevante Beschreibungsgrößen von Einzelereignissen sind insbesondere der *Ereignispegel* L_E , der *Maximalpegel* L_{max} und die *Flankensteilheit* bzw. Geschwindigkeit der Pegeländerung von einzelnen Geräuschen, wobei insbesondere die Bedeutung des *Maximalpegels* hervorzuheben ist. Der Maximalpegel ist vergleichsweise zuverlässig zu messen, da er von einem etwaigen Fremd- bzw. Hintergrundgeräusch praktisch nicht verfälscht wird, wohingegen für die Berechnung des L_E und insbesondere der Flankensteilheit die Kenntnis des Pegel-Zeit-Verlaufs in hohem Detaillierungsgrad notwendig ist. Darauf wird an den geeigneten Stellen (Kap. 2.1) noch vertiefend eingegangen. Trotz erkannter Nachteile des L_{eq} als Schutzkriterium für die Nacht sind nach wie vor L_{eq} -basierte Schutz- bzw. Grenzwertkriterien für den Nachtzeitraum in Gebrauch. Es existieren indes Beurteilungs-Ansätze, welche die Nachteile des L_{eq} durch Verkürzung der Beurteilungszeit(en) etwas entschärfen. So wird etwa durch die getrennte Behandlung der nächtlichen Zeitperioden 22-23, 23-24 und 05-06 Uhr in der Schweizerischen Lärmschutzverordnung (Schweizerische Eidgenossenschaft, 1986) das Prinzip angewendet, die stündliche Schallenergie auf eine Höhe zu begrenzen, welche schon von wenigen lauten Flügen erreicht wird, wobei der 1-h- L_{eq} gewissermaßen die Funktion eines Spitzenkriteriums übernehmen soll (was natürlich um so besser gelingt, je kürzer die Beurteilungszeit gewählt wird).

Bei der Anwendung Expositions-basierter Schutzkriterien im Nachtlärmschutz wird in der Regel implizit davon ausgegangen, dass neben der *Energieäquivalenz* auch eine *Wirkungsäquivalenz* besteht. Wirkungsäquivalenz bedeutet, dass eine Reduktion des L_{Aeq} um z.B. 3 dB, z.B. durch eine Halbierung der Anzahl Flugbewegungen, auch die Ausprägung der zu begrenzenden Wirkung halbiert. Basner und Mitarbeiter konnten in (Basner et al., 2004; Basner, Isermann & Samel, 2005b) zeigen, dass dies nicht zutrifft, und dass Nachtschlafstörungen – operationalisiert als Wahrscheinlichkeit, in der Nacht durch Fluggeräusche zusätzlich aufzuwachen – durch ein L_{eq} -Kriterium nicht wirkungsäquivalent prognostiziert werden können. Somit sind auch Beurteilungen auf Basis eines Mittelungspegels nicht zwingendermaßen geeignet, durch Fluglärm ausgelöste Aufwachreaktionen wirkungsvoll zu begrenzen. In *Abbildung 6* ist die für *eine zusätzliche Aufwachreaktion* (pro Nacht) 'benötigte' Menge Überflüge mit einem bestimmten Maximalpegel (außen) anhand des statistischen Modells für Aufwachwahrscheinlichkeit aus der DLR-Fluglärmfeldstudie (Basner, Isermann & Samel, 2005a) berechnet worden. Die Netto-"Wirkung" (definiert als Anzahl Aufwachreaktionen) dieser dargestellten Maximalpegel-Häufigkeitskombinationen ist also immer die gleiche, während der 8-h-aussen- L_{Aeq} (rechte Achse) dieser Szenarien zwischen ca. 40 dB und 65 dB schwankt². Eine Reduktion des Maximalpegels von z.B. 64 auf 54 dB (d.h. eine Reduktion der Schallenergie auf einen Zehntel) erlaubt bei gleicher

² Basis der Berechnung ist Gleichung (2) in (Basner et al., 2005a). Der L_{AE} eines Fluges wurde näherungsweise angenommen als $L_{\text{AS,max}} + 8$ dB. Die ermittelte Gesamtenergie wurde auf 8 Stunden verdünnt und ein Zuschlag von 15 dB angenommen, um die Pegeldifferenz zwischen außen und innen bei halbgeöffnetem Fenster abzubilden.

Wirkung nicht eine Verzehnfachung der Anzahl der Fluggeräusche, sondern lediglich eine Steigerung um ca. den Faktor 2.5.

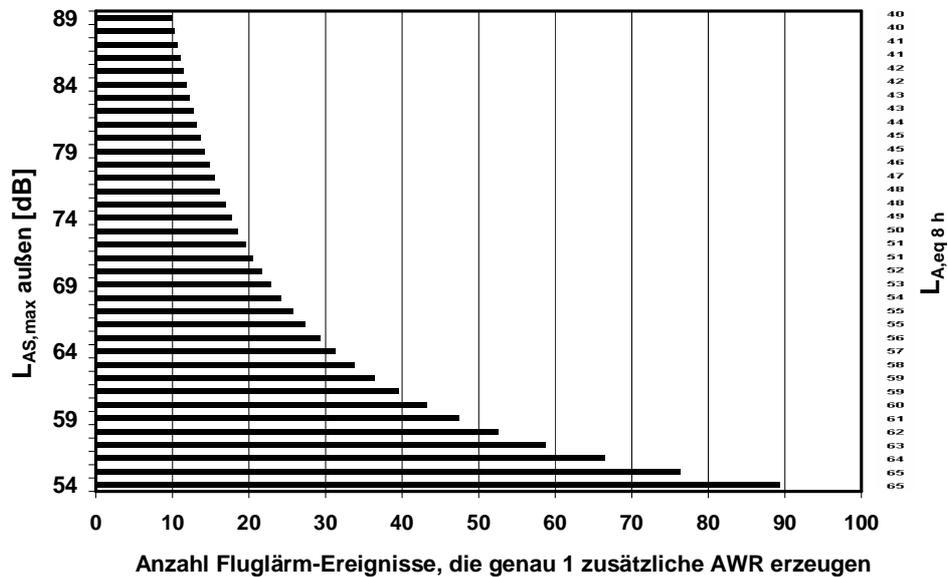


Abbildung 6: Pegel-Häufigkeitskombinationen, die zu einer zusätzlichen Aufwachreaktion pro Nacht führen. Linke Achse: $L_{AS,max}$ außen; Rechte Achse: 8-h- L_{eq} der entsprechenden Maximalpegelhäufigkeit (berechnet anhand einer Schätzung des entsprechenden L_{AE}). Die Berechnungen basieren auf der Maximalpegel-Aufwachwahrscheinlichkeitsfunktion aus der DLR Feldstudie (Basner et al., 2004).

Der dargestellte Zusammenhang hat weitere Implikationen, die vor allem im rechtlichen Kontext relevant werden können. Mit zunehmend niedrigeren Einzelereignis-Pegeln (z.B. infolge lärmarmen Technik) verschlechtert sich nämlich tendenziell die *Schutzwirkung* eines L_{eq} -basierten Schutzkriteriums, wenn die Bewegungszahlen "lärmreduzierter" Flugzeuge in einer Weise ansteigen, bis eine energetische Kompensation erfolgt. Dies ist in *Abbildung 7* anhand einer Modellrechnung, wiederum basierend auf der Expositions-Wirkungsfunktion aus der DLR-Feldstudie (Basner et al., 2005a, dort Gl. 2) dargestellt: Für vorgegebene Kombinationen von 1-h- L_{eq} -Werten und Maximalpegeln wurde die (kumulierte) Anzahl Aufwachreaktionen aus N Ereignissen, die diese Vorgaben erfüllen, basierend auf obengenannter Funktion, berechnet. Wenige *laute* Ereignisse (z.B. 68 dB) erreichen relativ schnell den vorgegebenen L_{eq} -Wert, während die dadurch erzeugte Anzahl Aufwachreaktionen noch relativ gering ist; mit sinkenden Maximalpegelwerten, bei gleichbleibendem L_{eq} , steigt die Anzahl kumulierter Aufwachreaktionen langsam an. Die größte Zahl an Aufwachreaktionen bzw. der schlechtest mögliche, durch einen Pegelmittelwert begründete Schutz wird dann erreicht, wenn der Maximalpegel außen bei ca. 52 dB liegt. Dies bestätigen auch die Angaben in einer Veröffentlichung des niederländischen Gesundheitsrats, welche im Nachgang der ICBEN Konferenz 2003 in Rotterdam entstanden ist (Health Council of the Netherlands, 2004), wo berichtet wird, dass bei der Begrenzung der Nachtbelastung durch einen Mittelungspegel (und der Einhaltung desselben) die ungünstigste Situation hinsichtlich eines direkten biologischen Effekts von Einzelschallereignissen auf den Schlaf sich dann einstellt, wenn die einzelnen Fluggeräusche alle ca. 5 dB über der Effektschwelle (Wirkungsschwelle) liegen.

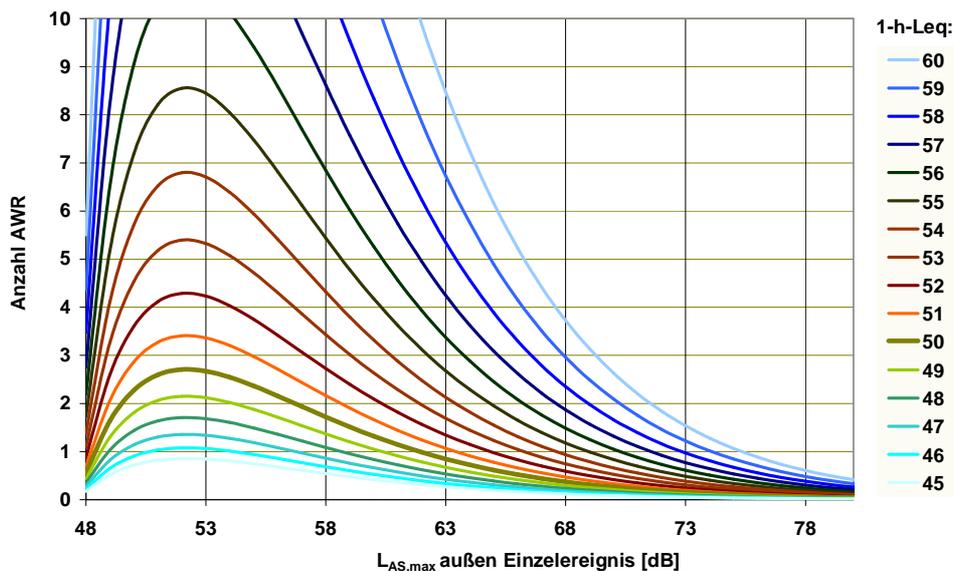


Abbildung 7: Von einer variablen Zahl von Fluglärm-Ereignissen gleichen Maximalpegels erzeugte Anzahl Aufwachreaktionen innerhalb einer Stunde bei Maßgabe einer festen 1-h- L_{eq} Obergrenze (die nicht überschritten werden darf)³

Abhängigkeit der Lärmwirkung von der Flugphase. Aus der Belästigungsforschung ist bekannt, dass Landungen von Flughafenwohnern generell als lästiger bezeichnet werden als Starts (Schreckenberg & Meis, 2006). Es scheint daher prüfenswert, ob sich hinsichtlich der Lärmwirkungen auf den Nachtschlaf ebenfalls Unterschiede zwischen landenden und startenden Maschinen ergeben.

Akustisch sind folgende Merkmale für die jeweilige Flugphase charakteristisch: Landende Flugzeuge erzeugen vor allem in einem relativ schmalen, dafür aber langen Korridor Lärm. Im Anflug sind Flugzeuge sehr niedrig und sinken langsamer (Anflugwinkel ca. 3°), als startende steigen (ca. $10-20^\circ$), was zur Folge hat, dass der zum Boden abgestrahlte Schall beim Landen lokal begrenzt ist und auf eine relativ kleine Bodenfläche auftrifft (Abbildung 8). Außerdem verschieben sich anteilig die Gewichte der einzelnen Schallquellen am Flugzeug relativ zur Situation während des Starts: Wirkungsrelevante Lärmpegel beim Landen treten nur in vergleichsweise kurzem Abstand zwischen Quelle und Empfänger in Erscheinung. Dadurch reduzieren sich die Effekte der geometrischen und der Luftdämpfung womit sich das Spektrum grundsätzlich zu höheren Frequenzen hin verschiebt, außerdem gewinnen aerodynamische Umströmungsgeräusche (z.B. "Pfeifen") gegenüber den Triebwerksgeräuschen an Bedeutung.

³ Basis der Berechnung ist Gleichung (2) in (Basner et al. 2005a). Der LAE eines Fluges wurde näherungsweise angenommen als $L_{AS,max} + 8 \text{ dB}$; Es wurde Zuschlag von 15 dB angenommen, um die Pegeldifferenz zwischen außen und innen bei halbgeöffnetem Fenster abzubilden.

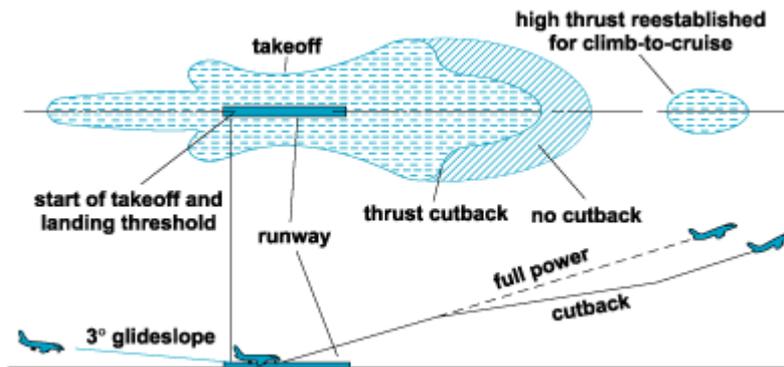


Abbildung 8: Lärmbelastungs-Footprints (schraffierte Flächen) von an- und abfliegenden Flugzeugen (oben) sowie schematisierte An- und Abflugpfade (unten). Die schraffierte Fläche im oberen Teil der Graphik umschließt als Isophone das Gebiet in dem eine bestimmte Mindestbelastung herrscht.

Wirkungsrelevant ist vor allem ein Charakteristikum von landenden Maschinen: In niedriger Höhe anfliegende Flugzeuge verursachen gegenüber einem am Boden befindlichen Beobachter zwar kurz-dauernde, dafür aber *steiflankige* Pegel-Zeit Verläufe im Moment des Vorbei- bzw. Vorüberflugs. Je weiter weg sich ein Beobachter von der Pistenchwelle und/oder senkrecht zur Anfluglinie befindet, desto flacher wird der Pegelverlauf. Bei Starts ist die Schallabstrahlung zwar sehr groß, durch den schnellen Steigflug verteilt sich der Schall jedoch schneller auf eine größere Bodenfläche, was über die Zeit betrachtet einen weniger steilen Pegelverlauf ergibt. Der Pegel-Zeit Verlauf einer landenden und einer startenden Maschine ist exemplarisch in Abb. 9 wiedergegeben.

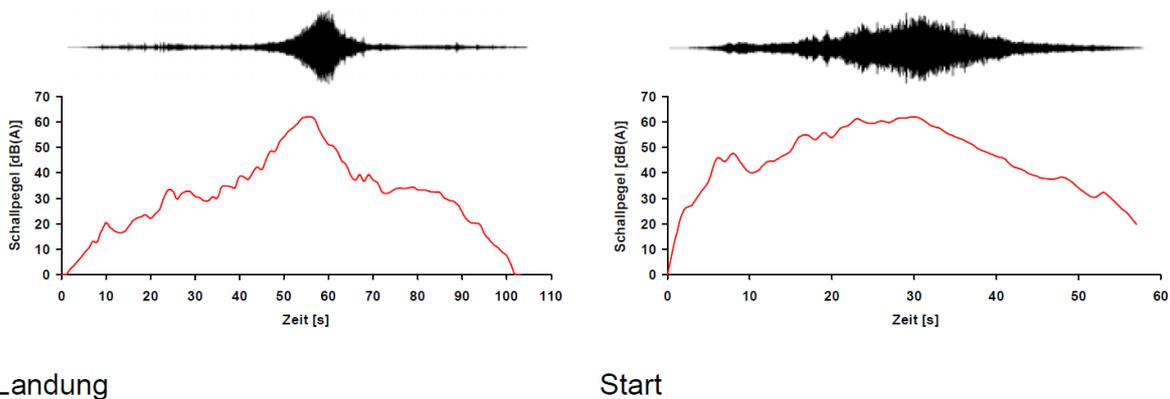


Abbildung 9: Beispielhafte Wellenformen (oben) und Pegelverläufe einer landenden und einer startenden Maschine an einem Immissionspunkt in Flughafennähe. Datengrundlage: Akustik-Aufnahmen am Flughafen Zürich aus der "Lärmstudie 2000" (Brink, Wirth, Rometsch & Schierz, 2007).

Steile Pegelflanken, also schnelle Änderungsgeschwindigkeiten des Pegels (etwa so wie Abbildung 9 links), haben sich nebst dem Maximalpegel als besonders bedeutsamer Prädiktor für physiologische Reaktionen während des Schlafs erwiesen (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011b; Brink, Lercher, Eisenmann & Schierz, 2008; Elmenhorst et al., 2012, siehe auch Kap. 2.1; Marks, Griefahn & Basner, 2008). Unterschiede zwischen Lärmereignissen landender und startender Flugzeuge wurden explizit in der "Lärmstudie 2000" mit einem nichtinvasiven Aufzeichnungsverfahren für schlafphysiologische Parameter (Hochauflösende Aktimetrie-, Herz- und Atemparameter) in einem experimentellen Set-

ting im Feld untersucht. Dort zeigte sich, dass steilere Anstiegsflanken – wie sie typischerweise direkt unterhalb von Landeanflugschneisen auftreten – die stärksten Bewegungsreaktionen der Schläfer erzeugen (Brink et al., 2008). Diese Eigentümlichkeit hat potentiell Implikationen für die Dimensionierung von Lärmschutz bzw. die Lärmbeurteilung, denn landende Flugzeuge eines bestimmten Maximalpegels erzeugen an einem gegebenen Immissionsort fast immer einen geringeren Energiebeitrag im L_{eq} (bzw. dem Ereignispegel L_E), als startende. Die potentielle Wirkung auf physiologische Reaktionen wird bei dieser Situation durch den L_{eq} besonders schlecht abgebildet, bzw. durch ein L_{eq} -Kriterium schlechter begrenzt, als an Immissionspunkten mit gemischtem Lande- und Startbetrieb oder an solchen, die vorwiegend von Startlärm betroffen sind.

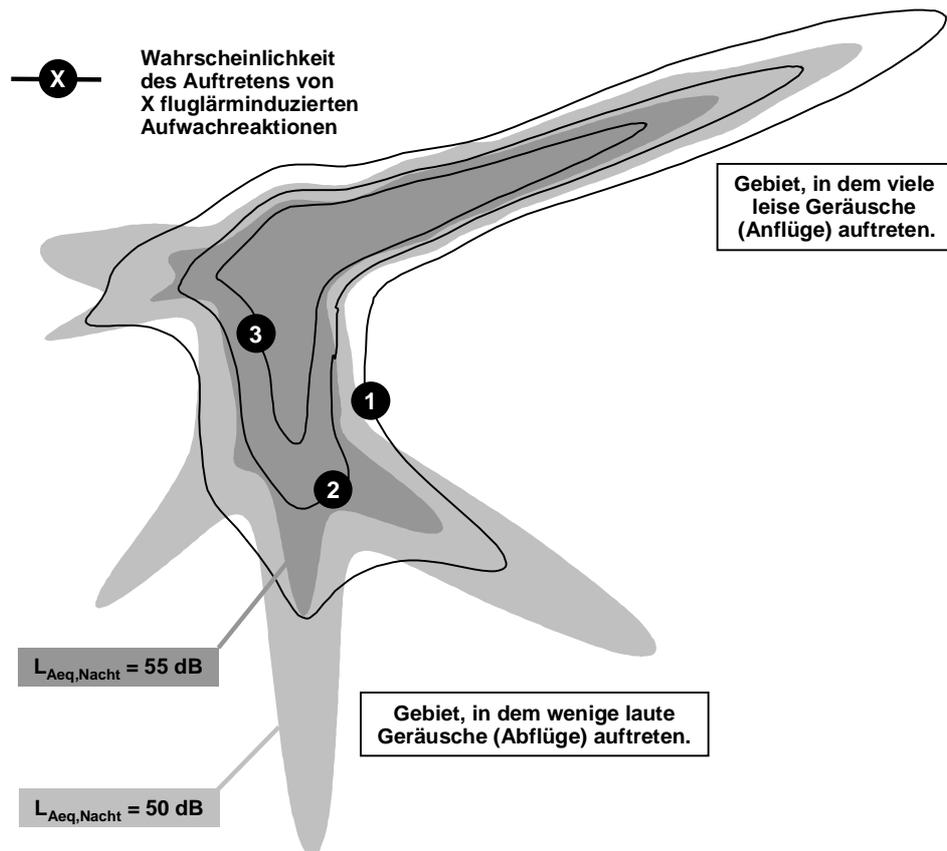


Abbildung 10: Konturen des Gebiets um den Flughafen Frankfurt, in welchem eine, zwei oder drei Aufwachreaktionen (pro Nacht) durch Fluglärm hervorgerufen werden; Flächen mit 50 bzw. 55 dB(A) Belastung. Zugrunde liegt ein Flugbetrieb mit etwa 25 000 Nachtflugbewegungen in den sechs verkehrsreichsten Monaten (Grafik und Berechnungen aus: Basner et al., 2005a)

Die Problematik kann beispielhaft illustriert werden, wenn man auf einer Karte rund um ein Flughafengebiet akustische *Belastungs*-Konturen mit *Wirkungs*-Konturen vergleicht. *Abbildung 10* zeigt eine Berechnung für den Flughafen Frankfurt, bei welcher zwei mittelwertsbasierte Belastungs-Konturen ($L_{Aeq,Nacht} = 50 \text{ dB}$ und $L_{Aeq,Nacht} = 55 \text{ dB}$) mit Wirkungskonturen für die Wahrscheinlichkeit 1, 2, oder 3 Aufwachreaktionen pro Nacht zu erfahren, verglichen werden können. Anflüge in dieser Zeit erfolgen mehrheitlich aus Osten, Abflüge nach Süden. Es wird deutlich, dass die Kontur für 1 Aufwachreaktion im Osten des Flughafens eine grössere Fläche umschließt als die 50-dB Kontur, während sich im Süden ein anderes Bild zeigt: hier überlappt die 50-dB Kontur in den Abflugrichtungen Südwest, Süd,

und Südost, die Kontur für 1 Aufwachreaktion. Der L_{eq} erfüllt also in dieser Gegend seine Funktion als Wirkungskriterium offenbar besser als in Gebieten, in denen hauptsächlich Anflüge stattfinden.⁴

Sollte sich der unterschiedlich starke Einfluss verschiedener Pegelverlaufsstrukturen auf z.B. Aufwachreaktionen weiter erhärten, könnte dies als Hinweis dafür gewertet werden, dass Personen, die dem Lärm von landenden Flugzeugen direkt unterhalb von Anflugpfaden ausgesetzt sind, eine besonders kritische Gruppe von Immissionsempfängern darstellen, die durch aktuelle Regelungen nicht wirkungsadäquat geschützt werden.

2 Darstellung des aktuellen Wissensstands

Während im Verlauf des Tages durch die erhöhte Hintergrundlärmbelastung Fluglärm-Immissionen eher "erträglich" erscheinen, wird die Störung der Nachtruhe gemeinhin als wichtigstes Lärmproblem überhaupt angesehen. Der WHO-Report "Burden of disease from environmental noise" von 2011 (WHO, 2011) kommt zu dem Schluss, dass die Belastung durch Lärm in der Nacht die wichtigste Determinante der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch Lärm darstellt. Die meisten Lärmwirkungsstudien mit Fokus Nachtlärm haben bislang im Wesentlichen drei Wirkungsdimensionen untersucht, die (akute) *Störung des Schlafs* einerseits, die (bewusst) erlebte *Belästigung* andererseits, sowie langfristige *Gesundheitseffekte*, die sich etwa in erhöhten Risiken für kardiovaskuläre Erkrankungen zeigen. Sofern man grundsätzlich auch die *Belästigung* durch Fluglärm (in der Nacht) als Wirkung mit Gesundheitswert auffassen möchte, wäre die zu sichtende und zu bewertende Literatur sehr viel umfangreicher. Im Rahmen des vorliegenden Berichts soll die *Belästigung durch nächtlichen Fluglärm* jedoch nicht im engeren Sinne unter "gesundheitliche Wirkungen" subsummiert und deshalb nicht systematisch in der Literaturanalyse berücksichtigt werden. Es sei damit jedoch nicht impliziert, dass Belästigungen durch Lärm zur Nachtzeit keinerlei Gesundheitsrelevanz hätten. Die Darstellung des aktuellen Wissensstands beschränkt sich in diesem Bericht im Wesentlichen auf Fluglärm-Wirkungen auf den Schlaf, auf Folgen durch Fluglärm gestörten Schlafs auf Leistung und Befinden am Tag und auf nachgewiesene oder vermutete gesundheitliche *Folgewirkungen* von lärmgestörtem Schlaf sowie auf Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung tags/nachts und langfristigen Gesundheits-Endpunkten. In einem gesonderten Kapitel wird kurz auf *Belästigungsreaktionen* während der Nacht bzw. in den sog. Nachtrandstunden eingegangen.

Griefahn (1990) teilt lärmbedingte Schlaf-Störungen ein in *primäre*, *sekundäre*, und *tertiäre* Störungen, d.h. Effekte, die sich im Wesentlichen in ihrem Auftretenszeitpunkt und ihrer Dauer unterscheiden. Wir wollen diese Einteilung für den Zweck dieses Berichts übernehmen und in etwa folgendermaßen inhaltlich präzisieren:

Primäre Effekte. Primäre Effekte sind unmittelbare (akute) Reaktionen auf Lärmereignisse während des Schlafs und sind bis zu einem bestimmten Mass kurzfristig kompensierbar. Darunter fallen im

⁴ Anmerkung: Die Grafik veranschaulicht lediglich den Effekt des geringen Energieeintrags im L_{eq} , aber nicht den Effekt der steilen Pegelflanken beim Anflug aus Osten, denn die Aufwach-Kontur wurde hier mit einem Expositions-Wirkungsmodell berechnet, welches den Faktor "Anstiegsteilheit des Pegels" nicht berücksichtigt.

Wesentlichen kurzzeitige Aktivierungen (autonome und kortikale Arousal, motorische Arousal, Schlafstadienwechsel, Aufwachreaktionen). Aufwachreaktionen als primärer Indikator für (durch Geräusche hervorgerufene) Störungen des Schlafes werden heute vielfach, wenn die biologische Reaktion auf Lärm erfasst werden soll, namentlich beim Flug- und Bahnlärm, im Rahmen sog. "Ereigniskorrelierter Untersuchungen" (z.B. Basner et al., 2005; Basner et al., 2011; Elmenhorst et al., 2012; Marks et al., 2008) herangezogen.

Sekundäre Effekte. Sekundäre Effekte entstehen als Folge von primären Schlafstörungen, die ein bestimmtes Mass überschreiten und nicht mehr (in derselben Nacht) kompensiert werden können. Es handelt sich hierbei um reversible Beeinträchtigungen des subjektiven Schlaferlebens, des Allgemeinbefindens und/oder der kognitiven Leistungsfähigkeit nach einer lärmgestörten Nacht.

Tertiäre Effekte. Tertiäre Effekte/Wirkungen entstehen nach langfristiger Exposition, wenn primäre und sekundäre Schlafstörungen ein Ausmaß erreichen, das nicht mehr kompensiert werden kann. Dazu gehören im Wesentlichen Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems, d.h. Hypertonie, ischämische Herzkrankheiten und Herzinfarkte. Zu den Langzeiteffekten von durch Lärm verursachten Schlafstörungen können auch Belästigungen und Verhaltensänderungen der Betroffenen gezählt werden. Personen etwa, welche in lärmbelastetem Gebiet wohnen, brauchen nachweislich mehr Schlaf- und Beruhigungsmittel, benutzen vermehrt Hörpfropfen oder schlafen nur noch bei geschlossenem Fenster (Berglund, Lindvall & Schwela, 1999).

Im Folgenden wird die Darstellung des aktuellen Wissensstands unterteilt in (1) akute Wirkungen primärer und sekundärer Art und (2) Langzeitfolgen nächtlicher Lärmbelastung.

2.1 Akute Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf und Folgewirkungen fluglärmgestörten Schlafs am Tag

Es ist grundsätzlich plausibel, dass durch Fluglärm hervorgerufene Schlafstörungen in Abhängigkeit von Ausmaß und Dauer alle in Kapitel 1.3.1 beschriebenen Folgen von zu kurzem oder fragmentiertem Schlaf ebenfalls hervorrufen können. Verständlicherweise wurde der direkte Nachweis nicht für alle Endpunkte, sondern nur für einige ausgewählte, geführt. Diese Studien werden in diesem Kapitel etwas detaillierter besprochen. Zunächst gibt *Abbildung 11* einen schematischen Überblick über akute Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf und Folgewirkungen lärmgestörten Schlafs am Tage.

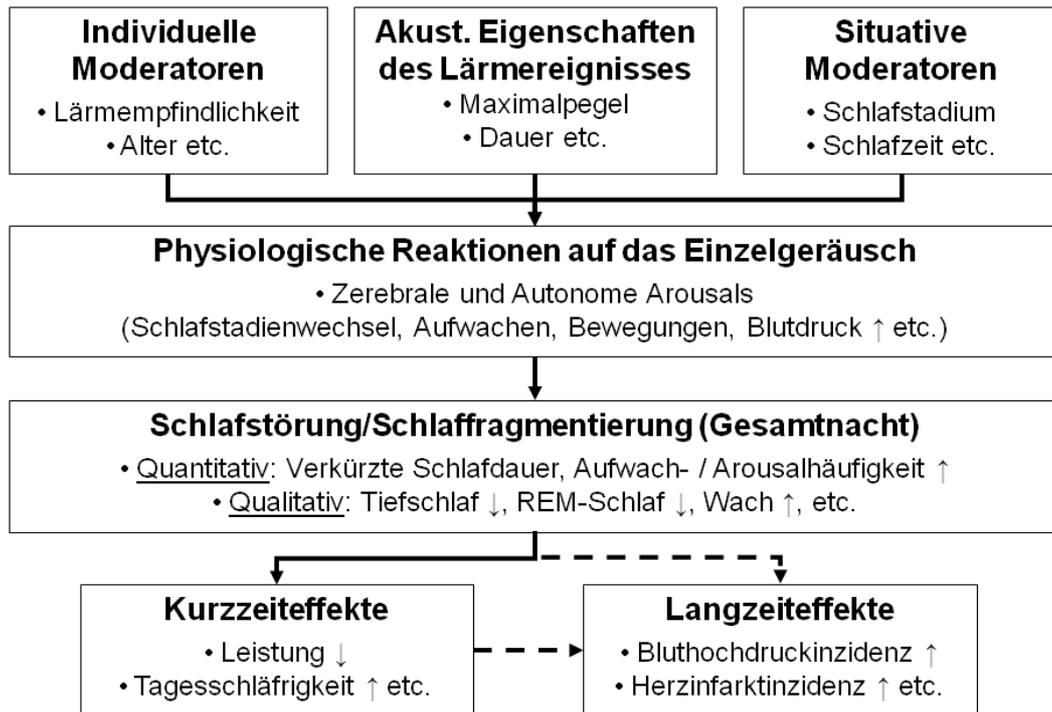


Abbildung 11: Lärmwirkungen auf den Schlaf (aus Basner, Müller & Griefahn, *Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep*, Copyright 2010, with permission from Elsevier.)

Ob Fluglärm zu einer physiologischen Reaktion führt oder nicht, hängt neben den akustischen Eigenschaften des Fluggeräuschs (s.o.) auch von individuellen und situativen Moderatoren ab (z.B. wie lärmempfindlich ist die beschallte Person?, in welchem Schlafstadium befindet sie sich momentan?). Die verschiedenen Ausprägungsgrade der unmittelbaren Reaktion auf Fluglärm wurden ausführlich in 1.3.2 besprochen. In Abhängigkeit von Anzahl und akustischen Eigenschaften (z.B. Maximalpegel) der Fluggeräusche kommt es zu einer Fragmentierung des Schlafs, mit u.a. einer Zunahme der wach verbrachten Zeit, und einer Abnahme von Tief- und Traumschlaf (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011).

In einer repräsentativen Umfrage gaben die Befragten als Grund für eine existierende Schlafstörung Lärm in dritter Position an, angeführt nur von somatischen Beschwerden und Problemen, vom Alltagsstress abzuschalten (Meier, 2004). In Studien, die sich explizit mit Fluglärm befassen, nimmt der Grad der wahrgenommenen Schlafstörung mit Zunahme des Fluglärms ebenfalls zu (Fritschi, Brown, Kim et al., 2011). In Fragebogenerhebungen unmittelbar nach dem Aufwachen fühlten sich Versuchspersonen nach Fluglärmnächten im Vergleich zu Kontrollnächten müder, und sie bewerteten den Schlaf selbst als weniger tief und erholsam (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011). Basner (2008) konnte zeigen, dass mit dem Pupillographischen Schläfrigkeitstest (Wilhelm et al., 2001) objektiv gemessene Schläfrigkeit nach Fluglärmnächten in Abhängigkeit von Anzahl und Maximalpegel der Fluggeräusche ebenfalls erhöht war. Die kognitive Leistungsfähigkeit ist nach Fluglärmnächten regelmäßig signifikant eingeschränkt, aber es handelt sich meist um geringe Einschränkungen, z.B. verlangsamte Reaktionszeiten im Bereich von wenigen Millisekunden (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011; Elmenhorst et al., 2010). Bezüglich der Gedächtnisfunktion konnten Basner, Müller & Elmenhorst (2011) zeigen, dass Versuchspersonen nach Fluglärmnächten weniger Wortpaare, die am Vorabend gelernt wurden, behalten konnten als nach lärmfreien Nächten. Der Unterschied war jedoch gering (im Mittel 0,4 Wortpaare weniger) und statistisch nicht signifikant.

Insgesamt kann man die Erkenntnisse von Laborstudien (unter kontrollierten Bedingungen im Schlaflabor) und Feldstudien (Beobachtungsstudien in Schlafzimmern von Flughafenwohnern) zu den akuten Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf und zu den Folgewirkungen lärmgestörten Schlafs am Tag wie folgt zusammenfassen:

Es besteht kein Zweifel, dass Fluglärm den Schlaf stört und in Abhängigkeit von Anzahl und Lautstärke der Verkehrsgeräusche zu Veränderungen der Schlafstruktur führt (Muzet, 2007). Aufgrund von biologisch plausiblen Gewöhnungseffekten sind diese Veränderungen jedoch, zumindest in den bislang untersuchten Bevölkerungsgruppen und abgesehen von einzelnen empfindlichen Individuen, eher subtil (z.B. mittlere Verringerung des Tief- und Traumschlafs um wenige Minuten) und nicht mit klinischen Schlafstörungen zu vergleichen (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011). Ausgeprägte Gewöhnungseffekte können im Labor sowohl innerhalb einer als auch über mehrere Nächte hinweg beobachtet werden (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011). Entsprechend fallen Reaktionswahrscheinlichkeiten auf Verkehrslärm (z.B. Aufwachen) im Feld deutlich geringer aus als im Labor (Basner et al., 2004; Pearsons, Barber, Tabachnick & Fidell, 1995). Die Anpassung ist jedoch nicht komplett, d.h. auch nach langjähriger Exposition können immer noch Reaktionen auf den Verkehrslärm im Feld registriert werden. Das trifft insbesondere für lärmbedingte Aktivierungen des vegetativen Nervensystems zu (z.B. Herzrasen, Blutdruckanstieg), für die im Vergleich z.B. zum Aufwachen geringere Gewöhnungseffekte gezeigt wurden (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011; Buxton et al., 2012b). Zudem ist wenig bekannt über interindividuelle Unterschiede in der Fähigkeit, sich dem Verkehrslärm anzupassen.

Trotz der geringen Änderungen der Schlafstruktur wurde nachgewiesen, dass Verkehrslärm die objektiv gemessene Tagesmüdigkeit erhöht (Basner, 2008), zu Verlangsamungen der Reaktionszeit führt (Elmenhorst et al., 2010) und die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten (wenn auch statistisch nicht signifikant) beeinträchtigen kann (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011). Im Vergleich zu klinischen Schlafstörungen, Alkoholeinfluss oder Sauerstoffmangel sind die Effekte jedoch geringer ausgeprägt.

Neuere Feldstudien kommen zu der Erkenntnis, dass erste Reaktionen auf Verkehrslärm bereits bei Maximalpegeln von 33-35 dB, d.h. nur wenige Dezibel über dem gemessenen Hintergrundpegel, beobachtet werden können (Basner et al., 2006; Passchier-Vermeer, Vos, Steenbekkers et al., 2002). Diese Beobachtung erscheint physiologisch plausibel, da erste Reaktionen dann zu beobachten sein sollten, sobald das menschliche Gehör dazu in der Lage ist, das Verkehrsgeräusch vom Hintergrundgeräusch zu differenzieren.

Menschen reagieren mit stark unterschiedlicher Empfindlichkeit auf Verkehrslärm im Schlaf. Ältere Mitbürger, Kinder, Kranke, und Schichtarbeiter wurden in der Vergangenheit als Risikogruppen für durch (Flug)lärm gestörten Schlaf identifiziert (Basner, Van den Berg & Griefahn, 2010). Der Großteil der Labor- und Feldstudien zum Thema Fluglärm und Schlaf konzentrierte sich jedoch bislang auf gesunde erwachsene Kollektive. Hierdurch wird die interne Validität der Studien erhöht. Es wird z.B. ausgeschlossen, dass eine Schlafkrankheit - zusätzlich zum Fluglärm - für die beobachteten Schlafstrukturänderungen verantwortlich ist. Auf der anderen Seite wird die externe Validität, d.h. die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Gesamtbevölkerung, eingeschränkt. Der Umfang und die Repräsentativität bisher durchgeführter Studien zum Thema Verkehrslärm und Schlaf muss vor diesem Hintergrund als unzureichend bezeichnet werden.

Der Schlaf älterer Menschen ist flacher (weniger Tiefschlaf) und deshalb anfälliger für lärmbedingte Schlafstörungen. Ältere Menschen wachen aufgrund eines geringeren Schlafdrucks zudem häufig frühzeitig auf, ohne wiedereinschlafen zu können. Eine hohe Fluglärmbelastung in den frühen Morgenstunden dürfte deshalb für ältere Menschen ein besonderes Problem darstellen. Kinder schlafen zwar tiefer und länger als Erwachsene (Eberhardt, 1990), sie befinden sich allerdings auch in einer empfindlichen Entwicklungsphase, in der selbst geringfügige Veränderungen der Schlafstruktur von Bedeutung für die kognitive Entwicklung sein könnten (Basner & Samel, 2007). Abgesehen von der Insomnie, einer von Ein- und Durchschlafstörungen gekennzeichneten primären Schlafkrankheit, gehen viele andere Erkrankungen mit Schlafstörungen einher (z.B. Asthma, Vergrößerung der Vorsteherdrüse beim Mann mit häufigen nächtlichen Toilettenbesuchen, mit Schmerzen einhergehende Krankheitsbilder wie Bandscheibenvorfälle oder Rheuma). In diesen Fällen kann Fluglärm den ohnehin leichteren Schlaf besonders stark stören. Ähnliches gilt für Schichtarbeiter, und hier insbesondere Nachtarbeiter, die am Tage schlafen müssen, also zu einer Zeit, an der die innere Uhr auf Wachen eingestellt ist (Sallinen & Kecklund, 2010). Die Fluglärmbelastung am Tage fällt zudem in der Regel deutlich stärker aus als in der Nacht.

Es ist nach den Ausführungen in Kapitel 1.3.1 plausibel, dass langfristig durch Lärm gestörter Schlaf zur Entstehung von - insbesondere kardiovaskulären - Krankheiten beiträgt (s. *Abbildung 11* unten), auch wenn dieser Nachweis explizit noch nicht erbracht wurde (und auch nur durch Langzeitstudien zu erbringen wäre, in denen individuelle Faktoren, die zur Entstehung von Krankheiten beitragen können, exakt kontrolliert werden). Immerhin hält eine Expertengruppe der WHO (2009) die Evidenz dafür, dass lärmbedingte akute Beeinträchtigungen des Nachtschlafs langfristige Krankheitsfolgen haben kann, für 'begrenzt', aber 'biologisch plausibel'. Ein ganz anderer Ansatz zur Prüfung der Kausalkette zwischen Nachtfluglärm und Krankheitsrisiken stellen epidemiologische Studien dar. Diese befassen sich mit langfristiger Fluglärmexposition als Risikofaktor für Beeinträchtigungen der Gesundheit (z.B. Erhöhung des Risikos für Bluthochdruck). Diese Studien werden ausführlich in Kapitel 2.2 besprochen.

2.1.1 Literaturübersicht zu den akuten Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf und zu den Folgewirkungen fluglärmgestörten Schlafs am Tag

In diesem Kapitel werden Studien zu den akuten Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf und zu den Folgewirkungen fluglärmgestörten Schlafs am Tag in tabellarischer Form dargestellt und anschließend kurz besprochen. Dabei beschränkt sich die Auflistung auf Studien, die in wissenschaftlichen Fachzeitschriften ab dem Jahr 1990 veröffentlicht wurden. Die Literaturübersicht beinhaltet nur Originalarbeiten, keine Übersichtsarbeiten oder Meta-Analysen. Aus diesem Grund findet auch die viel diskutierte "Fluglärm-Synopse" (Scheuch, Spreng & Jansen, 2007a, 2007b) zumindest an dieser Stelle keine Erwähnung.

Die Bewertung der Validität (bzw. Gültigkeit) einer Studie hängt vom Design, von der Durchführung, und von der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse der Studie ab. Eine einzelne Studie wird immer für die Beantwortung einer bestimmten Fragestellung konzipiert und das Studiendesign entsprechend optimiert sein. Die interne Validität ist gegeben, wenn die Ergebnisse für die Gruppe der untersuchten Versuchspersonen Gültigkeit besitzt. Externe Validität ist gegeben, wenn die in den Versuchspersonen gefundenen Ergebnisse auf eine größere Grundgesamtheit übertragbar (d.h. ver-

allgemeinerbar) sind. Entscheidende Kriterien für die externe Validität sind neben einer zufällig gezogenen, ausreichend großen und für die abzubildende Population repräsentativen Stichprobe auch eine ausreichende große Teilnahmerate der angeschriebenen Versuchspersonen. Diese Kriterien sind für polysomnographische Studien praktisch nicht erfüllbar, da durch die aufwändige Messmethodik sowohl die Anzahl der untersuchten Versuchspersonen als auch die Teilnahmeraten in der Regel begrenzt sind.

Bei den Studienformen sind Laborstudien von Feldstudien zu unterscheiden. Laborstudien finden unter kontrollierten Bedingungen im Schlaflabor statt. Neben dem Fluglärm (der meist über Lautsprecher wiedergegeben wird) können viele andere wichtige Variablen vorgegeben werden (z.B. keine Störgeräusche von anderen Verkehrsträgern, kontrollierte Licht- und Temperaturbedingungen, usw.). Laborstudien sind entsprechend für gezielte Fragestellungen geeignet, die im Feld so nicht beantwortet werden könnten (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011). Die ökologische Validität von Laborstudien, d.h. die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Alltagswelt, ist jedoch eingeschränkt. Hierfür werden Feldstudien benötigt, in denen die Reaktionen von Flughafenanwohner auf Fluglärm in der heimischen Umgebung untersucht werden.

Die Bedeutung der Methodik zur Messung von fluglärmbedingten schlafbezogenen Ereignissen wurde bereits in Kapitel 1.3.2 ausführlich diskutiert. Auch hier existiert keine Methodik, die für alle Fragestellungen optimal geeignet wäre. Die Validität von Untersuchungen, die sich ausschließlich auf Fragebögen bzw. signalisiertes Erwachen beschränken, ist jedoch aus oben genannten Gründen eingeschränkt bzw. zweifelhaft.

Die Autoren dieses Textes weisen an dieser Stelle auf einige Übersichtsarbeiten gesondert hin: Michaud et al. (2007) veröffentlichten eine Übersichtsarbeit zu Feldstudien mit dem Thema Fluglärm und Schlaf, die zwischen 1990 und 2003 durchgeführt wurden. In 2009 veröffentlichte die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Night Noise Guidelines for Europe (WHO, 2009). In diesem Dokument wird der aktuelle Wissensstand zum Thema nächtliche Lärmbelastung, Schlaf und Gesundheit zusammengefasst. Basner, Van den Berg et al. veröffentlichten 2010 eine Übersichtsarbeit zum Thema Fluglärm und Schlaf in der Fachzeitschrift *Noise & Health*. Im Anhang des Beitrags findet sich eine tabellarische Übersicht über alle seit 1968 erschienenen Studien zum Thema Fluglärm und Schlaf, in denen Schlaf polysomnographisch gemessen wurde. Diese Übersicht bezieht auch sogenannte "graue" Literatur ein (z.B. Forschungsberichte), die nicht extern begutachtet wurde und zum Teil nur noch schwer erhältlich ist. In derselben Ausgabe (Heft 47, 2010) von *Noise & Health* sind eine Reihe weiterer Übersichtsarbeiten zum Thema Lärm und Schlaf erschienen. Ebenfalls in 2010 veröffentlichten Basner, Müller und Griefahn eine Anleitung zur Risikobewertung von Verkehrslärmwirkungen auf den Schlaf in der Fachzeitschrift *Applied Acoustics* (Basner, Müller & Griefahn, 2010). Perron, Tetreault et al. veröffentlichten 2012 eine weitere Übersichtsarbeit zum Thema Fluglärm und Schlaf in der Fachzeitschrift *Noise & Health*. Diese Arbeit beschränkt sich, wie wir, auf Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, beinhaltet aber auch eine vor 1990 veröffentlichte Studie. In dieser Übersichtsarbeit versuchen die Autoren, eine qualitative Unterscheidung zwischen den Studien vorzunehmen.

Die Autoren möchten außerdem auf eine groß angelegte holländische Studie hinweisen, die jedoch nur als Forschungsbericht veröffentlicht wurde (Passchier-Vermeer et al., 2002). In dieser Studie wurden 418 in der Nähe des Amsterdamer Flughafens wohnende Versuchspersonen über jeweils 11

aufeinanderfolgende Nächte mit Aktometern untersucht. Es wurden 63.242 Fluggeräusche aufgezeichnet, und Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen dem Maximalpegel eines Überflugs und der Wahrscheinlichkeit, dass sich die Versuchsperson bewegt, erstellt. Die Expositions-Wirkungsbeziehung hatte starke Ähnlichkeit mit der in der DLR-Feldstudie STRAIN erhobenen Beziehung (Basner et al., 2006).

Tabelle 1: Übersicht über seit 1990 in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlichte Originalarbeiten zum Thema Fluglärm und Schlaf.

Nr.	Erstautor	Jahr	Typ	Methodik	Probanden	Alter
1	Di Nisi	1990	Labor	PSG	20 (10 w)	<30
2	Carter	1994	Labor	PSG	9	46-75
3	Horne	1994	Feld	Aktometrie	400 (211 w)	20-70
4	Fidell	1995	Feld	Drücker	82 (47 w)	19-79
5	Fidell	2000	Feld	Drücker	139	k. A.
6	Carter	2002	Labor	PSG	9 w	20-33
7	Maschke	2002	Feld	Stresshormone	16	k. A.
8	Basner	2004	Labor/ Feld	PSG, Aktometrie	128 (75 w)/ 64 (36 w)	19-65/ 19-61
9	Basner	2005	Labor	PSG, Aktometrie	128 (75 w)	19-65
10	Basner	2006	Feld	PSG, Aktometrie	64 (36 w)	19-61
11	Basner	2006	Feld	PSG, Aktometrie	64 (36 w)	19-61
12	Griefahn	2006	Labor	PSG	24 (12 w)	19-28
13	Basner	2008	Labor	PSG, Aktometrie	128 (75 w)	19-65
14	Basner	2008	Labor	PSG, Aktometrie	24 (12 w)	34 (Mittel)
15	Basner	2008	Labor	PSG, Aktometrie	112 (65 w)	38 (Mittel)
16	Griefahn	2008	Labor	PSG	24 (12 w)	19-28
17	Marks	2008	Labor	PSG	24 (12 w)	19-28
18	Brink	2008	Feld	SSG	60	k. A.
19	Haralabidis	2008	Feld	Blutdruckmessung	140	55 (Mittel)
20	Basner	2009	Feld	PSG, Aktometrie	64 (36 w)	19-61
21	Breimhorst	2009	Labor	PSG	24 (12 w)	19-28
22	Basner	2010	Labor	PSG	112 (65 w)	38 (Mittel)
23	Elmenhorst	2010	Labor/ Feld	PSG, Aktometrie	128 (75 w)/ 64 (36 w)	19-65/ 19-61
24	Basner	2011	Labor	PSG, Aktometrie	72 (40 w)	18-71

PSG: Polysomnographie; SSG: Seimosomnographie; w: weiblich; k. A.: keine Angabe

Die Autoren weisen schließlich darauf hin, dass einige Studien mit mehr als einer relevanten Veröffentlichung in Verbindung stehen. Das gilt insbesondere für die DLR-Fluglärmstudie, die entsprechend mehrfach in *Tabelle 1* aufgelistet ist. Die Zusammenstellung der Arbeiten in *Tabelle 1* erfolgte mit größter Sorgfalt. Die Autoren können jedoch nicht ausschließen, einzelne relevante Studien übersehen und entsprechend nicht in *Tabelle 1* aufgeführt zu haben.

(1) Di Nisi J, Muzet A, Ehrhart J, Libert JP. Comparison of cardiovascular responses to noise during waking and sleeping in humans. Sleep. 1990;13(2):108-20.

In dieser polysomnographischen Laborstudie wurden 20 junge Probanden (10 lärmempfindlich, 10 lärmunempfindlich) in einer Lärmnacht mit 64 Geräuschen beschallt, davon 16 Fluggeräusche. Die Autoren berichten eine transiente Zunahme der Herzfrequenz unter Lärmexposition, sie konnten jedoch keine Unterschiede in der Schlafstadienverteilung zwischen Kontroll- und Lärmnächten finden.

(2) Carter NL, Hunyor SN, Crawford G, Kelly D, Smith AJ. Environmental noise and sleep--a study of arousals, cardiac arrhythmia and urinary catecholamines. Sleep. 1994;17(4):298-307.

In dieser polysomnographischen Laborstudie wurden 9 Patienten mit Herzrhythmusstörungen in einer Lärmnacht mit 50 Fluggeräuschen mit Maximalpegeln zwischen 65 und 72 dB beschallt. Die Autoren beobachteten eine transiente Zunahme von Arousals im EEG, konnten jedoch keine Abhängigkeit vom Schlafstadium finden. Die Katecholaminausscheidung im Urin unterschied sich nicht zwischen Lärm- und Kontrollnächten. Die in der Nacht beobachteten Herzrhythmusstörungen zeigten keine Relation zum Fluglärm.

(3) Horne JA, Pankhurst FL, Reyner LA, Hume K, Diamond ID. A field study of sleep disturbance: effects of aircraft noise and other factors on 5,742 nights of actimetrically monitored sleep in a large subject sample. Sleep. 1994;17(2):146-59.

Hierbei handelt es sich um die erste groß angelegte britische Feldstudie zum Thema Fluglärm und Schlaf, in der Schlaf objektiv mit Aktometrie gemessen wurde. Diese Studie wurde auch ausführlicher in einem Forschungsbericht veröffentlicht (Ollerhead et al., 1992). Jede der 400 Versuchspersonen wurde für 15 aufeinander folgende Nächte untersucht, so dass insgesamt 5.742 Untersuchungsnächte vorlagen. Eine Unterstichprobe wurde in 178 Nächten auch polysomnographisch untersucht. Ein großer Nachteil der Studie ist, dass die Schalldruckpegel nicht innerhalb der Schlafzimmer gemessen wurden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, (1) dass nur eine Minderheit der Fluggeräusche zu Körperbewegungen führte bzw. subjektive Einschätzung der Schlafqualität beeinflussten, (2) dass andere häusliche Faktoren (z.B. Bettpartner, Toilettengang, Kinder) einen stärkeren Einfluss hatten als der Fluglärm, (3) dass, obwohl starke Unterschiede in der Fluglärmbelastung zwischen den Untersuchungsgebieten bestanden, keine signifikanten Unterschiede im Grad der Schlafstörung zwischen den Untersuchungsgebieten festzustellen war, (4) dass weniger fluglärminduzierte Bewegungen in der ersten und letzten Schlafstunde beobachtet werden konnten, (5) dass Männer sich häufiger bewegten als Frauen und auch mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auf ein Fluggeräusch reagierten als Frauen. Diese Veröffentlichung wurde ein Jahr später durch eine weitere Veröffentlichung (Horne, Reyner, Pankhurst & Hume, 1995) erweitert.

(4) Fidell S, Pearsons K, Tabachnick BG, Howe R, Silvati L, Barber D. Field study of noise induced sleep disturbance. J Acoust Soc Am. 1995;98(2):1025-33.

Diese amerikanische Feldstudie fand in der Nähe eines zivilen (783 Untersuchungs Nächte) und eines Militärflughafens (632 Untersuchungs Nächte) statt. Eine dritte Gruppe war nicht Fluglärm ausgesetzt. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, einen Knopf zu drücken, wenn sie in der Nacht, aus welchem Grund auch immer, aufwachten. Die Autoren fanden einen geringen aber signifikanten Zusammenhang zwischen der Lautstärke einzelner Fluggeräusche und der Wahrscheinlichkeit eines Knopfdrucks.

(5) Fidell S, Pearsons K, Tabachnick BG, Howe R. Effects on sleep disturbance of changes in aircraft noise near three airports. J Acoust Soc Am. 2000;107(5 Pt 1):2535-47.

Diese amerikanische Feldstudie fand in der Nähe von den Flughäfen Stapleton International (DEN, 58 Versuchspersonen, 1157 Nächte), der geschlossen werden sollte, Denver International Airport (DIA, 59 Versuchspersonen, 1560 Nächte), der neu eröffnet wurde und DeKalb-Peachtree Airport (PDK, 22 Versuchspersonen, 686 Nächte), der eine Zunahme nächtlichen Flugverkehrs durch die olympischen Spiele 1996 erwartete, statt. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, einen Knopf zu drücken, wenn sie in der Nacht, aus welchem Grund auch immer, aufwachten. Die Autoren konnten keine relevante Veränderung lärminduzierter Schlafstörungen im Zusammenhang mit dem geänderten Flugverkehr feststellen.

(6) Carter N, Henderson R, Lal S, Hart M, Booth S, Hunyor S. Cardiovascular and autonomic response to environmental noise during sleep in night shift workers. Sleep. 2002;25(4):457-64.

In dieser polysomnographischen Studie wurden 9 gesunde, in der Nachtschicht arbeitende Krankenschwestern tagsüber im Schlaflabor mit Schallereignissen von LKWs, zivilen Flugzeugen und militärischen Flugzeugen mit Maximalpegeln von 55, 65 und 75 dB beschallt. Die Autoren fanden einen lärmbezogenen Anstieg von Blutdruck und Herzfrequenz, und eine Änderung der Herzfrequenzvariabilität. Sie konnten keine Gewöhnungseffekte über die 3 Beobachtungsnächte feststellen.

(7) Maschke C, Harder J, Ising H, Hecht K, Thierfelder W. Stress Hormone Changes in Persons exposed to Simulated Night Noise. Noise & Health. 2002;5(17):35-45.

16 Anwohner des Flughafens Hamburg-Fuhlsbüttel wurden über 40 Nächte in ihrem heimischen Umfeld beobachtet. In den letzten 37 Nächten wurden 32 Fluggeräusche mit 65 dB Maximalpegel zusätzlich in die Schlafräume eingespielt. Die Stresshormone Cortisol, Adrenalin, und Noradrenalin wurden im Morgenurin bestimmt. Neben starken interindividuellen Unterschieden fanden die Autoren Unterschiede im Stresshormonmuster in Abhängigkeit vom Geschlecht.

(8) Basner M, Samel A. Nocturnal aircraft noise effects. Noise & Health. 2004;6(22):83-93.

In diesem Artikel werden das Studiendesign der DLR-Studie STRAIN vorgestellt und erste Zwischenergebnisse der Laborstudie präsentiert. Die STRAIN-Studie bestand aus einer Laborstudie, in der 128

Versuchspersonen für jeweils 13 aufeinanderfolgende Nächte polysomnographisch untersucht wurden. In den Nächten 3 bis 11 wurden zwischen 4 und 128 Fluggeräusche mit Maximalpegeln von 45 bis 80 dB in gleichem Abstand über Lautsprecher wiedergegeben. In der Feldstudie wurden 64 Anwohner des Köln/Bonner Flughafens für 9 aufeinanderfolgende Nächte im eigenen Schlafzimmer polysomnographisch untersucht. Schalldruckpegel und Geräusche wurden sowohl innerhalb als auch außerhalb des Schlafraums kontinuierlich aufgezeichnet. Elektrophysiologische und akustische Signale wurden mithilfe eines Triggersignals synchronisiert. Die Versuchspersonen trugen neben der Polysomnographie Aktometer, sie füllten morgens und abends Fragebögen aus, und führten morgens und abends computergestützte Leistungstests durch. Die STRAIN-Studie ist die bislang umfangreichste polysomnographische Labor- und Feldstudie zum Thema Fluglärm und Schlaf.

(9) Basner M, Samel A. Effects of nocturnal aircraft noise on sleep structure. Somnologie. 2005;9(2):84-95.

In diesem Artikel werden Ergebnisse der DLR-Laborstudie STRAIN vorgestellt. Fluglärm führte zu einer Veränderung der Makrostruktur des Schlafs, mit mehr Aufwachreaktionen (+3,5 pro Nacht), mehr oberflächlichem Schlaf S1 (+2,2 Minuten), und weniger Tiefschlaf (-5,3 Minuten). Das Ausmaß der Schlafstrukturänderungen war sowohl mit der Anzahl Fluggeräusche als auch mit dem Maximalpegel der Fluggeräusche assoziiert.

(10) Basner M, Isermann U, Samel A. Aircraft noise effects on sleep: Application of the results of a large polysomnographic field study. J Acoust Soc Am. 2006;119(5):2772-84.

In diesem Artikel werden Ergebnisse der DLR-Feldstudie STRAIN vorgestellt. Die Wahrscheinlichkeit eines Schlafstadienwechsels nach Wach oder in das oberflächlichste Schlafstadium S1 stieg signifikant mit dem Maximalpegel der 10.658 gemessenen und nicht durch andere Geräusche gestörten Fluggeräusche an. Eine - wenn auch geringe - Erhöhung der Aufwachwahrscheinlichkeit war bereits ab Maximalpegeln von 33 dB zu beobachten, also nur wenige Dezibel über dem gemessenen Hintergrundpegel von 27 dB. In diesem Artikel wird auch das Lärmschutzkonzept für den Flughafen Leipzig/Halle, das vom DLR zusammen mit dem Regierungspräsidium Leipzig entwickelt wurde, vorgestellt und substantiiert.

(11) Basner M, Siebert U. Markov-Prozesse zur Vorhersage fluglärmbedingter Schlafstörungen. Somnologie. 2006;10(4):176-91.

In diesem Artikel wird ein komplexes Modell (Markov Modell) zur Vorhersage fluglärmbedingter Aufwachreaktionen vorgestellt, das zur Überprüfung des Lärmschutzkonzeptes für den Flughafen Leipzig/Halle genutzt wurde. Basierend auf den Ergebnissen der Modellrechnungen wurden Flugbewegungen in der 2. Nachthälfte in Leipzig/Halle mit einem Malus von 1,4 dB versehen.

(12) Griefahn B, Marks A, Robens S. Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. J Sound Vib. 2006;295(1-2):129-40.

In dieser polysomnographischen Studie wurden die Versuchspersonen in 9 von 12 Nächten Flug-, Straßen- oder Schienenverkehrslärm beschallt. Die subjektive Einschätzung der Schlafqualität, Reaktionszeiten und physiologische Variablen erfuhren signifikante Veränderungen mit zunehmender Lärmbelastung. Schienenverkehrslärm führte zu den stärksten Veränderungen der Schlafstruktur. Die Autoren schließen aus den Ergebnissen, dass der äquivalente Dauerschallpegel zur Bewertung von subjektiven Reaktionen geeignet zu sein scheint, nicht jedoch für die Vorhersage von physiologischen Reaktionen.

(13) Basner M, Glatz C, Griefahn B, Penzel T, Samel A. Aircraft noise: effects on macro- and micro-structure of sleep. Sleep Med. 2008;9(4):382-7.

In diesem Artikel wird die Eignung von Aufwachreaktionen, Aufwachreaktionen und Wechsel in das Schlafstadium S1, Schlafstadienwechsel, und EEG-Arousals als Indikatoren für (fluglärm)gestörten Schlaf untersucht. Basis ist ein Teildatensatz der DLR-Laborstudie STRAIN. Die Autoren kommen zu dem Erkenntnis, dass ein Großteil der Informationen bezüglich fluglärmbedingter Schlafstörungen durch Makrostruktur-Parameter (Aufwachreaktionen oder Aufwachreaktionen und Wechsel in das Schlafstadium S1) dargestellt werden kann. EEG-Arousals können in Situationen mit niedrigen Maximalpegeln, chronischem Schlafentzug, oder chronischer Lärmbelastungssituation relevante zusätzliche Informationen beitragen.

(14) Basner M. Nocturnal aircraft noise increases objectively assessed daytime sleepiness. Somnologie. 2008;12(2):110-7.

In der DLR-Laborstudie STRAIN wurde ein Teil der Versuchspersonen morgens mit dem Pupillographischen Schläfrigkeitstest (Wilhelm et al., 2001), ein objektives Verfahren zur Messung von Tagesmüdigkeit, untersucht. Die Tagesmüdigkeit nahm nach Nächten mit Fluglärmexposition signifikant sowohl mit der Anzahl als auch mit dem Maximalpegel der Fluggeräusche zu, war aber selbst nach den lautesten Fluglärmnächten geringer als in einem Vergleichskollektiv von Patienten mit obstruktivem Schlafapnoesyndrom.

(15) Basner M, Müller U, Elmenhorst EM, Kluge G, Griefahn B. Aircraft noise effects on sleep: a systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations. Physiol Meas. 2008;29(9):1089-103.

In diesem Artikel wird die Übereinstimmung zwischen polysomnographisch erfassten Aufwachreaktionen und automatisch anhand des EKG ermittelten EEG-Arousals ermittelt. Als Datenbasis dienten Reaktionen auf 23.855 Fluggeräusche, die in 985 Nächten von 112 Teilnehmern der DLR-Laborstudie STRAIN gemessen wurden.

(16) Griefahn B, Bröde P, Marks A, Basner M. Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. Sleep. 2008;31(4):569-77.

In dieser Studie wurden 24 Versuchspersonen in 3 von 12 Versuchsnächten mit 195 Fluggeräuschen mit Maximalpegeln zwischen 43 und 76 dB beschallt. Das Hauptaugenmerk der Analyse lag auf Herzfrequenzbeschleunigungen. Die Autoren konnten keine Abschwächung der Herzfrequenzreaktionen über mehrere Nächte beobachten, und stellten eine deutlich stärkere Herzfrequenzbeschleunigung fest, wenn die Reaktion von einer Aufwachreaktion im EEG begleitet wurde.

(17) Marks A, Griefahn B, Basner M. Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise. Noise Contr Eng J. 2008;56 (1):52-62.

In dieser polysomnographischen Studie wurden die Versuchspersonen in 9 von 12 Nächten Flug-, Straßen- oder Schienenverkehrslärm beschallt. Die Aufwachwahrscheinlichkeit stieg signifikant mit dem Maximalpegel, der Pegelanstiegssteilheit, der Geräuschkdauer und dem geräuschfreien Intervall zwischen zwei Lärmereignissen an. Geschlecht, subjektiv bestimmte Lärmempfindlichkeit und das Alter hatten keinen signifikanten Einfluss. Bei gleichem Maximalpegel stieg die Aufwachwahrscheinlichkeit in der Reihenfolge Fluglärm, Straßenverkehrslärm und Schienenverkehrslärm.

(18) Brink M, Lercher P, Eisenmann A, Schierz C. Influence of slope of rise and event order of aircraft noise events on high resolution actimetry parameters. Somnologie. 2008;12(2):118-28.

In einer experimentellen Feldstudie bei 60 Anwohnern in der Umgebung des Flughafens Zürich untersuchten die Autoren die Wirkung von Fluglärmereignissen auf Körperreaktionen vor dem Aufwachen am Morgen. Dabei wurden in den Schlafzimmern der Versuchspersonen zuvor aufgezeichnete Fluglärmgeräusche abgespielt. Mit einem nichtinvasiven Aufzeichnungsverfahren (Brink, Müller & Schierz, 2006) wurden Körperbewegungen ereigniskorreliert registriert. Die Resultate ergaben, dass vor allem die ersten paar Lärmereignisse am frühen Morgen die stärksten Reaktionen evozierten und diese mit zunehmender Anzahl erlebter Lärmereignisse abnehmen. Es zeigte sich auch, dass die Motilität von der Anstiegsgeschwindigkeit des Schallpegels abhängt.

(19) Haralabidis AS, Dimakopoulou K, Vigna-Taglianti F, Giampaolo M, Borgini A, Dudley ML, et al. Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. Eur Heart J. 2008;29(5):658-64.

Eine Teilstichprobe der repräsentativen HYENA-Studie (L. Jarup et al., 2008) von 140 Probanden wurde im Umfeld von 4 europäischen Großflughäfen (Athen, Malpensa, Arlanda und London Heathrow) untersucht. Die Autoren stellten fest, dass nächtlicher Lärm zu einem Anstieg des Blutdrucks (Anstieg des systolischen und diastolischen Blutdrucks um 6,2 mm Hg bzw. 7,4 mmHg) und der Herzfrequenz (nicht signifikanter Anstieg um 5,4 /min) führt. Die verschiedenen Lärmquellen (Innenraum, Fluglärm,

Straßenlärm und anderer Außenlärm) führten zu vergleichbaren Blutdruckveränderungen. Die häufigste Lärmquelle war der Innenraum, und hier das Schnarchen. Die Tatsache, dass die Effekte bei Betrachtung von 1- und 15-min-Intervallen vergleichbar waren, weist eher auf einen länger bestehenden und nicht nur sehr kurzen Effekt des Lärms auf den Blutdruck hin. In dieser Studie wurde ein Lärmereignis ab 35 dB im Innenraum definiert.

(20) Basner M. Validity of aircraft noise induced awakening predictions. Noise Contr Eng J. 2009;57(5):524-35.

In diesem Artikel werden Untersuchungen zur Vorhersage von fluglärmbedingten Aufwachwahrscheinlichkeiten angestellt. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass Variablen nur dann in Vorhersagemodelle aufgenommen werden sollten, wenn sie (a) einen relevanten Einfluss auf den Schlaf haben, (b) Informationen über die Verteilung der Variablen in der exponierten Bevölkerung vorliegen und (c) die Verteilung der Variablen in der Zielpopulation signifikant von der Studienpopulation, die zur Bestimmung der Expositions-Wirkungsbeziehung herangezogen wurde, abweicht.

(21) Breimhorst M, Marks A, Robens S, Griefahn B. Blink rate during tests of executive performance after nocturnal traffic noise. Noise Health. 2009;11(45):217-22.

In dieser polysomnographischen Studie wurden die Versuchspersonen in 9 von 12 Nächten Flug-, Straßen- oder Schienenverkehrslärm beschallt. Die Lärmbelastung zeigte keinen Zusammenhang mit der Leistung in einer Go/Nogo- und einer Switch-Aufgabe. Die Augenblinkfrequenz war mit der Verkehrslärmart, nicht jedoch mit der Lautstärke assoziiert.

(22) Basner M, Siebert U. Markov processes for the prediction of aircraft noise effects on sleep. Med Decis Making. 2010;30(2):275-89.

In diesem Artikel wird, basierend auf den Daten der DLR-Laborstudie, mit Hilfe von Markov Modellen der Einfluss von der Einführung eines Nachtflugverbotes am Frankfurter Flughafen abgeschätzt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Verbesserung der Schlafstruktur durch das Nachtflugverbot vermutlich gering ausfallen wird. Die Studie zeigt gleichzeitig, dass hohe Fluglärmbelastungen in den Tagesrandstunden (später Abend, früher Morgen), mit starken Schlafstrukturänderungen bei jenen Personen einhergehen, die früh zu Bett gehen oder früh aufstehen (müssen), wie z.B. Kinder oder Schichtarbeiter.

(23) Elmenhorst EM, Elmenhorst D, Wenzel J, Quehl J, Müller U, Maass H, et al. Effects of nocturnal aircraft noise on cognitive performance in the following morning: dose-response relationships in laboratory and field. Int Arch Occup Environ Health. 2010;83(7):743-51.

In der DLR Labor- und Feldstudie STRAIN durchgeführten computergestützten Leistungstests war die Reaktionszeit in Abhängigkeit vom äquivalenten Dauerschallpegel L_{Aeq} und von der Anzahl der Fluggeräusche geringfügig, aber statistisch signifikant, verlängert.

(24) Basner M, Müller U, Elmenhorst E-M. Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. Sleep. 2011;34(1):11-23.

In dieser polysomnographischen Studie wurden die drei Verkehrsträger Flug, Straße und Schiene in 9 aufeinander folgenden Nächten systematisch hinsichtlich ihrer Wirkungen auf den Schlaf untersucht. Ähnlich wie bei Marks et al. (2008) stieg die Aufwachwahrscheinlichkeit bei gleichem Maximalpegel in der Reihenfolge Flug, Straße, Schiene. Fluglärm führte jedoch zu den negativsten subjektiven Einschätzungen am nächsten Morgen, vermutlich wegen der längeren Dauer der Geräusche, die dann während der Wiedererlangung des Wachbewusstseins als Fluggeräusche wahrgenommen werden und entsprechend zu Belästigungen führen. Neben Maximalpegel und Pegelanstiegssteilheit wurden hohe Frequenzanteile (> 3 kHz) im Geräusch als signifikanter Prädiktor für Aufwachwahrscheinlichkeit identifiziert. Die beobachteten Änderungen der Schlafmakrostruktur waren gering, zum Teil bedingt durch eine Umverteilung von spontan auftretenden Aufwachreaktionen. Es konnten deutliche Gewöhnungseffekte über mehrere Nächte beobachtet werden, jedoch weniger stark für EEG-Arousals und praktisch nicht für Herzfrequenzbeschleunigungen.

2.2 Langzeitfolgen nächtlicher Lärmbelastung

Mit Ausnahme des relativ gut untersuchten Risikos von Hörschädigungen durch die Lärm-Dauerbelastung (z.B. am Arbeitsplatz) gibt es zurzeit nur wenige gesicherte Kenntnisse über körperlich-somatische Schädigungen, die zweifelsfrei auf Umweltlärm zurückzuführen sind. Die Zweifel sind meist damit zu begründen, dass die Entstehung von Krankheiten in der Regel neben der Lärmbelastung noch mehrere andere Ursachen hat, die in den bisherigen Untersuchungen nicht exakt kontrolliert wurden. Ein erster Zugang, nachtlärmbedingte (organische) Funktionsänderungen mit langfristige Krankheitswert zu detektieren, besteht in der Untersuchung von Primärstörungen und der Extrapolation bzw. Projektion deren Wirkungen auf grössere Zeitskalen (vgl. Kap. 3.1). Über die kausale Wirkungskette zwischen der Beeinträchtigung des Schlafs durch einzelne Lärmereignisse in der Nacht und langfristigen Gesundheitsfolgen existieren zurzeit eher mehr oder minder plausible Vermutungen als empirisch gesicherte Erkenntnisse (Brink, 2012). Die Mehrzahl der Lärmwirkungsforscher geht indes von der Hypothese eines wie auch immer gearteten kausalen Zusammenhanges zwischen primär gestörtem Schlaf und langfristigen Gesundheitsstörungen aus. Eine zweite Möglichkeit besteht im Durchführen nichtexperimenteller *epidemiologischer* Studien. In solchen Studien wird untersucht, ob die Auftretenshäufigkeit gewisser Erkrankungsfälle systematisch von geographischen oder sozialen Faktoren abhängt. Das Problem bei der Verortung von Ursachen für solche (medizinisch relevanten) Gesundheitseinwirkungen ist, dass diese der Wirkung mehrere Jahre bis Jahrzehnte vorausgehen und die Wirkung meist von verschiedenen Ursachen hervorgerufen wird. Zudem handelt es sich bei epidemiologischen Studien um Beobachtungsstudien, in denen die beobachteten Individuen ihr Verhalten selbst bestimmen (z.B. ob sie ihr Fenster in der Nacht schließen, ob und wie viel sie rau-

chen, etc.). Da "Wohnen in fluglärmbelasteten Gebieten" mit anderen, mitunter heute noch unbekannt, Risikofaktoren und gesundheitsschädlichen Verhaltensweisen assoziiert ist, fällt eine eindeutige kausale Verknüpfung von Fluglärm und Gesundheitsendpunkten schwer. Eine doppelt-blinde, randomisierte, langfristige Zuweisung von Verhaltensweisen (der Goldstandard in der klinischen Forschung) ist jedoch weder ethisch vertretbar noch logistisch zu leisten. Ein Ursache-Wirkungs-Zusammenhang ist deshalb mit epidemiologischen Studien nur schwierig und nie mit einer einzelnen Studie nachzuweisen. Vielmehr geht man davon aus, dass ein kausaler Zusammenhang dann wahrscheinlich ist, wenn neben der Erfüllung bestimmter Kriterien (vgl. Hill, 1964) mehrere unabhängige Studien mit unterschiedlicher Methodik immer wieder den gleichen Zusammenhang zwischen Exposition (Fluglärm) und Wirkung (Krankheit) finden.

Insgesamt haben wir festgestellt, dass die epidemiologische Basis für die Erklärung langfristiger Gesundheits-Effekte aufgrund spezifisch der *Fluglärmbelastung* in der *Nacht* erstaunlicherweise noch immer sehr schmal ist und sich die diesbezüglichen relevanten Studien an einer Hand abzählen lassen.

Es wurde für die folgende Zusammenstellung nur Literatur berücksichtigt, in welcher Parameter der Fluglärmbelastung (allenfalls zusammen mit anderen Lärmquellen, etwa Straßenlärm), als unabhängige Variablen untersucht wurden. Entsprechend dem abgegebenen Angebot wird auch nur Literatur mit "peer-review" diskutiert, d.h. Artikel, die in Fachzeitschriften erschienen sind, wobei sowohl Übersichtsarbeiten als auch Originalstudien in den Literatur-Korpus aufgenommen wurden. Dies hat zur Folge, dass einige nicht peer-reviewte, aber dennoch relevant zu nennende Berichte hier nicht diskutiert werden. Es sei jedoch an dieser Stelle auf eine bereits verfügbare inhaltsähnliche Übersicht verwiesen, in welcher solche Quellen besprochen wurden: (Amt für Gesundheit Frankfurt, 2008). Letztlich können wir nicht ausschließen, einzelne relevante Studien, die bis heute erschienen sind, übersehen zu haben. Schließlich wurde eine große Zahl von Studien berücksichtigt, in welchen (1) nur die Tagespegel ($L_{Aeq,16h}$) oder integrale Mittelungspegel (L_{dn} , L_{den} , $L_{Aeq,24h}$) untersucht wurden und/oder (2) bei welchen der relevante Immissionsort der Belastung nicht dem Wohnort (sondern z.B. dem Schulort) der untersuchten Personen entsprach (v.a. bei den vielen "Kinder-Studien"). Dies schien zum einen angebracht, um die Datenbasis zu vergrößern, zum anderen, weil es praktisch kaum Studien gibt, in welchen explizit bzw. ausschließlich die Fluglärmbelastung in der Nacht als erklärende Variable untersucht wurde und auch, weil i.d.R. Tages- und Nachtbelastung korrelieren. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass Extrapolationen auf einen Zusammenhang mit der Nacht-Belastung nur mit Vorsicht vorgenommen werden sollten. Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht in tabellarischer Form gegeben und danach die einzelnen Quellen, gruppiert nach "Übersichtsarbeiten", "Studien mit Kindern", "Kardiovaskuläre Effekte", "Medikamentengebrauch", und "Endokrine Biomarker" besprochen. Dann werden die wichtigsten Erkenntnisse in einer Zusammenfassung dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über seit 1990 in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlichte Arbeiten zum Thema Fluglärmbelastung und Langzeitwirkungen

Nr	Erstautor	Jahr	Typ/Methodik	Zielvariablen	Altersgruppe(n)
1	Morrell	1997	Übersicht	psychische und physische Gesundheit	Kinder, Erwachsene

2	Passchier-V.	2000	Übersicht	sehr breiter Fokus, aurale und nicht-aurale Effekte	Kinder, Erwachsene
3	Stansfeld	2000	Übersicht	nicht-aurale Effekte	Kinder, Erwachsene
4	Babisch	2006	Übersicht	kardiovaskuläre Risiken: Hypertonie, ischämische Herzkrankheit	Kinder, Erwachsene
5	Babisch	2009	Übersicht / Meta-Analyse	Hypertonie	Kinder, Erwachsene
6	Evans	1998	Längsschnitt-Feldstudie	psychophysiologische Stress-Indikatoren	Kinder (9-11)
7	Haines	2001a	Querschnittstudie+Follow-up	psychische Gesundheit, kognitive Leistung, Cortisol	Kinder (8-11)
8	Haines	2001b	Querschnittstudie+Follow-up	psychische Gesundheit, kognitive Leistung, Cortisol	Kinder (8-11)
9	Haines	2001c	Querschnittstudie	psychische Gesundheit, kognitive Leistung, Katecholamin- und Cortisolkonzentration	Kinder (8-11)
10	Stansfeld	2005	Multizentrische Querschnittstudie	kognitive Leistung (Leseverständnis)	Kinder (9-10)
11	Clark	2006	Multizentrische Querschnittstudie	kognitive Leistung (Leseverständnis)	Kinder (9-10)
12	Van Kempen	2006	Multizentrische Querschnittstudie	Blutdruck	Kinder (9-11)
13	Van Kempen	2010	Querschnittstudie	kognitive Leistung	Kinder (9-11)
14	Rosenlund	2001	Fragebogenstudie	Hypertonie (selbstberichtet)	19-80
15	Goto	2002	Querschnittstudie+Follow-up	Blutdruck	Frauen, Durchschnittsalter 56
16	Matsui	2004	Querschnittstudie	Blutdruck, Hypertonie, Cholesterin	>40
17	Aydin	2007	Beobachtungsstudie im Feld	Blutdruck, Herzrate	Durchschnittsalter 51
18	Eriksson	2007	Kohortenstudie	Hypertonie-Inzidenz	Männer, 35-56 (Baseline)
19	Jarup	2008	Multizentrische Querschnittstudie	Blutdruck, Hypertonie, Cortisol	45-70
20	Rhee	2008	Querschnittstudie	Hypertonie	>18
21	Eriksson	2010	Kohortenstudie	Hypertonie-Inzidenz	35-56 (Baseline)
22	Huss	2010	Kohortenstudie	Herzinfarkt-Mortalität	>30
23	Franssen	2004	Fragebogenstudie	Medikamentengebrauch	>18
24	Greiser	2007	Querschnittstudie	Medikamentengebrauch	alle Altersgruppen
25	Floud	2010	Multizentrische Querschnittstudie	Medikamentengebrauch	45-70
26	Selander	2009	Multizentrische Querschnittstudie	Cortisol	45-70

2.2.1 Übersichtsarbeiten

(1) Morrell, S., Taylor, R., & Lyle, D. (1997). A review of health effects of aircraft noise. Aust N Z J Public Health, 21(2), 221-236.

Zusammenfassung: Diese Literaturübersicht umfaßt insgesamt 129 Referenzen zum Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Indikatoren der psychischen und physischen Gesundheit wie z.B. Stresserleben, Angst, Belästigung, akute physiologische Indikatoren sowie Langzeit-Effekte. Die in die Liste der Literatur aufgenommenen Arbeiten sind meist nicht Nachtfluglärm-spezifisch, bilden aber insgesamt eine gute Übersicht der Forschungstätigkeit in den 80er und 90er Jahren zum Thema Fluglärm und Gesundheit. Aus Sicht des damaligen Wissensstands wurde von den Autoren geschlußfolgert, dass ausreichend Evidenz für eine Wirkung der Fluglärmbelastung auf psychische Gesundheit, Belästigung, und Schlafstörungen vorliegt, während die empirische Datengrundlage bei anderen Gesundheitsindikatoren noch nicht ausreichte, um konsistente Schlüsse zu ziehen.

(2) Passchier-Vermeer, W., & Passchier, W. F. (2000). Noise exposure and public health. Environmental Health Perspectives, 108, 123-131.

Zusammenfassung: Die Autoren trugen im Jahr 2000 für diese oft zitierte Übersicht den aktuellen Stand der Forschung zu sowohl auralen als auch nicht-auralen Lärmeffekten bezogen auf eine Vielzahl von Lärmquellen zusammen. Berücksichtigt wurden in diesem Review nebst Hörschädigungen am Arbeitsplatz, psychosoziale Effekte, lärminduzierte "Stress"-Effekte, kardiovaskuläre Effekte bei Erwachsenen und Kindern, Schlafstörungen, sowie Auswirkungen von Lärmbelastung auf kognitive Leistungsfähigkeit. Die Arbeit enthält eine Tabelle mit verschiedenen Langzeiteffekten ("long-term effects") durch die Exposition durch Lärm in verschiedenen Situationen (Arbeitsplatz, Wohnungsumfeld) sowie eine Einstufung dahingehend, ob mit ausreichender Sicherheit von einem kausalen Zusammenhang zwischen Lärmbelastung und der jeweiligen Kriteriumsvariable ausgegangen werden kann. Demnach wurden (bereits im Jahr 2000) folgende Variablen als ausreichend gesichert ("sufficient evidence") angesehen: Gehörschädigung, Hypertonie, Ischämische Herzkrankheit, Belästigung, Leistungsfähigkeit im schulischen Kontext, Schlafbezogene Effekte wie Aufwachreaktionen, Schlafstadienwechsel, subjektive Schlafqualität, Kardiovaskuläre Arousal, Gestimmtheit am nächsten Tag. Nicht ausreichend belegt werden könne ein Effekt von Lärm während des Schlafs auf hormonelle und immunologische Parameter.

(3) Stansfeld, S., Haines, M., & Brown, B. (2000). Noise and health in the urban environment. Reviews on Environmental Health, 15(1-2), 43-82.

Zusammenfassung: In dieser Übersichtsarbeit haben Stansfeld et al. Literatur über *nicht-aurale* Effekte von Verkehrslärm zusammengestellt und über 200 Referenzen zusammengetragen, welche hauptsächlich die Forschungsarbeiten aus den 80er und 90er Jahren reflektieren. Flug- und Straßenlärmbelastung sind gemäß diesem Review korreliert mit gewissen psychischen Symptomen sowie der Häufigkeit der Verwendung von Psychopharmaka, zeigen jedoch keinen Zusammenhang mit psychischer

Gesundheit oder psychiatrischen Erkrankungen. Sorgfältig kontrollierte und sauber durchgeführte Studien fanden keinen Zusammenhang zwischen Lärmbelastung (der Mutter) und niedrigem Geburtsgewicht oder Geburtsdefekten von Neugeborenen, was damals eine vieldiskutierte Hypothese war (vgl. Knipschild et al., 1981; Schell, 1981). Sowohl die Lärmbelastung am Arbeitsplatz wie auch im Wohnumfeld ist tendenziell mit einer erhöhten Katecholamin-Sekretion korreliert. Bei Kindern ist chronische Fluglärmbelastung mit geringerem Leseverständnis und schwächerem Langzeitgedächtnis verknüpft. Es wird darauf hingewiesen, dass weitere Forschungsanstrengungen nötig sind, um die Rolle von Lärmbewältigungsstrategien (Coping-Strategien) sowie mögliche Gesundheitseffekte bei einer Anpassung an die Lärmbelastung besser zu verstehen.

(4) Babisch, W. (2006). Transportation Noise and Cardiovascular Risk: Updated Review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. Noise Health, 8, 1-29.

Zusammenfassung: Dieser Review stellt eine Aktualisierung einer früheren Übersichtsarbeit von Babisch (Babisch, 2000) aus dem Jahr 2000 zu kardiovaskulären Effekten dar (welche aus diesem Grund hier nicht mehr aufgeführt ist). Ein detaillierterer Bericht mit Meta-Analyse ist als WaBoLu-Heft beim Umweltbundesamt erschienen (Babisch, 2006a). Der Review konzentriert sich auf Flug- und Straßenlärmbelastung und die Endpunkte Blutdruck (als kontinuierliche Variable), Hypertonie (diagnostiziert) sowie ischämische Herzkrankheit (inkl. Herzinfarkte), bei Kindern und Erwachsenen. In den Korpus wurden 61 epidemiologische Studien aufgenommen. Die aktualisierte Befundlage wird wie folgt zusammengefasst: Die Hinweise auf einen kausalen Zusammenhang zwischen Verkehrslärmbelastung und kardiovaskulären Risiken haben sich in den letzten 5 Jahren verdichtet, dies betrifft insbesondere Hypertonie und ischämische Herzkrankheiten, während die Evidenz bei biochemischen Indikatoren (etwa Stresshormonlevel) noch nicht ausreichend ist, um kausale Schlüsse zu ziehen.

(5) Babisch, W., & van Kamp, I. (2009). Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. Noise Health, 11(44), 161-168.

Zusammenfassung: Dies ist eine der neuesten Übersichtsarbeiten zum Thema Fluglärmbelastung und Hypertonierisiko. Die Arbeit beinhaltet sowohl einen Review-Teil als auch einen Meta-Analyse-Teil. Die Meta-Analyse mit 6 Studien hatte zum Ziel, eine quantitative Risikobewertung als "Best Guess" für Hypertonie bereitzustellen, bis "weitere Daten" vorliegen. Demnach betrug das Relative Risiko für Hypertonie für eine Erhöhung des Tag-Nacht-Durchschnittspegels um 10 dB OR = 1.13 (95% CI: 1.0 - 1.28), in einem Pegelbereich zwischen $L_{dn} = 45$ und 70 dB. Die beiden Autoren weisen darauf hin, dass keine gesicherten Aussagen über unterschiedliche Effekte der Tages- und Nachtbelastung gemacht werden können, da in den meisten Studien diese Unterscheidung nicht getroffen wurde. Extrapolationen von Straßenlärmstudien seien zwar möglich, aber da dem Fluglärm nicht gleichermassen gut ausgewichen werden kann, wie dem Straßenlärm (z.B. durch Benutzung eines Schlafzimmers auf der Straßen-abgewandten Seite des Hauses), und angesichts der Tatsache, dass Belästigungsreaktionen bei diesem am stärksten ausgeprägt sind, müsse davon ausgegangen werden, dass die Risiken für Hypertonie, hervorgerufen durch Fluglärm, ebenfalls höher liegen als beim Straßenlärm.

2.2.2 Originalstudien I: Studien mit Kindern

(6) Evans, G. W., Bullinger, M., & Hygge, S. (1998). Chronic Noise Exposure and Physiological Response: A Prospective Study of Children Living under Environmental Stress. Psychological Science, 9(1), 75-77.

Untersuchungsfokus: Auswirkung von Fluglärm auf Wohlbefinden, kognitive Fähigkeiten, Stress und Blutdruck bei Kindern im Umfeld des alten und neuen Flughafens München.

Zusammenfassung: Der Entscheid zur Verlegung des Stadtflughafens von München aufs Land hinaus erlaubte es, prospektiv den Einfluss von Fluglärm auf die o.g. Endpunkte in einem Vorher-Nachher-Vergleich zu analysieren. In insgesamt drei Wellen (eine Welle vor Eröffnung, 6 Monate, und 18 Monate nach Eröffnung) wurden 217 Schulkinder im Alter zwischen 9 und 11 Jahren aus fluglärmbelasteten (unter den An- und Abflugpfaden) und nicht-belasteten Gebieten untersucht. Die Lärmbelastung wurde durch einen Schallpegelmessers in der Nähe der Schule gemessen und als $L_{Aeq,24h}$ angegeben (womit nicht explizit nur Fluglärmereignisse berücksichtigt wurden, sondern der Gesamtlärmpegel). Die Neubelastung durch Fluglärm führte zu erhöhtem "psychophysiologischem Stress", operationalisiert als Ruhe-Blutdruck und Katecholaminkonzentration im Urin sowie reduzierten Lebensqualitäts-Indikatoren. Im gleichen Zeitraum (Welle 1 bis Welle 2) konnten bei "gematchten" Kindern mit gleichen Lebensumständen, die jedoch nicht vom Fluglärm des neuen Flughafens betroffen waren, keine Veränderungen festgestellt werden. Nach 18 Monaten verschwand der Unterschied im Blutdruck zwischen belasteten und unbelasteten Kindern. In später erschienenen Kommentaren zu dieser Studie wurde betont, dass auch in der fluglärmbelasteten Gruppe die Blutdruckwerte im "Normalbereich" lagen (Morrell, 2003). *Hinweis: Zu dieser Studie existieren weitere Artikel: (Bullinger, Hygge, Evans et al., 1999; Hygge, Evans & Bullinger, 2002)*

(7) Haines MM, Stansfeld SA, Job RF, Berglund B, Head J. Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. Psychol Med (2001a) 31: 265-77.

und

(8) Haines MM, Stansfeld SA, Job RF, Berglund B, Head J. A follow-up study of effects of chronic aircraft noise exposure on child stress responses and cognition. Int J Epidemiol (2001b) 30: 839-45.

Untersuchungsfokus: Effekte der Tages-Fluglärmbelastung auf Kinder in der Nähe des Flughafens London-Heathrow hinsichtlich Wirkungen auf Belästigung, Stress, psychische Gesundheit und kognitive Leistungsfähigkeit. Die Querschnittstudie (2001a) und die Follow-up-Studie (2001b) wurden separat publiziert.

Zusammenfassung: Im Umfeld des Flughafens London Heathrow wurden verschiedene größere Querschnittuntersuchungen zur Auswirkung des Fluglärms auf die Gesundheit und die kognitive Leistungsfähigkeit bei 340 Schulkindern im Alter von 8-11 Jahren durchgeführt. Verglichen wurden Kinder aus fluglärmbelasteten Schulen ($L_{Day,16h} > 66$ dB) mit solchen aus Vergleichsschulen ohne Flug-

lärmbelastung ($L_{\text{Day},16\text{h}} < 57 \text{ dB}$). Die Kinder wurden umfangreichen Tests unterzogen: Erhoben / untersucht wurde Lärmbelastung in der Schule, Lärmbelastung zu Hause, Stress (20 stressprovozierende Situationen/Fragen), Fragebogendaten zu Depression und Angst, Leseverständnis (Standardisierte Skala: Suffolk reading scale), Aufmerksamkeit, Selbstberichtete Gesundheit (u.a. Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schlafstörungen), Motivation (Kinder- und Lehrerfragebogen) und viele Confounder. In einer Unterstichprobe wurde Saliva-Cortisol gemessen. Die weitaus meisten Kinder lebten seit mehr als 4 Jahren in ihrer Wohnung und besuchten seither dieselbe Schule.

Kinder der fluglärmbelasteten Schulen gaben signifikant häufiger eine höhere Belästigung durch Fluglärm an. Die Belästigung durch Fluglärm zeigte keine Beziehung zu anderen Lärmquellen wie Bahn-, Straßen- oder Nachbarschaftslärm. Der Unterschied blieb auch nach Korrektur für Confounder (Herkunft, Muttersprache, Sozialstatus) signifikant. Kinder aus den fluglärmbelasteten Schulen wiesen ein signifikant geringeres Leseverständnis auf als Kinder aus den Vergleichsschulen (98.48 Punkte vs. 102.66 Punkte), der Unterschied blieb auch nach Berücksichtigung der Confounder signifikant. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlich lärmbelasteten Gruppen gefunden im Hinblick auf Angst und Depression, psychische Auffälligkeiten (Hyperaktivität, Verhaltensprobleme, emotionale Probleme etc.), körperliche Gesundheit sowie der Cortisolkonzentration im Speichel.

Ein Jahr nach der o.g. Erstuntersuchung (Haines et al., 2001a) konnten 271 Kinder mit den gleichen Methoden nachuntersucht werden, das entsprach 81 % der erstuntersuchten Kinder. Kinder aus den lärmbelasteten Schulen gaben weiterhin signifikant häufiger Belästigung durch Fluglärm an. Chronische Fluglärmbelastung an der Schule war signifikant mit größerer Stresswahrnehmung assoziiert. Weiterhin wurden keine Unterschiede zwischen den unterschiedlich lärmbelasteten Gruppen im Hinblick auf Angst oder Depression gefunden. Das Leseverständnis war weiterhin bei Kindern aus den lärmbelasteten Schulen vermindert. Die Autoren schließen daraus, dass hinsichtlich Belästigung und Leseverständnis (nach einem Jahr) keine Habituation stattfand.

(9) Haines MM, Stansfeld SA, Brentnall S, Head J, Berry B, Jiggins M, Hygge S. The West London Schools Study: the effects of chronic aircraft noise exposure on child health. Psychol Med (2001c) 31: 1385-96.

Untersuchungsfokus: Effekte der Tages-Fluglärmbelastung auf Kinder in der Nähe des Flughafens London-Heathrow hinsichtlich Wirkungen auf Belästigung, Stress, psychische Gesundheit und kognitive Leistungsfähigkeit. Es handelt sich hierbei im Wesentlichen um eine Replikation der ersten Querschnittstudie (2001a) mit einer größeren Stichprobe.

Zusammenfassung: In dieser dritten Publikation von Haines et al. wurde bei 451 Kindern untersucht, ob kognitive Leistungsfähigkeit und Stressreaktionen (physiologisch gemessen als Konzentration von Katecholaminen und Cortisol sowie selbstberichtete Stressreaktionen) auch dann mit der Tages-Fluglärmbelastung zusammenhängen, wenn schulbezogene und persönliche Confounder berücksichtigt werden. Ferner wurde untersucht, ob Kinder aus sozial benachteiligtem Umfeld einem größeren Risiko fluglärmbedingter Effekte unterliegen. Zu diesem Zweck wurden im Umfeld von je 10 Schulen mit hoher ($L_{\text{Day},16\text{h}} > 63 \text{ dB}$) und niedriger ($L_{\text{Day},16\text{h}} < 57 \text{ dB}$) Fluglärmbelastung im Wesentlichen diesel-

ben Untersuchungsmethoden wie bei den beiden bisher beschriebenen Untersuchungen (2001a und 2001b) angewandt.

Kinder aus den fluglärmbelasteten Schulen gaben deutlich häufiger Belästigung durch Fluglärm an als Kinder aus nicht fluglärmbelasteten Schulen. Kinder mit hoher und niedriger Lärmbelastung zeigten – nach Korrektur für soziale Einflussfaktoren – keine signifikanten Unterschiede bei der Untersuchung der kognitiven Fähigkeiten wie Leseverständnis (insgesamt), Kurz- und Langzeitgedächtnis (Abruf und Wiedererkennung) und anhaltende Aufmerksamkeit. Bei differenzierterer Betrachtung allerdings zeigten sich durchaus Unterschiede im Hinblick auf das Leseverständnis: wurden nur die 15 schwierigsten Aufgaben bewertet, so schnitten die fluglärmbelasteten Kinder signifikant schlechter ab. Die Kinder aus den unterschiedlich fluglärmbelasteten Schulen wiesen nach Berücksichtigung der Confounder keine Unterschiede in den kreatininbezogenen Adrenalin-, Noradrenalin- und Cortisolspiegeln im Urin (12 h Sammelurin über Nacht) auf.

(10) Stansfeld, S. A., Berglund, B., Clark, C., Lopez-Barrio, I., Fischer, P., Ohrstrom, E., Haines, M. M., Head, J., Hygge, S., van Kamp, I., & Berry, B. F. (2005). Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. Lancet, 365(9475), 1942-1949.

sowie

(11) Clark, C., Martin, R., van Kempen, E., Alfred, T., Head, J., Davies, H. W., Haines, M. M., Barrio, I. L., Matheson, M., & Stansfeld, S. A. (2006). Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension - The RANCH project. American Journal of Epidemiology, 163(1), 27-37.

Untersuchungsfokus: Flug- und Straßenlärmbelastung und kognitive Fähigkeiten von Kindern im Umfeld von drei großen europäischen Flughäfen.

Zusammenfassung: Im Rahmen der multizentrischen RANCH-Studie (Road traffic and aircraft noise exposure and children's cognition and health) wurden in den Jahren 2001-2003 insgesamt 2844 Kinder im Alter von 9-10 Jahren aus 89 Schulen im Umfeld der Flughäfen London Heathrow, Amsterdam Schiphol und Madrid Barajas hinsichtlich der Variablen Leseverständnis, Gedächtnis, Aufmerksamkeit, Gesundheit, Belästigung und weiterer Parameter untersucht. In jedem Land wurden Schulen stratifiziert nach sozioökonomischem Status der Wohngegend ausgesucht. In allen drei Ländern wurde die Fluglärmbelastung als Tagesmittelungspegel in dB den jeweiligen aktuellen (nationalen) Fluglärmkarten entnommen. In Amsterdam wurde darüber hinaus die Straßenlärmbelastung berechnet, in London und Madrid wurden zusätzlich zu den Modellrechnungen auch Messungen im Außenbereich der Schulen vorgenommen. Die Fluglärmbelastung an den Wohnungen der Kinder war eng mit der Fluglärmbelastung an den Schulen korreliert.

Als Hauptergebnis der Studie kann festgehalten werden, dass das Leseverständnis gering – aber signifikant mit zunehmender Fluglärmbelastung an den Schulen abnahm. Dieser Effekt blieb auch nach Korrektur für die verschiedenen betrachteten Confounder erhalten. Straßenlärm hingegen zeigte keine Auswirkung auf das Leseverständnis. Bei den überprüften Gedächtnisleistungen und der Aufmerksamkeit zeigte sich tendenziell eine Beeinträchtigung durch Fluglärm, allerdings war hier keiner

der untersuchten Parameter signifikant. Unerklärt blieb die signifikante Verbesserung bestimmter Gedächtnisleistungen (cued recall) bei zunehmendem Straßenlärm. Zunehmender Fluglärm zu Hause war hochsignifikant assoziiert mit abnehmendem Leseverständnis. Es wurde keine zusätzliche Leistungsminderung durch Fluglärmbelastung zu Hause gefunden, nach Adjustierung für Fluglärmbelastung an der Schule. Weder Flug- noch Straßenlärm zeigte einen signifikanten Einfluss auf Aufmerksamkeit oder selbstberichtete Gesundheit.

(12) Van Kempen E, van Kamp I, Fischer P, Davies H, Houthuijs D, Stellato R, Clark C, Stansfeld S. Noise exposure and children's blood pressure and heart rate: the RANCH project. Occup Environ Med (2006) 63: 632-9. Epub 2006 May 25.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Flug- und Straßenlärmbelastung und Blutdruckwerten sowie Stresshormonkonzentration bei Schulkindern im Alter von 9-11 Jahren.

Zusammenfassung: Im Rahmen der RANCH-Studie (s.o.) wurden in England und in den Niederlanden weitere Untersuchungen zu Auswirkungen der Lärmbelastung durch Flug- und Straßenlärm auf Gesundheit und kognitive/schulische Leistungsfähigkeit von Kindern durchgeführt. Untersucht wurden 1283 Kinder im Alter von 9-11 Jahren, die 62 Grundschulen in der Umgebung von London Heathrow und Amsterdam Schiphol besuchten. Während in den Niederlanden Fluglärmbelastung an der Schule und Fluglärmbelastung in der elterlichen Wohnung, tagsüber und nachts, signifikant mit höheren Blutdruckwerten der Kinder assoziiert war, konnte dieser Effekt im Umfeld des Londoner Flughafens nicht festgestellt werden. Deswegen war in der Gesamtauswertung der gepoolten Daten nur noch ein geringer Effekt von Fluglärm im Wohnumfeld auf den systolischen Blutdruck feststellbar. Kein Zusammenhang fand sich zwischen dem Fluglärm am Schulort und Blutdruck. Die Autoren kamen zu folgender Schlußfolgerung: Ein Zusammenhang zwischen Fluglärm und erhöhtem Blutdruck bei Schulkindern kann, basierend auf der aktuellen Datenlage, nicht schlüssig belegt werden.

(13) Van Kempen, E., van Kamp, I., Lebrecht, E., Lammers, J., Emmen, H., & Stansfeld, S. (2010). Neuro-behavioral effects of transportation noise in primary schoolchildren: a cross-sectional study. Environ Health, 9, 25.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Flug- und Straßenlärmbelastung am Schulort und kognitiver Leistungsfähigkeit von Schulkindern.

Zusammenfassung: An der Untersuchung haben 553 Kinder im Alter zwischen 9 und 11 Jahren teilgenommen, die in der Umgebung des Flughafens Schiphol in Amsterdam lebten. Kognitive Leistungsfähigkeit wurde mit dem "Neurobehavioral Evaluation System" (NES) getestet. Mittels hierarchischer Regressionsanalysen wurde der Zusammenhang zwischen Flug- und Straßenlärmbelastung, gemessen am Schulort, und kognitiver Leistungsfähigkeit untersucht und dabei für demografische und schulbezogene Confounder kontrolliert. Kinder aus flug- und straßenlärmbelasteten Schulen machten v.a. signifikant mehr Fehler in den komplexeren Teilen des Switching Attention Test (SAT). Die Autoren schließen auf Grundlage der gefundenen Resultate und aufgrund der früheren wissenschaft-

lichen Literatur darauf, dass die kognitive Leistungsfähigkeit bei einfacheren Aufgaben weniger durch Flug- und Straßenlärm beeinträchtigt ist, als bei komplexeren Aufgaben.

2.2.3 Originalstudien II: Kardiovaskuläre Effekte (Blutdruck, Hypertonie, Herzinfarkt)

(14) Rosenlund, M., Berglind, N., Pershagen, G., Jarup, L., & Bluhm, G. (2001). Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise. *Occup Environ Med*, 58(12), 769-773.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Hypertonierisiko.

Zusammenfassung: In dieser schwedischen Studie im Umfeld des Stockholmer Flughafens wurden Personen im Alter von 18-80 Jahren aus zwei Zufallsstichproben (Fluglärm-Belastete in der Nähe des Flughafens und Nicht-Fluglärm-Belastete im restlichen 'Stockholm County') angeschrieben und nach ärztlich diagnostizierter Hypertonie befragt. Nur Personen, die mehr als ein Jahr an der angegebenen Wohnadresse wohnten, wurden in die Studie eingeschlossen. Die Beteiligungsrate betrug 70 % und die Ergebnisse zeigten einen knapp signifikanten Belastungs-Wirkungszusammenhang basierend auf dem FBN, einem integralen Tag-Nacht-Mittelungspegel der schwedischen Norm. Bei Personen oberhalb der 55 dB-Belastung wurde ein relatives Risiko (adj. für Alter, Geschlecht, Rauchen, Bildung) von 1.6 (95% CI: 1 - 2.5) gefunden. Für Ältere und Nicht-Hörgeschädigte waren die Risikoerhöhungen mit 1.9 resp. 2.0 noch deutlicher. Es wurden keine gesonderten Analysen basierend auf der Nacht-Belastung durchgeführt.

(15) Goto K, Kaneko T. Distribution of blood pressure data from people living near an airport. *J Sound Vibration* (2002) 250: 145-149.

Untersuchungsfokus: Vergleich der Blutdruckwerte von Frauen aus einer Fluglärm-belasteten (N=469) und einer unbelasteten (1177) Stichprobe in der Nähe des Flughafens Fukuoka (auf der Insel Kyushu, Japan).

Zusammenfassung: Diese japanische Studie verglich die Blutdruckwerte von Frauen, die in unterschiedlich fluglärmbelasteten Gebieten um den Flughafen Fukuoka lebten, mit Frauen aus einer unbelasteten Kontrollgruppe. Als Fluglärmbelastungsmass wurde der WECPNL (Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level) verwendet. In der Querschnittsuntersuchung wurde ein um 4 mm Hg höherer Blutdruck in der höher exponierten Gruppe (WECPNL \geq 75) gefunden im Vergleich mit der Kontrollgruppe, was jedoch statistisch nicht signifikant war. In einem Follow-up 8 Jahre später wurden 183 Frauen nachuntersucht. Auch in der Follow-up-Untersuchung wurde kein signifikanter Unterschied in den Blutdruckunterschieden festgestellt. Zum Studiendesign wurden nur sehr ungenaue Informationen publiziert.

(16) Matsui, T., Uehara, T., Miyakita, T., Hiramatsu, K., Osada, Y., & Yamamoto, T. (2004). The Okinawa study: effects of chronic aircraft noise on blood pressure and some other physiological indices. Journal of Sound and Vibration, 277(3), 469-470.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Blutdruck / Hypertonie und Fluglärmbelastung in der Nähe mehrerer militärischer Flugplätze auf Okinawa (Japan).

Zusammenfassung: In diese japanischen Studie in der Nähe von Militärflugplätzen auf der Insel Okinawa wurden 29'000 Bewohner eingeschlossen bei welchen Blutdruck und Cholesterinspiegel gemessen wurde. Die Resultate zeigten eine klare Belastungs-Wirkungsbeziehung zwischen militärischer Fluglärmbelastung und dem Blutdruck. Ein hochsignifikanter Trend wurde auch für Hypertonie gefunden, die OR betrug 1.4 bei der am höchsten belasteten Gruppe ($L_{dn}>70$ dB). Hervorzuheben ist die große Zahl der untersuchten Personen, die Beschreibung der Studie als Ganzes sowie der eingesetzten Methoden ist allerdings mangelhaft.

(17) Aydin Y und Kaltenbach M. Noise perception, heart rate and blood pressure in relation to aircraft noise in the vicinity of the Frankfurt airport. Clin Res Cardiol (2007) 96: 347-58.

Untersuchungsfokus: Subjektive Lärmwahrnehmung und objektive kardiovaskuläre Parameter (Herzrate und Blutdruck) bei Bewohnern in zwei Regionen im Osten und Westen des Frankfurter Flughafens.

Zusammenfassung: In dieser Beobachtungsstudie im Feld wurde der Zusammenhang zwischen Fluglärm-Nachtbelastung und der kurz- und mittelfristigen Veränderung kardiovaskulärer Parameter untersucht. An 53 Personen wurde im häuslichen Umfeld verfolgt, wie sich Blutdruck, Herzfrequenz und die allgemeine Befindlichkeit in Abhängigkeit der Lärmbelastung startender Flugzeuge verändern. Jeweils morgens und abends wurde eine Blutdruck- und Pulsmessung (automatisches Messgerät mit digitalisierter Ablesung) vorgenommen und es musste ein Tagebuch zur Lärmwahrnehmung (leise, mittel, laut) und Schlafqualität (gut, mittel, schlecht) geführt werden. Tägliche Lärmbelastungswerte wurden durch den Flughafenbetreiber zur Verfügung gestellt. In der Studie wurden zwei Kollektive untersucht, eines im Westen (N=31) und eines im Osten (N=22) der beiden Parallelpisten am Flughafen Frankfurt. Die wetterbedingte Betriebsrichtungsaufteilung in Frankfurt führt im Jahresmittel ca. 75% der Starts auf den Parallelpisten Richtung Westen und 25% Richtung Osten. Im Verlaufe der Versuchsphase (12 Wochen pro Versuchsperson) änderte sich die Betriebsrichtung aber mehrere Male, so dass man die tatsächliche Lärmbelastung in jeder Nacht mit den Blutdruckveränderungen vergleichen konnte. Die Auswertung von insgesamt 8 266 Blutdruckmessungen ergab in der Westgruppe im Mittel einen um 10/8 mm Hg statistisch signifikant höheren Blutdruck als in der Ostgruppe. Es zeigte sich grundsätzlich, dass Nachtfluglärm von ca. 50 dB nicht nur zu einer subjektiven Belastung, sondern auch zu einer objektiven Veränderung der Herz-Kreislauffunktionen führte. Interessant ist insbesondere, dass der tägliche (nächtliche) Blutdruck-Verlauf im Osten des Flughafens mit der veränderlichen nächtlichen Lärmbelastung kovarierte, was im Westen nicht der Fall war. Die Autoren schließen daraus, dass, sofern eine bestimmte Lärm-Menge im Jahresmittel nicht überschritten wird, sich in lärmfreien Nächten ein allfällig erhöhter Blutdruck wieder 'erholen' kann.

(18) Eriksson C, Rosenlund M, Pershagen G, Hilding A, Ostenson CG, Bluhm G. Aircraft noise and incidence of hypertension. Epidemiology (2007) 18: 716-21.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Hypertonie-Neuerkrankungen in der Umgebung von Stockholm.

Zusammenfassung: In der Studie wurde eine Kohorte von 2754 Männern in vier Gemeinden rund um den Stockholmer Flughafen Arlanda zwischen den Jahren 1992-1994 und 2002-2004 (Follow-up) untersucht. Die Fluglärmbelastung am Wohnort wurde als gewichteter Pegel ähnlich dem L_{den} (Faktor 3 für 19-22 Uhr und Faktor 10 für 22-07 Uhr) berechnet. Inzidente Fälle von Hypertonie wurden durch Blutdruck-Messungen und Fragebögen festgestellt. In die Analysen einbezogen wurden nur diejenigen 2027 Probanden, die auch die Follow-up Untersuchung abgeschlossen hatten und nicht ärztlich wegen Hypertonie behandelt wurden.

Bei 22 % der fluglärmbelasteten Personen ($L_{den} \geq 50$ dB) wurde eine Neuerkrankung an Hypertonie festgestellt, bei den nicht fluglärmbelasteten Teilnehmern (< 50 dB) waren es 16 %. In beiden Gruppen wurden darüberhinaus bei jeweils 14 % der Teilnehmer Blutdruckwerte über 140/90 mm Hg gemessen. In der Risikoanalyse ergab sich damit ein 22 % höheres Risiko einer Hypertonieerkrankung in der fluglärmbelasteten Gruppe im Vergleich mit der Kontrollgruppe, welches auch nach Berücksichtigung von Alter und Body Mass Index signifikant blieb (+19%). Die Autoren schlußfolgerten: "Unsere Studie weist auf einen Zusammenhang zwischen Fluglärm und der Rate der Neuerkrankungen an Hypertonie bei Männern mittleren Alters in Schweden hin".

(19) Jarup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadum, E., Dudley, M. L., Savigny, P., Seiffert, I., Swart, W., Breugelmans, O., Bluhm, G., Selander, J., Haralabidis, A., Dimakopoulou, K., Sourtzi, P., Velonakis, M., Vigna-Taglianti, F., (2008). Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. Environmental Health Perspectives, 116(3), 329-333.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Fluglärm / Straßenverkehrslärm und Hypertonie im Umfeld Europäischer Flughäfen.

Zusammenfassung: In der dieser Multizenter-Studie nahmen fast 5000 Anwohner in der Nähe großer europäischer Flughäfen (Amsterdam, Athen, Berlin, London, Mailand und Stockholm) teil. In den Wohnungen der Probanden wurden differenzierte Blutdruckmessungen vorgenommen. In einzelnen Untergruppen wurden 24h-Blutdruckmessungen und Cortisolmessungen im Speichel durchgeführt. Zudem wurden in Fragebögen Belastungsdaten zu verschiedenen Lärmquellen erhoben. Fluglärmkonturen für die verschiedenen Flughäfen wurden einheitlich mit dem INM-Modell berechnet, Straßenlärm in 10x10 m Rastern bestimmt. Die Responseraten betragen zwischen 30 und 78%. Als mögliche Schwäche der Studie wird die teilweise sehr niedrige Responserate genannt, allerdings hat eine Non-response-Analyse keinen Unterschied im Hinblick auf die Fluglärmbelastung ergeben. Es wurde in der Studie nicht explizit zwischen Bestands- und Änderungsflughäfen unterschieden, obwohl zu jener Zeit Amsterdam, Athen und Mailand neue bzw. wesentlich geänderte Flughäfen waren, bei denen man zumindest eine gegenüber den Bestandsflughäfen höhere Belastung erwarten konnte (vgl. Babisch, Houthuijs, Pershagen et al., 2007). Inwieweit der "Änderungs-Effekt" auf die Hypertonie-Prävalenz durchschlagen könnte, wird nicht diskutiert.

Zwischen der nächtlichen Fluglärmbelastung sowie der Tagesbelastung durch Straßenverkehrslärm und Hypertonie konnte ein signifikanter Zusammenhang gefunden werden, letzterer jedoch nur bei Männern. Hinsichtlich der Fluglärmefekte fand sich kein Unterschied zwischen Männern und Frauen. Diese Studie ist die einzige ihrer Art, in welcher eine getrennte Auswertung für die Tages- und die Nachtbelastung vorgenommen wurde. Sie liefert damit einen recht deutlichen Hinweis für die Vermutung, dass vor allem *Belastungen in der Nacht*, bzw. während des Schlafs für langfristige Gesundheitseffekte verantwortlich sind. Es wird allerdings von den Autoren eingeräumt, dass möglicherweise auch der erwartbar geringere Misclassification Bias bei der Nacht-Belastung für den stärkeren Effekt verantwortlich sein könnte. Die Autoren schreiben: "Unsere Ergebnisse zeigen, dass Präventivmaßnahmen in Erwägung gezogen werden sollen, um Straßenverkehrslärm und nächtlichen Fluglärm zu vermindern".

(20) Rhee, M. Y., Kim, H. Y., Roh, S. C., Kim, H. J., & Kwon, H. J. (2008). The effects of chronic exposure to aircraft noise on the prevalence of hypertension. *Hypertens Res*, 31(4), 641-647.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen chronischer Militärfluglärm-Exposition und Hypertonie.

Zusammenfassung: In dieser japanischen Studie wurden 137 Personen in der Nähe einer Helikopterbasis, 486 Personen in der Nähe eines Luftwaffenstützpunkts mit Kampffjetlärm, und 252 Kontrollpersonen ohne Fluglärmbelastung hinsichtlich Hypertonie-Prävalenz miteinander verglichen. Insgesamt wiesen Personen mit militärischem Fluglärm eine höhere Hypertonie-Rate als Kontrollgruppen-Personen auf. Die für Alter, Geschlecht, BMI, Rauchstatus, Alkoholkonsum, Diabetes und regelmäßige körperliche Aktivität kontrollierte OR betrug 1.62 (95% CI: 1.02 - 2.59) für Personen mit Helikopterlärm-Belastung und 1.23 (95% CI: 0.87 - 1.74) für Personen mit Belastung durch Kampffjetlärm. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Studie, dass chronische Exposition gegenüber militärischen Fluglärm mit Hypertonie assoziiert sein kann. Der Unterschied in den Wirkungen zwischen Hubschrauber und Kampffjetlärm weist darauf hin, dass verschiedene Lärm-Arten unterschiedlich stark die Hypertonie-Prävalenz erhöhen.

(21) Eriksson, C., Bluhm, G., Hilding, A., Ostenson, C. G., & Pershagen, G. (2010). Aircraft noise and incidence of hypertension--gender specific effects. *Environ Res*, 110(8), 764-772.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Hypertonie-Neuerkrankungen in der Umgebung von Stockholm.

Zusammenfassung: In dieser Studie wurden die Hypertonie-Inzidenzraten einer Kohorte von 4721 Personen in der Umgebung von Stockholm untersucht, die nach 8-10 Jahren einer Follow-up Untersuchung unterzogen wurden. An beiden Untersuchungsterminen wurde der Blutdruck bei Ruhe gemessen. In dieser sehr sorgfältig durchgeführten Studie konnte kein Effekt der Fluglärm-Belastung auf das Hypertonie-Risiko festgestellt werden, das relative Inzidenz-Risiko in der Pegelklasse $L_{den} \geq 50$ dB betrug 1.02 (95% CI: 0.90 - 1.15). In einer Substichprobe von Tabak-abstinenten Personen konnte hingegen eine Risikozunahme pro 5 dB Zunahme der Belastung bei den Männern festgestellt werden

(RR 1.21; 95% CI: 1.05 - 1.39). In beiden Geschlechtern zeigte sich, dass vor allem Personen, die eine starke Fluglärm-Belästigung angaben, ein erhöhtes Hypertonie-Risiko aufwiesen. Die Resultate legen nahe, dass insbesondere Männer ein erhöhtes fluglärminduziertes kardiovaskuläres Erkrankungsrisiko aufweisen.

(22) Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., & Röösli, M. (2010). Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction. *Epidemiology*, 21(6), 829-836.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Herzinfarkt-Mortalität und Fluglärm und Luftverschmutzung.

Zusammenfassung: In dieser Schweizer Studie wurden Daten der "Swiss National Cohort" (SNC) hinsichtlich Mortalität durch Herzinfarkt, Mortalität zerebrovaskulärer Erkrankungen, Schlaganfall, Lungenkrebs und Mortalität aller kardiovaskulären Erkrankungen, sowie Gesamtmortalität ausgewertet. Die in der SNC enthaltene nationale Todesursachenstatistik für Herzinfarkt wurde regressiert auf Fluglärmbelastung am Wohnort (ausgedrückt als L_{dn}), Luftverschmutzung (PM10-Konzentration) und Abstand zur nächsten Hauptstraße. Zur Abschätzung der Fluglärm-Exposition der Wohnadresse wurden Daten der SonBase GIS-Lärmdatenbank (Bundesamt für Umwelt, 2009) verwendet. Als Confounder wurden Geschlecht, Bildung und der sozioökonomische Status der Gemeinde berücksichtigt. Es wurden insgesamt 4.6 Millionen Personen älter als 30 Jahre über einen Zeitraum zwischen Ende 2000 und Dezember 2005 verfolgt (davon ist allerdings nur ein sehr geringer Teil relevant von Fluglärm belastet). In dieser Zeit ereigneten sich 15.532 Todesfälle durch Herzinfarkt (ICD-10 Codes I21, I22). Die Sterblichkeit nahm mit steigender Fluglärmbelastung und zunehmender Wohndauer an einem belasteten Wohnort zu. Die adjustierte Hazard Ratio für Herzinfarkt zwischen den Belastungsstufen ≥ 60 dB und < 45 dB lag bei 1.3 (95% CI: 0.96 - 1.7) und war damit knapp nicht signifikant. Es zeigte sich jedoch ein signifikanter Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Herzinfarkt-Todesfallrisiko bei denjenigen Personen, die 15 Jahre oder länger am selben (fluglärmbelasteten) Ort wohnten (Hazard Ratio 1.5 (95% CI: 1.0 - 2.2)). Alle anderen o.g. Endpunkte zeigten keinen Zusammenhang mit der Fluglärm-Belastung.

2.2.4 Originalstudien III: Medikamentengebrauch und Medikamentenverschreibung

(23) Franssen, E. A., van Wiechen, C. M., Nagelkerke, N. J., & Lebet, E. (2004). Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use. *Occup Environ Med*, 61(5), 405-413.

Untersuchungsfokus: Beurteilung des allgemeinen (selbstberichteten) Gesundheitszustands sowie Erhebung der Prävalenzen des Schlafmittelgebrauchs und des Gebrauchs von Medikamenten zur Behandlung von Herzkrankheiten und deren Zusammenhänge mit der Belastung durch Fluglärm.

Zusammenfassung: In einer Querschnittstudie wurden verschiedene Gesundheitsindikatoren bei 11'812 Personen erhoben, die innerhalb eines Radius von 25 km um den Flughafen Amsterdam

Schiphol wohnten. Die Personen wurden mittels eines geschichteten Zufallsverfahrens gezogen. Die Responserate betrug 39%. Die unterschiedlich fluglärmbelasteten Befragten waren nach Alter, Geschlecht und hinsichtlich Migrationshintergrund vergleichbar. Die Analysen wurden mit den Belastungsmassen L_{den} und $L_{Aeq,23-07h}$ durchgeführt. Interessanterweise war keiner der untersuchten Gesundheitsindikatoren mit der nächtlichen Fluglärmbelastung assoziiert (OR pro 10 dB Anstieg des Pegels), jedoch fanden sich signifikante Zusammenhänge des selbsteingeschätzten Gesundheitszustands und der anderen Indikatoren (mit Ausnahme rezeptpflichtiger Schlafmittel) mit dem L_{den} . Die Fluglärmbelastung zu später Abendzeit (22-23 Uhr) war signifikant mit erhöhtem Konsum nicht rezeptpflichtiger Schlafmittel assoziiert. Die Autoren kommen zum Schluss, dass die Exposition durch Fluglärm oberhalb von $L_{den}=50$ dB längerfristig zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen kann, was sich in einem verschlechterten allgemeinen Gesundheitszustand und dem gesteigerten Gebrauch von blutdrucksenkenden Medikamenten und Schlafmitteln zeige.

(24) Greiser, E., Greiser, C., & Janhsen, K. (2007). Night-time aircraft noise increases prevalence of prescriptions of antihypertensive and cardiovascular drugs irrespective of social class—the Cologne-Bonn Airport study. Journal of Public Health, 15(5), 327-337.

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen Fluglärm und der Prävalenz ärztlich verordneter Medikamente (blutdrucksenkende Mittel, andere Herzmedikamente, Anxiolytika) basierend auf Daten gesetzlicher Krankenkassen in der Umgebung des Köln-Bonner Flughafens.

Zusammenfassung: Dieser Artikel beschreibt eine der umfangreichsten Studien zum Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Medikamentengebrauch (Verordnungen niedergelassener Ärzte). Hervorzuheben ist die Tatsache, dass gezielt der Einfluss der *Nacht*-Belastung untersucht wurde, wobei man sich die besondere Eigenschaft des Köln-Bonner Flughafens mit erheblichem Nachtflugverkehr zunutze machte. In der Studie wurden Krankenkassendaten von 8'093'79 Versicherten mit der Belastung durch Flug- und Straßenverkehrslärm adressgenau bestimmt, nach Bereinigung konnten 43% der Population im Studiengebiet (Stadt Köln, Rheinisch-Bergischer Kreis, Rhein-Sieg-Kreis) in die Analysen eingeschlossen werden. Die Analysen wurden für die $L_{Aeq,3-5h}$ - Belastungsklassen 40-43, 44-45, 46-47, und 48-61 dB, entsprechend den Quartilgrenzen des untersuchten Pegelbereiches durchgeführt. Die Wahl der Belastung in dieser sehr speziellen Zeitperiode (3-5 Uhr nachts) als unabhängige Variable kann damit begründet werden, dass am Köln-Bonner Flughafen in dieser Zeit die stärkste nächtliche Fluglärmbelastung herrscht. In dieser Zeitscheibe treten auch die stärksten Effekte auf. Als Confounder wurden die Belastung durch Straßen- ($L_{Aeq,22-06h}$) und Schienenlärm ($L_{Aeq,22-06h}$), und (erneut) die Fluglärmbelastung ($L_{Aeq,3-5h}$), alle als kontinuierliche Variablen, Alter, Alter x Fluglärmbelastung, sowie 'Aufnahme ins Schallschutzprogramm', beinhaltend das Recht, sich den Einbau von Schallschutzfenstern vom Flughafen finanzieren zu lassen und die ökologischen Variablen 'Dichte an Altenheimen' und 'Sozialhilfe-Häufigkeit des Stadt- bzw. Ortsteils' in der jeweiligen Wohngemeinde berücksichtigt.

Die Studie ergab signifikante Beziehungen zwischen der Fluglärmbelastung und der pro Patient verordneten Zahl blutdrucksenkender Medikamente. Die Zunahme der Verschreibungen kovarierte mit der nächtlichen Fluglärmbelastung zwischen 3 bis 5 Uhr am deutlichsten, wobei der Effekt bei Frauen ausgeprägter war als bei Männern. Die stärksten Effekte ergaben sich bei denjenigen Patienten, die

Kombinationen verschiedener Arzneimittelgruppen (Herzmedikamente inkl. blutdrucksenkende Mittel und Anxiolytika) verschrieben bekamen. Alle Effekte waren für die o.g. Confounder kontrolliert.

Ein Vorteil der Studie ist neben der großen Fallzahl auch die Tatsache, dass es durch die Teilnahme aller Krankenversicherten der an der Studie teilnehmenden gesetzlichen Krankenkassen keine Verzerrungen durch einen Response Bias gab. Einige gesetzliche und die privaten Krankenversicherungen nahmen an der Studie allerdings nicht teil. Ein Nachteil der Studie ist, dass einige Variablen nicht auf Personenebene vorlagen (z.B. Sozialstatus, s.o.). Zudem lagen für weitere wichtige Confounder (z.B. Rauchverhalten, Bewegungshäufigkeit) keinerlei Informationen vor. Die Fluglärm-Belastung ist eigentümlicherweise zweimal im finalen statistischen Modell enthalten (einmal als kontinuierliche Variable, einmal als Zugehörigkeit zu einer der vier Belastungsklassen), was eine Interpretation der berichteten Risiken erschwert. Die Autoren scheinen außerdem die im Modell enthaltenen Interaktionsterme bei der Berechnung der Odds Ratios nicht berücksichtigt zu haben, wodurch es in den meisten Fällen zu einer Überschätzung der Risiken gekommen sein dürfte. Aufgrund der oben genannten Probleme in Studiendesign und -auswertung fällt es den Autoren dieses Textes schwer, eine eindeutige Bewertung der Studie vorzunehmen.

(25) Floud, S., Vigna-Taglianti, F., Hansell, A., Blangiardo, M., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Cadum, E., Babisch, W., Selander, J., Pershagen, G., Antonioti, M. C., Pisani, S., Dimakopoulou, K., Haralabidis, A. S., Velonakis, V., & Jarup, L. (2010). Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: results of the HYENA study. *Occup Environ Med*, 68(7), 518-524.

Hauptfragestellung: Zusammenhang zwischen Fluglärm- und Straßenlärmbelastung und Medikamentenkonsum (vom Arzt verschriebene blutdrucksenkende Mittel, Antazida, Anxiolytika, Schlafmittel, Antidepressiva und Asthmamittel) im Umfeld Europäischer Flughäfen (Amsterdam, Athen, Berlin, London, Mailand und Stockholm).

Zusammenfassung: Der Artikel beschreibt eine Teilauswertung von Daten aus der HYENA-Studie. Zur Methodik siehe (Jarup et al., 2005). Die Häufigkeit der Benutzung blutdrucksenkender Mittel sowie der Effekt der Fluglärmbelastung auf deren Konsumation unterschied sich in den verschiedenen Ländern. Beim *Nachtfluglärm* betragen die OR's für ein 10dB-Inkrement der Fluglärmbelastung 1.34 (95% CI: 1.14 - 1.57) in Großbritannien und 1.19 (1.02 - 1.38) in den Niederlanden, in den anderen Ländern konnte kein signifikanter Zusammenhang gefunden werden. Beim Tages-Fluglärm betragen die OR's in Großbritannien 1.35; (CI: 1.13 - 1.60) und in Italien wurde sogar ein signifikanter protektiver Effekt gefunden (OR 0.82; CI: 0.71 - 0.96). Risikoerhöhungen fanden sich in allen Ländern auch hinsichtlich der Einnahme von Anxiolytika (angstlösende Medikamente). Schlußfolgerung: Die Ergebnisse legen einen Einfluss der Fluglärmbelastung auf die Einnahme von blutdrucksenkenden Medikamenten nahe, wobei jedoch dieser Effekt nicht in allen Ländern gefunden wurde.

2.2.5 Originalstudien IV: Endokrine Biomarker

(26) Selander, J., Bluhm, G., Theorell, T., Pershagen, G., Babisch, W., Seiffert, I., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Vigna-Taglianti, F., Antonioti, M. C., Velonakis, E., Davou, E., Dudley, M.-L., & Järup, L.

(2009). Saliva Cortisol and Exposure to Aircraft Noise in Six European Countries. Environ Health Perspect, 117(11).

Untersuchungsfokus: Zusammenhang zwischen der Konzentration von Saliva-Cortisol und Fluglärmbelastung; untersucht wurde dies an einer Unterstichprobe im Rahmen der HYENA-Studie (Jarup et al., 2005; Jarup et al., 2008).

Zusammenfassung: Diese Studie ist eine der wenigen, die den Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und einem endokrinen Marker für die HPA-Achsen-Aktivität (Cortisol) untersucht hat (Cortisol ist ein in der Verhaltensforschung und Psychosomatik sehr häufig verwendeter Biomarker für Stress und neben Adrenalin und Noradrenalin das wichtigste sog. "Stresshormon"). Zu diesem Zweck wurde eine nach Lärmpegelklassen stratifizierte Unterstichprobe von 439 Personen aus der HYENA-Stichprobe gezogen, die während eines Tages morgens, mittags und abends eine Salivaprobe abgaben. Die Autoren beobachteten eine Erhöhung des freien Cortisolspiegels um 6.07 nmol/l (95% CI: 2.32 - 9.81 nmol/l) in der Morgenprobe bei Frauen mit einer Fluglärmbelastung von >60 dB ($L_{Aeq,24h}$), im Vergleich zu einer weniger belasteten Gruppe (≤ 50 dB). Dies entsprach einer Zunahme von 34%. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Cortisolspiegel bei Männern gefunden werden. Die Autoren schlußfolgern, dass die fluglärminduzierte erhöhte Cortisolkonzentration bei Frauen potentiell für die Genese kardiovaskulärer Effekte bedeutsam sein könnte.

2.2.6 Zusammenfassung

Die besondere Bedeutung, die Studien mit Kindern zugewiesen wird, wird oft damit begründet, dass chronifizierende gesundheitliche Störungen bei Kindern auf eine längere Lebenszeit (mit reduzierter Lebensqualität) treffen als bei Erwachsenen, womit der Schutz von Kindern vor Lärm und demgemäß entsprechende Wirkungsstudien hohe Priorität einnehmen. Die wissenschaftliche Literatur zu den Auswirkungen von Fluglärm auf Kinder enthält über Untersuchungen zur allgemeinen Gesundheit einschließlich Stressreaktionen und Wirkungen auf den Blutdruck und zur Belästigung hinaus eine Reihe von Studien zu Wirkungen auf kognitive Fähigkeiten wie Leseverständnis, Lösen schwieriger Puzzles, Lang- und Kurzzeitgedächtnis bis hin zu Schulleistungen. In keiner der hier referierten Arbeiten wurde jedoch als erklärende Variable spezifisch die Nacht-Belastung durch Fluglärm untersucht, so dass an dieser Stelle nur relativ allgemeine Schlußfolgerungen gezogen werden können. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Untersuchungen, die sich mit den Auswirkungen von Fluglärm auf den *allgemeinen Gesundheitszustand* von Kindern befaßten, keine konsistent übereinstimmenden Ergebnisse erbracht haben. In den Londoner Untersuchungen (Haines, Stansfeld, Job et al., 2001) wurden teilweise Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung und psychischer Gesundheit von Kindern gefunden, während sich in der multizentrischen RANCH-Studie dieser Zusammenhang nicht ergab (Stansfeld et al., 2005). Demgegenüber haben sich aber in allen Untersuchungen übereinstimmend Hinweise darauf gefunden, dass Fluglärmbelastung mit einer Beeinträchtigung der *Lesefähigkeit*, bzw. des *Leseverständnisses* verbunden ist. Die Ergebnisse zu Gedächtnisleistungen waren nicht konsistent; hier gibt es Hinweise, dass andere Faktoren (familiäre, soziale) oft stärker sind und dann einen möglichen Einfluss des Fluglärms überlagern. Es muss auch vermutet werden, dass der Einfluss des Sozialstatus der Eltern nicht immer ausreichend kontrolliert wurde und damit Effekte des Fluglärms weniger ausgeprägt sind, als jeweils dargestellt. Es zeigte sich indes relativ deutlich, dass Kinder

Belästigungen durch Fluglärm wahrnehmen (u.a. Haines, Brentnall & Stansfeld, 2001; Haines, Stansfeld, Brentnall et al., 2001; Haines, Stansfeld, Job et al., 2001; Stansfeld et al., 2005). Chronische Fluglärm-Belastung an der Schule war tendenziell auch mit größerer *Stresswahrnehmung* assoziiert. Ein Einfluss der Fluglärmbelastung am Schulort auf physiologische (z.B. Blutdruck) und hormonelle Parameter (Katecholamin- und Cortisolkonzentration) konnte auch in den groß angelegten Studien (z.B. RANCH) nicht schlüssig nachgewiesen werden. Dies bedeutet indes nicht zwingenderweise, dass Kinder in ihrer Wohnumgebung von solchen Effekten verschont werden.

Zur Frage der Auswirkung von Fluglärm auf kardiovaskuläre Parameter, insbesondere Blut(hoch)druck, liegen zahlreiche Untersuchungen vor, die in Erwachsenenpopulationen eindeutige und signifikante statistische Zusammenhänge zeigten, auch wenn diese nur mit Vorsicht kausal zu interpretieren sind. Ein erhöhtes Risiko bei Belastung durch Tages- und/oder Nachtfluglärm kann nach gegenwärtigem Stand des Wissens bei zwei kardiovaskulären Krankheitsbildern als ausreichend gesichert angesehen werden: Bei ischämischen Herzkrankheiten und bei Hypertonie-bedingten Krankheiten, wobei signifikante Risikoerhöhungen ab ca. 60 dB Mittelungspegel (L_{den} oder $L_{Aeq,24h}$) auftreten. Die heutzutage ermittelten Effektstärken scheinen indes etwas geringer zu sein als bei früheren Untersuchungen, etwa bei Knipschild (1977), was möglicherweise mit den doch nicht unerheblichen Fortschritten bei der Lärminderung von Einzelereignissen (oder auch mit der heute i.d.R. besseren Lärm-Berechnungsmethodik) zusammenhängt. In der grossangelegten HYENA-Studie konnte insbesondere bei Fluglärm in der *Nacht* ein signifikanter Zusammenhang mit erhöhtem Hypertonie-Risiko gefunden werden. Es ergab sich zudem auch ein signifikanter Zusammenhang zwischen Hypertonierisiko und der Straßenlärmbelastung am Tage (Jarup et al., 2008). Eriksson et al. (2007) konnten zeigen, dass 10 Jahre Wohnen in bereits mäßig fluglärmexponierten Gebieten ($L_{den} > 50$ dB) mit einer ca. 20-prozentigen Risikoerhöhung für Hypertonie-Neuerkrankungen verbunden ist. Fluglärm ist statistisch auch mit dem Mortalitäts-Risiko durch Herzinfarkt verbunden, insbesondere bei Personen, die lange in fluglärmbelasteten Gebieten gelebt haben (Huss et al., 2010). Nächtliche Fluglärmbelastung ist nicht mit gesteigertem Konsum blutdrucksenkender Medikamente korreliert, es wurde jedoch von Franssen et al. (2004) beobachtet, dass Fluglärmbelastung zu später Abendzeit (22-23 Uhr) signifikant mit erhöhtem Konsum nicht rezeptpflichtiger Schlafmittel assoziiert ist. Tendenziell zeigen die Untersuchungen der letzten 10 Jahre, dass die kardiovaskulären Risiken beim Fluglärm bei Männern etwas stärker ausgeprägt sind als bei Frauen. Insgesamt bieten diese Untersuchungen genügend Daten, um einen kausalen Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Erkrankungsrisiken als ausreichend gesichert zu bewerten.

2.3 Belästigung durch Fluglärm in der Nacht und zu Randzeiten

Sofern man grundsätzlich auch die *Belästigung* durch Fluglärm als gesundheitsrelevante Wirkung auffassen möchte, wäre das in diesem Review zu integrierende Schrifttum sehr umfangreich, auf das Thema "Belästigung" wird deshalb hier nur kurz und mit Beschränkung auf das Wesentliche eingegangen.

Bundesweit fühlen sich knapp 30% der deutschen Bevölkerung durch Fluglärm belästigt (BMU/UBA, 2010). Fluglärm liegt damit an dritter Stelle nach Straßenverkehrs- und Nachbarschaftslärm. Nach allgemeiner Einschätzung bildet sich das globale Belästigungsurteil einer Lärmquelle durch eine In-

tegration von Störungen in verschiedenen Situationen und emotionalen Bewertungen über eine längere Zeit. Es hat sich mittlerweile zu einem Standard entwickelt, die Belästigung durch Lärm in Befragungen mehrstufig zu erheben und den Anteil der stark Belästigten als Funktion der Lärmbelastung in *Belastungs-Wirkungskurven* grafisch darzustellen. Durch die breite Akzeptanz der ICBEN-Empfehlungen aus dem Jahr 2001 zur Erfassung der Lärmbelastung (Fields, De Jong, Gjestland et al., 2001) hat sich auch das Problem der mangelnden Vergleichbarkeit von Belästigungsstudien untereinander in den letzten Jahren deutlich entschärft. Aktuelle Belastungs-Wirkungskurven für Belästigung durch Fluglärm in Deutschland (Frankfurt) können z.B. Schreckenber & Meis (2007) entnommen werden. Die Belästigung durch Fluglärm steigt mit zunehmendem Pegel. Dies zeigen grundsätzlich alle sozioakustischen Untersuchungen – mit einer Tendenz, dass in den letzten Jahren die Belästigung bei gleichbleibenden oder sinkenden Pegeln sogar zugenommen hat (Guski, 2003a, 2003b; Janssen et al., 2011), wobei sich Experten bis heute streiten, was die Gründe dafür sein könnten. Die Steigerung der Flugbewegungen wird von der Mehrzahl der Lärmwirkungsforscher als einer der Hauptgründe betrachtet für die Zunahme der Fluglärmelastung im Verlauf der letzten 20 Jahre. Die derzeitige und auch für die Zukunft prognostizierte Zunahme des Flugverkehrs und entsprechende Bemühungen von Flughäfen zur Erweiterung ihrer Kapazität sind vermutlich wesentliche Gründe dafür, dass die Wirksamkeit erzielter Geräuschkinderungen an einzelnen Fluggeräten wieder egalisiert wurde.

Es ist nicht davon auszugehen, dass Personen *nachts* nicht belästigt werden (z.B. weil sie schlafen), sondern das Belästigungspotential ist nachts sogar noch wesentlich ausgeprägter als am Tag. Wenn Lärmbetroffene z.B. gefragt werden, zu welchen Zeiten es besonders ruhig in ihrem Wohngebiet sein sollte, geben sie in der Regel zuerst die Nacht an, gefolgt vom Abend (Guski, 1991). Stündliche Belästigungsprofile vom frühen Morgen bis zum späten Abend, die anhand von Befragungsdaten für die Umgebung der Flughäfen Frankfurt und Zürich berechnet wurden (Brink et al., 2010), zeigen, dass der späte Abend und der frühe Morgen besonders anfällige Zeitpunkte für Fluglärm-Belästigungen sind (Abbildung 12).

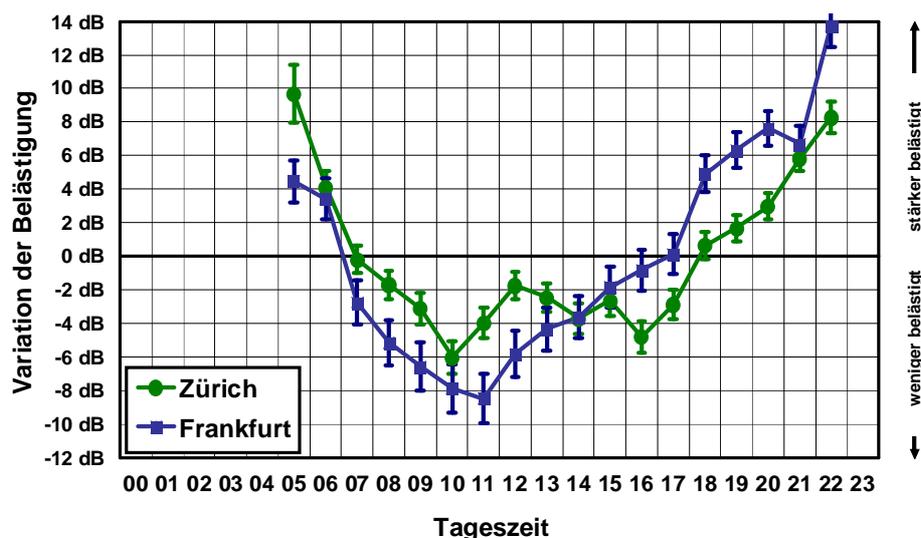


Abbildung 12: Belästigungsvariation in Abhängigkeit der Tageszeit bei der Zürcher und Frankfurter Bevölkerung, in dB ausgedrückt; aus (Brink et al., 2010)

2.4 Auswirkungen unterschiedlicher nächtlicher Flugbetriebsbeschränkungen auf den Schlaf

Fast alle deutschen Flughäfen haben irgendeine Form von Flugbetriebsbeschränkung in der Nacht, die aber meist den Betrieb von Ambulanz- und Rettungsflügen und teilweise auch von Post- und Kurierflügen sowie den Einsatz von Flugzeugtypen mit geräuschärmeren Triebwerken zulässt. Eine vollständige Ausnahme bildet der Flughafen Hahn.

Bei den fünf großen deutschen Verkehrsflughäfen gelten teilweise sehr unterschiedliche Regeln, die kaum direkt mit einander vergleichbar sind:

Frankfurt/Main (ca. 465.000 Flugbewegungen in 2010): Laut Planfeststellungsbeschluss zum Ausbau des Flughafens Frankfurt/Main (2007) sind bis zu 150 Flüge pro Nacht zwischen 22.00 und 06.00 Uhr erlaubt, d.h. bis zu maximal 54.750 Flüge im Jahr. Auf Grund verschiedener Gerichtsurteile sind seit November 2011 planmäßige Starts und Landungen in der Zeit von 23:00 – 05:00 Uhr unzulässig. Der Flughafenbetreiber hält sich zur Zeit daran, aber noch ist nicht genau festzustellen, wie viele der etwa 50 Flugbewegungen, die bis November 2011 in der Zeit zwischen 23:00 und 05:00 Uhr pro Nacht hier stattfanden, in andere Zeiträume am selben Flughafen verlagert wurden.

München (ca. 290.000 Flugbewegungen in 2011): Seit 2001 sind planmäßige Flüge zwischen 00:00 – 06:00 Uhr unzulässig; es sind jedoch maximal 28 Flugbewegungen in der Zeit 23:30 – 05:00 Uhr gestattet. In den Nachtrandstunden (22:00 – 00:00 und 05:00 – 06:00 Uhr) dürfen Flugzeuge verkehren, die auf der deutschen „Bonusliste“ stehen. Da fast alle Verkehrsflugzeuge inzwischen auf dieser Liste stehen, bedeutet diese Regelung praktisch keine Einschränkung des Flugverkehrs in den Nachtrandstunden. Hinzu kommt aber eine Kontingentierungsregelung: Nachtflugbetrieb ist nur soweit zugelassen, wie der durch alle Nachtflüge insgesamt erzeugte Fluglärm ein festgelegtes Jahres-Lärmvolumen nicht übersteigt. Für dessen Berechnung bestimmend ist die Anzahl der Flugbewegungen sowie Art und Größe des Flugzeugs.

Düsseldorf (ca. 216.000 Flugbewegungen in 2011): Seit 2007 sind planmäßige Starts in der Zeit von 22:00 - 06:00 Uhr unzulässig; planmäßige Landungen sind in der Zeit von 23:00 – 06:00 Uhr unzulässig.

Hamburg (ca. 157.000 Flugbewegungen in 2010): Zwischen 23:00 – 06:00 Uhr sind keine planmäßigen Flugbewegungen zulässig, aber verspätete Linienmaschinen dürfen noch bis 00:00 Uhr ohne Einzelgenehmigung landen. Im Jahr 2011 gab es insgesamt 5155 Flugbewegungen zwischen 22:00 und 06:00 Uhr in Hamburg.

Köln/Bonn (ca. 142.000 Flugbewegungen in 2010): Seit 1997 sind in der Zeit von 22:00 – 06:00 Uhr ausschließlich Flugzeuge nach der deutschen Bonusliste erlaubt. Die NRW-Landesregierung strebt eine Flugbetriebsbeschränkung für Passagierflugzeuge in der Zeit 00:00 – 05:00 Uhr an, während der Frachtverkehr unberührt bleibt. Nach Angaben des Flughafens Köln/Bonn würde diese Regelung ca. 6.000 Flugbewegungen im Jahr betreffen. Zur Zeit ist unklar, wie viele dieser Flüge in welche Zeiträume am selben Flughafen verlagert würden, wenn die beabsichtigte Neuregelung greift.

Gemeinsam ist allen hier betrachteten Nachtflugbeschränkungen, dass eine sog. „Kernnacht“ zwischen 00:00 und 05:00 Uhr vom planmäßigen Betrieb durch sehr laute Maschinen freigehalten wird. In Frankfurt und Düsseldorf beginnt diese Ruhezeit schon um 23:00 Uhr, das trifft dem Buchstaben nach auch auf Hamburg zu, wird dort aber durch den Verzicht auf Einzelentscheidungen für Nachtflüge unterlaufen. Gegen Morgen wird die „Kernnacht“ nur in Düsseldorf und Hamburg bis 6:00 Uhr ausgedehnt.

Aus Sicht der Lärmwirkung ist die Frage, wann eine Nachtflugbeschränkung beginnen und wann sie enden sollte, genau so wenig trivial wie die Frage, welcher Flugbetrieb in den Randstunden zwischen Tag und Nacht herrscht, bzw. welche Konsequenzen die Verschiebung von Flugbewegungen aus der Nacht in die Nachtrandstunden haben würde. Hier werden drei Aspekte berührt, die gesundheitliche Konsequenzen haben:

1. Einklang mit oder Widerspruch zum durchschnittlichen Schlafverhalten der Bevölkerung,
2. Störungen des Nachtschlafs in den frühen Morgenstunden, und
3. Spitzenstunden der Lärmbelastigung der Betroffenen am späten Abend und frühen Morgen.

2.4.1 Das durchschnittliche Schlafverhalten der mitteleuropäischen Bevölkerung

In der Schweizer Lärmstudie 2000 ermittelten Brink, Wirth, Rometsch & Schierz (2005) für die Zürcher Bevölkerung, dass der durchschnittliche selbst-angegebene Aufstehzeitpunkt in der Woche 6:34 Uhr ist, am Wochenende 8:22 Uhr und über die gesamte Woche anteilig gemittelt 7:05 Uhr. Der über die Werkstage gemittelte Bettgeh-Zeitpunkt war 22:47 Uhr; am Wochenende war dieser Zeitpunkt fast genau eine Stunde später, um 23:43 Uhr. Anteilsmäßig für die ganze Woche gewichtet war der durchschnittliche Zeitpunkt des Zubettgehens in der Lärmstudie 2000 23:02 Uhr. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch Meier (2004) für die deutsche Bevölkerung. Bei Nutzung der Angaben aus der Lärmstudie 2000 und der anteilmäßigen Berücksichtigung der Schlafgewohnheiten von Kindern lassen sich Wachheits- und Schlafdichtefunktionen über die 24 Stunden eines Tages darstellen (Abbildung 13 nach Brink et al. 2005). Daraus folgt, dass etwa die Hälfte der Bevölkerung im Durchschnitt um 7:00 Uhr aufsteht und gegen 23:00 Uhr zu Bett geht. Der Einsatz von Fluglärm um 5:00 Uhr widerspricht nach diesen Daten den Schlafgewohnheiten von etwa 97% der Bevölkerung, der Einsatz um 6:00 Uhr widerspricht 85%, und der Einsatz um 7:00 Uhr immer noch 48%.

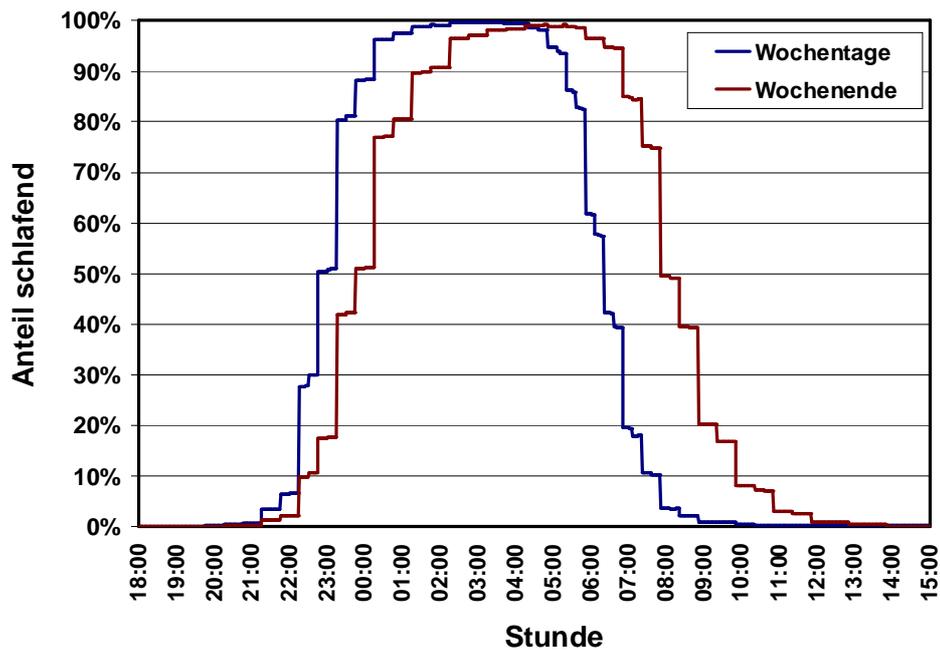


Abbildung 13: Schlafender Anteil der Bevölkerung rund um den Flughafen Zürich an Wochentagen und Wochenenden als Funktion der Tageszeit (Daten aus der "Lärmstudie 2000", Befragungswelle 2001, siehe Brink et al. 2005, vgl. auch Brink et al. 2010, dort Fig. 4).

Auch Basner & Samel (2007) ermittelten in einer bevölkerungsrepräsentativen Stichprobe von 2251 Personen in der Umgebung des Frankfurter Flughafens eine durchschnittliche Bettzeit (50%) zwischen 23 und 07 Uhr für Erwachsene im Alter zwischen 17 und 97 Jahren. Über 90% der untersuchten Personen befindet sich zwischen 00 und 06 Uhr im Bett. Weiterhin verglichen die Autoren den Anteil der von einer „Kernruhezeit“ zwischen 5 und 8 Stunden erfassten Bettzeit in Abhängigkeit vom Startzeitpunkt dieser „Kernruhezeit“ (Abb.14).

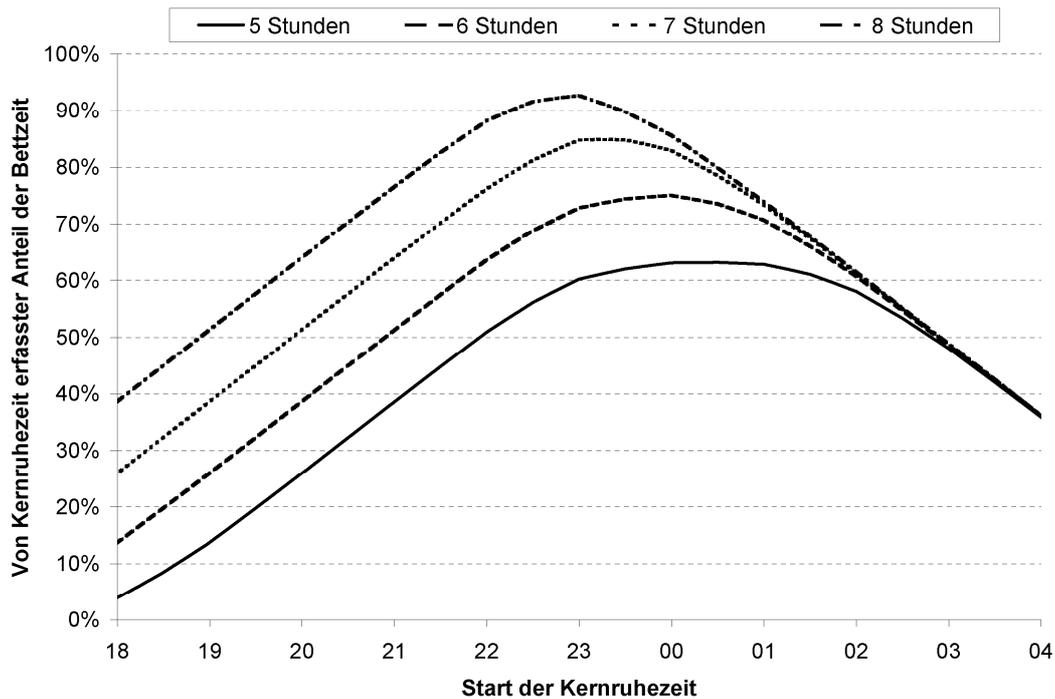


Abbildung 14: Anteil der von einer „Kernruhezeit“ (5, 6, 7 oder 8 Stunden) erfassten Bettzeit in Abhängigkeit von der Startzeit der Kernruhezeit (aus Basner & Samel 2007).

Der optimale Startzeitpunkt der „Kernruhezeit“ ist nach dieser Analyse durch den Zeitpunkt definiert, an dem die durch die „Kernruhezeit“ erfasste Bettzeit ihr Maximum erreicht. „Dieser optimale Startzeitpunkt verschiebt sich mit länger werdender Kernruhezeit zu früheren Uhrzeiten. Selbstverständlich werden von längeren Kernruhezeiten i.d.R. auch höhere Anteile der Bettzeit erfasst. Aus der Abbildung lassen sich jedoch auch Beispiele konstruieren, für die das nicht zutrifft: So erfasst z.B. eine achtstündige Kernruhezeit von 21:00 bis 5:00 Uhr einen geringeren Anteil der Bettzeit als eine siebenstündige Kernruhezeit von 23:00 bis 6:00 Uhr“ (Basner & Samel, 2007, p. 89). Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass „die Tagesrandstunden keineswegs als unproblematisch eingestuft werden dürfen, insbesondere für die nicht erwachsene Bevölkerung und bei Flughäfen mit relevantem Verkehrsaufkommen in dieser Zeitperiode“ (p.86).

Da das Schlafverhalten in Befragungen üblicherweise nur bei Personen oberhalb von 17 Jahren erfasst wird, müssen Daten über die Schlafzeiten von **Kindern und Jugendlichen** aus anderen Quellen bezogen werden. Hier bieten die Veröffentlichungen aus der Zürcher Longitudinalstudie (v.a. Iglowstein, Jenni, Molinari, Largo, 2003) eine anerkannte Quelle. Die folgende Tabelle 3 zeigt die durchschnittlichen Bett- und Aufwachzeiten aus der dritten Kohorte (1986-1993). Kleine Kinder brauchen sehr viel Schlaf (etwa 11 Stunden im Alter von 6 Monaten) und haben meist noch keinen gefestigten Nachtschlaf, d. h. ihr Schlaf verteilt sich auf den ganzen Tag. Kinder bis 5 Jahre schlafen etwa genauso lange und haben noch 1 bis 2 Schlafperioden während des Tages. Schulpflichtige Kinder benötigen meist mehr als 9 Stunden Schlaf, müssen aber wegen des Schulbeginns (meist gegen 08:00 Uhr), ähnlich wie Erwachsene, zwischen 06:00 und 07:00 Uhr aufstehen.

Tabelle 3: Durchschnittliche Bettgeh- und Aufwachzeiten mit Standardabweichung von Säuglingen bis Adoleszenten (aus Tabelle 2 in Iglowstein et al., 2003).

	6 Monate	1 Jahr	3 Jahre	5 Jahre	10 Jahre	14 Jahre
Bettzeiten	20:16 (1:08)	19:46 (0:50)	20:07 (0:42)	20:11 (0:38)	20:59 (0:40)	22:02 (0:37)
Aufwachzeiten	7:13 (0:13)	7:19 (0:52)	7:35 (0:50)	7:20 (0:39)	6:56 (0:29)	6:30 (0:20)

Das Schlafverhalten von **Jugendlichen** bzw. **Heranwachsenden** (etwa 13 bis 19 Jahre) zeigt ein Dilemma: Sie gehen generell entgegen ihrem bio-physiologischen Schlafbedürfnis zu spät schlafen und können wegen der Anforderungen von Schule oder Ausbildung nicht ausschlafen. Besonders am Wochenende verlängert sich die Zeit des abendlichen Wachseins und wird durch Ausschlafen nicht aufgefangen. Jugendliche schlafen also im Vergleich zu Kindern (und teilweise zu Erwachsenen) zu wenig und zu spät. Damit wären keine Nachteile verbunden, wenn der bio-physiologische Schlafbedarf bei Jugendlichen geringer wäre als bei Kindern. Dies ist jedoch nicht der Fall: Beispielsweise haben Carskadon, Harvey, Duke et al. (1980) 19 10-bis 12-jährige Kinder 6 Jahre lang (d.h. bis in die Jugendzeit) in den Sommerferien wiederholt im Schlaflabor drei Tage lang untersucht und sie so lange schlafen lassen, wie sie wollten. Es zeigte sich, dass die Schlafdauer der Jugendlichen über die ganze Zeit hinweg konstant blieb (9.2 Stunden) und sich nicht der Schlafdauer der Erwachsenen (etwa 7 bis 8 Stunden) annäherte. Gleichzeitig klagten sie mit zunehmendem Alter stärker über Müdigkeit am Tage. In der Untersuchung von Wolfson & Carskadon (1998) wurden 3.120 Oberschüler (13-19 Jahre) hinsichtlich ihres Schlafverhaltens während der Schulzeit und hinsichtlich ihrer Schulleistungen befragt. Es stellte sich heraus, dass die Heranwachsenden mit zunehmendem Alter signifikant kürzere Schlafzeiten angaben, und dass diese Angaben positiv mit den Schulleistungen korrelierten, d.h. längere Schlafzeiten waren mit besseren Schulleistungen verknüpft. Unklar ist bislang, in welchem Ausmaß Störungen des Nachtschlafs durch Lärm Auswirkungen auf Heranwachsende haben.

2.4.2 Störungen des Nachtschlafs in den frühen Morgenstunden

Wie aus Abschnitt 2.1.1 dieses Textes hervorgeht, werden die stärksten Effekte von Lärmereignissen auf den Schlaf in den Morgenstunden registriert (vgl. Brink, Lercher, Eisenmann & Schierz, 2008). Weiterhin zeigten Basner & Siebert (2010), dass bei Extrapolation der Daten aus der DLR-Laborstudie hohe Fluglärmbelastungen in den Tagesrandstunden (am späten Abend und dem frühen Morgen), mit starken Schlafstrukturänderungen bei jenen Personen einhergehen, die früh zu Bett gehen oder früh aufstehen (müssen) , wie z.B. Kinder oder Schichtarbeiter. Dies ist auch eines der Themen, die zur Zeit in der Lärmwirkungsstudie NORAH am Flughafen Frankfurt untersucht werden (Schreckenberg, Eikmann, Guski et al. 2012).

Das Problem der morgendlichen Schlafstörungen ist besonders deshalb so gravierend, weil schon eine einzige starke Störung des Nachtschlafs am Morgen, die nicht nur zu einer elektrophysiologisch erfassbaren Aufwachreaktion, sondern sogar zu bewusstem Erwachen führt, die Betroffenen stärker am Wieder-Einschlafen hindert und somit mittelfristig die nächtliche Erholungszeit der Betroffenen

verkürzt. Aus diesem Grund wurde am Flughafen Leipzig/Halle für die zweite Nachthälfte (2:00 bis 6:00 Uhr) ein Malus von 1,4 dB für alle in diesem Zeitraum auftretenden Fluggeräusche verhängt (Basner und Siebert 2006).

2.4.3 Spitzenstunden der Lärmbelastung der Betroffenen am Abend

In zwei europäischen Feldstudien zur Belästigung durch Fluglärm wurde auch der Tagesgang der Belästigung erhoben: zum einen in der bereits erwähnten Lärmstudie 2000 (Brink et al. 2005), zum anderen in der sog. RDF-Studie am Flughafen Frankfurt (Schreckenbergs & Meis 2006). In der Lärmstudie 2000 wurden in zwei Wellen (2001 und 2003) ca. 3000 durch Fluglärm betroffene Personen rings um den Flughafen Zürich danach gefragt, ob es Zeiten gebe, zu denen man durch Fluglärm besonders stark belästigt sei; drei Tageszeiten konnten frei angegeben werden („von... bis...“). Es stellte sich heraus, dass die Betroffenen abends zwischen 21 und 22 Uhr zu 23% besonders stark belästigt waren. Abb. 15 zeigt die Belastungs/Belastigungsprofile für 4 große Untersuchungsgebiete mit unterschiedlicher Fluglärmstruktur im Jahr 2001: Norden, Westen, Südosten (nahe am Flughafen) und Osten (fern vom Flughafen, bzw. wenig belastet).

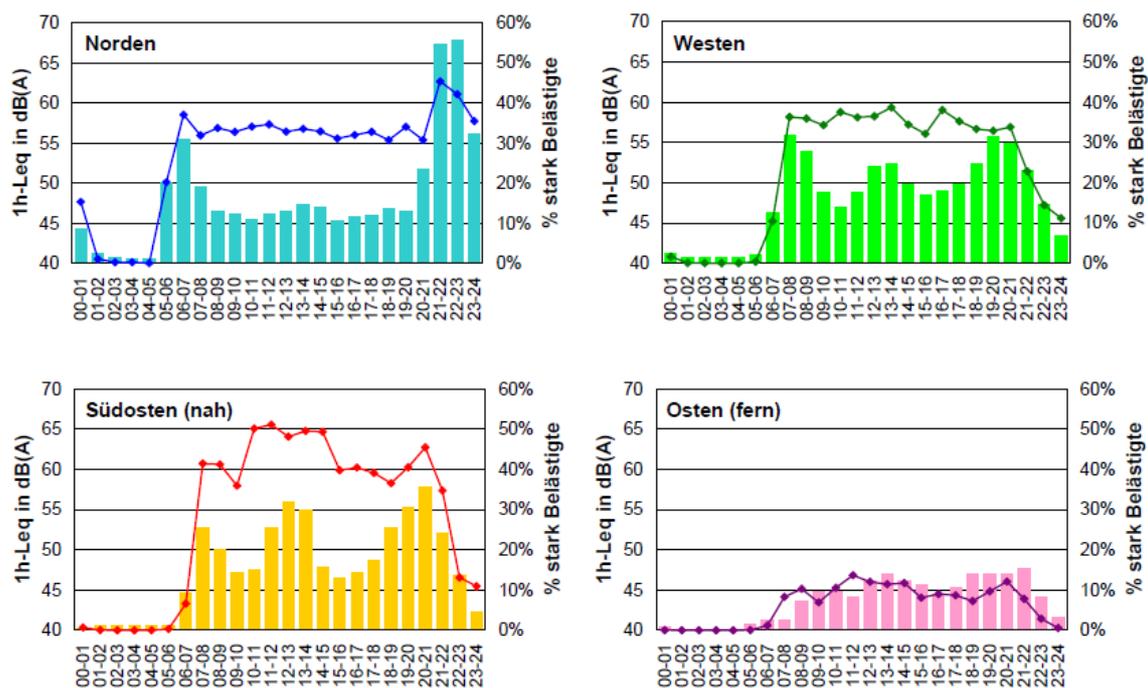


Abbildung 15: Belastungs/Belastigungsprofile für 4 große Untersuchungsgebiete am Flughafen Zürich (aus Brink et al. 2005). Auf der X-Achse sind Tagesstunden eingetragen; als Kurve dargestellt ist der 1-Stunden-Leq (linke Y-Achse); die Balken repräsentieren den Anteil von Personen, die zu einer bestimmten Stundeangaben, stark belästigt zu sein (rechte Y-Achse).

Es zeigte sich, dass die stundenbezogenen Belästigungsangaben einerseits näherungsweise dem Stundenpegel folgen, andererseits aber auch unabhängig davon hohe Spitzen zu drei Tageszeiten haben: morgens von 6 bis 9 Uhr, mittags von 11 bis 14 Uhr und abends von 21 bis 23 Uhr.

Zu weitgehend vergleichbaren Ergebnissen kommen Schreckenber & Meis (2006, 2007) in einer Untersuchung am Flughafen Frankfurt: Hier wurden in der sog. Breitenerhebung 2312 Anwohner u.a. gefragt, wie stark sie sich in jeder der Stunden von 05 bis 23 Uhr durch den Fluglärm belästigt fühlten. Abb. 16 zeigt das Ausmaß der stundenbezogenen Belästigung für 5 verschiedene Stunden-Pegelklassen.

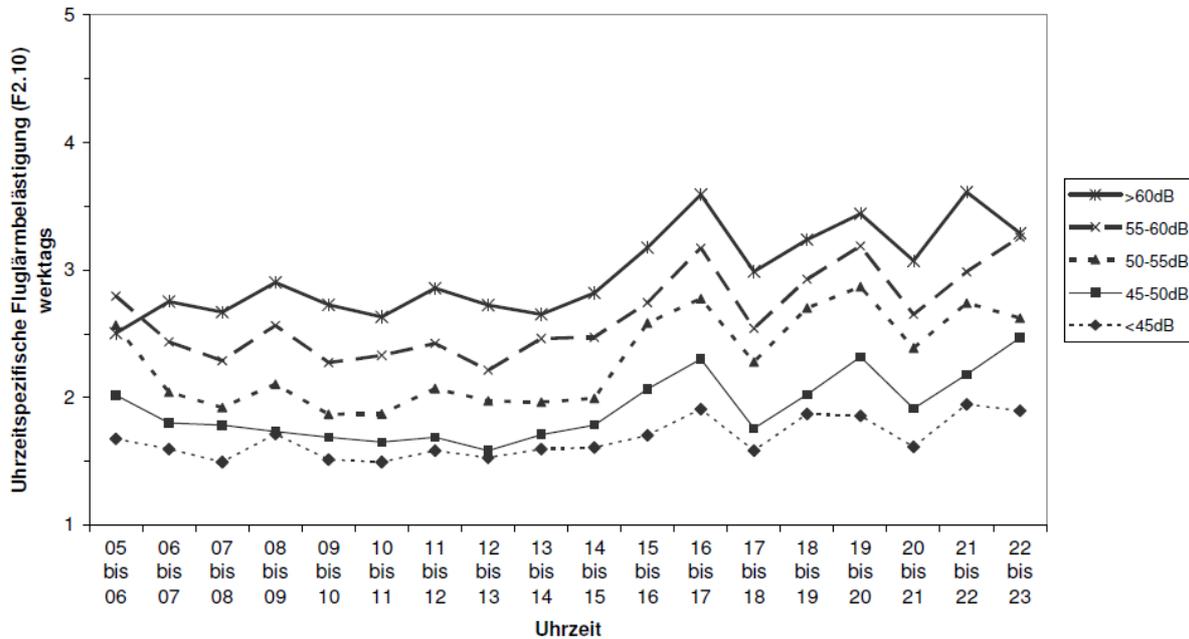


Abbildung 16: Stunden-bezogene Belästigungsmittelwerte werktags für Fluglärm am Flughafen Frankfurt in Abhängigkeit von 1-Stunden-Leq (aus Schreckenber & Meis, 2006, Abb. 14-3).

Auch hier zeigen sich im Durchschnitt die höchsten Belästigungswerte am späten Abend (21-23 Uhr).

Zusammengefasst lässt sich aus den Ergebnissen der vorangehenden Abschnitte 2.4.1 bis 2.4.3 feststellen, dass der Flugbetrieb in den frühen Morgenstunden (05-07 Uhr) den Schlafgewohnheiten der europäischen Bevölkerung widerspricht und in diesen Zeiten die Schlafstruktur besonders stark stört und auch das Wiedereinschlafen verhindert. Weiterhin lässt sich feststellen, dass der Flugbetrieb am späten Abend (21-23 Uhr) besonders starke Belästigungen verursacht, den Einschlafprozess stören kann, und bei denjenigen, die früh ins Bett gehen (müssen), wie z.B. Kinder oder Schichtarbeiter, zudem zu starken Änderungen der Schlafstruktur führt, insbesondere zur Verringerung des Tiefschlafanteils (Basner & Siebert 2010). Damit ist zu erwarten, dass eine Erhöhung des Flugbetriebs in den Nachtrandstunden besonders gravierende Auswirkungen auf die betroffene Bevölkerung hat.

3 Wissenschaftliches Fazit

Für die meisten Forschungsergebnisse aus der in dieser Zusammenstellung diskutierten Literatur ist charakteristisch, dass selbst dann, wenn signifikante (kausale) Lärmwirkungen festgestellt wurden, es sich praktisch nie um "Alles-oder-Nichts"-Reaktionen handelt, sondern um kontinuierlich mit der Schallbelastung ansteigende Wahrscheinlichkeiten oder Wirkungsausprägungen ohne erkennbare oder klar angebbare Schwellen (vgl. Kap. 1.2). Diese Eigenschaft des Expositions-Wirkungs-zusammenhangs zeigt sich sowohl für psychologische Wirkungen wie z.B. die *Belästigung*, für physiologische Indikatoren wie z.B. die *Aufwachwahrscheinlichkeit* in Untersuchungen zu kurzfristigen Wirkungen, aber auch in epidemiologischen Studien zum Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und *Morbiditäts- bzw. Mortalitätsrisiken*. Zwar werden berichtete Risiken bei den meisten epidemiologischen Untersuchungen i.d.R. erst in den höheren oder höchsten Belastungskategorien im Vergleich mit gar nicht oder niedrig belasteten Bevölkerungsgruppen signifikant (z.B. Huss et al., 2010), dies bedeutet jedoch nicht zwingend, dass bei geringeren Belastungen die Risiken auf Null zurückgehen. Wenn weiterhin in epidemiologischen Studien die Effekte nur in gewissen (hohen) Belastungsklassen statistisch signifikant werden, bedeutet dies nicht zwingend, dass ein diskontinuierlicher Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung vorliegt. Die vermeintliche Existenz einer Wirkungsschwelle ist hier eher ein Artefakt der statistischen Auswertung (vgl. hierzu die Ausführungen in Kap. 4)

Die in diesem Bericht beschriebenen Studienformen haben unterschiedliche Stärken und Schwächen. Es ist ein Vorteil von Labor- und Feldstudien zur Wirkung von Fluglärm auf den Schlaf, dass sowohl die Exposition (z.B. Maximalpegel eines Fluggeräuschs) als auch die Wirkung (z.B. Aufwachreaktion) zeitsynchron und exakt gemessen werden können. Die aus diesen Studien abgeleiteten Expositions-Wirkungsbeziehungen geben deshalb relativ gut Aufschluss über den zu erwartenden Grad der Schlafstörung in Abhängigkeit von Anzahl und Pegel der Fluggeräusche, zumindest für die untersuchten Flughäfen und Probandenkollektive. Prognosen für langfristige Gesundheitsstörungen können aus diesen Studien jedoch nicht direkt abgeleitet werden. Hierzu benötigt man epidemiologische Studien, die sich mit langfristig fluglärmexponierten Bevölkerungsgruppen und dem Auftreten von verschiedenen Krankheiten (z.B. Bluthochdruck, Herzinfarkt) befassen. Epidemiologische Studien variieren in der Güte der Bestimmung des Krankheitsstatus, wobei ärztliche Diagnosen im Allgemeinen verlässlicher sind als Selbstangaben zum Gesundheitszustand. Problematisch bei den epidemiologischen Studien ist, dass die untersuchten Krankheiten meist erst bei langjähriger Exposition entstehen und nicht für Fluglärm spezifisch sind. So gibt es zahlreiche anerkannte Risikofaktoren, die mit einer Erhöhung z.B. des Herzinfarkttrisikos einhergehen (etwa Rauchen, Übergewicht, Diabetes, etc.). Wenn diese Risikofaktoren in stark fluglärmbelasteten Gebieten ebenfalls gehäuft zu beobachten sind, handelt es sich um sogenannte Confounder, die in epidemiologischen Studien ebenfalls bestimmt und für die in statistischen Modellen adjustiert werden muss.

Die Fluglärmbelastung basiert in epidemiologischen Studien fast ausschließlich auf berechneten Pegelmittelwerten, wobei meist der Verkehr in einem einzelnen Jahr Grundlage für die Berechnungen ist. Es ist offensichtlich, dass eine solche Berechnung für jeden einzelnen Studienteilnehmer nur be-

dingt repräsentativ sein kann, insbesondere weil (1) über den tatsächlichen Einwirkungsort und -zeitraum der Belastung nicht-prüfbare Annahmen getroffen werden müssen, und (2) sich die lokalen Fluglärmbelastungen auch an Bestandsflughäfen im Verlauf der Jahre ändern können, ganz abgesehen von den stetigen Änderungen (Verbesserungen) der akustischen Modelle zur Berechnung der Belastung. Die resultierenden Fehlklassifikationen der Fluglärmbelastung führen in der Regel zu einer Unterschätzung des Zusammenhangs von langfristiger Fluglärmexposition und der Entstehung von Krankheiten. Im Falle von systematischen Fehlklassifikationen bei der Exposition, z.B. durch nicht-korrigierte falsche Belastungsrechnungen oder inkorrekte, den Belastungsrechnungen zugrundeliegende Verkehrsdaten besteht gar die Gefahr, den ermittelten Zusammenhang auf falsche Pegelbereiche abzubilden. Im Fall des Fluglärms ist hier besonders zu berücksichtigen, dass die Beschreibung der Fluglärmbelastung mit Hilfe des Leq gerade im niedrigen Bereich (um 40 dB) mit großen Unsicherheiten (je nach Datenlage und Rechenmodell zwischen 4 und 8 dB) verbunden ist (Isermann & Schmid 1999; Thomann 2007). Das bedeutet, dass gerade die sog. Referenzgruppe, die für Unterschiedstests in epidemiologischen Untersuchungen notwendig ist, hinsichtlich ihrer akustischen Parameter größere Unsicherheiten aufweist als die höheren Pegelklassen. Diese Unsicherheitsunterschiede werden jedoch in den statistischen Tests selten berücksichtigt.

Schließlich ist zu hinterfragen, ob die langfristig wirksamen Eigenschaften der nächtlichen Lärmbelastung durch Mittelungspegel überhaupt adäquat erfasst werden. Die mittlerweile zahlreichen ereignisbasierten Untersuchungen (vgl. Kap. 2.1) zeigen deutlich, dass kurzfristige Nachtfluglärmwirkungen auf den Schlaf sich anhand von nächtlichen Mittelungspegeln nicht zuverlässig prognostizieren lassen und dass die Häufigkeit von Ereignissen und die Höhe von Maximalpegeln hierfür besser geeignet sind. Pragmatische Ansätze zum Schutz spezifischer Nachtstunden lassen sich deshalb – zumindest unter der Prämisse, dass auch Langzeit-Effekte eher durch Maximalpegel und deren Häufigkeit vorhergesagt werden können, als durch energetische Mittelwerte – eher aus solchen Studien ableiten.

Aus Sicht der spezifischen Wirkung von nächtlichem Fluglärm auf die Gesundheit ist zu bedauern, dass ein Großteil der epidemiologischen Studien nicht explizit zwischen der Fluglärmbelastung am Tag und in der Nacht unterscheidet. Dort, wo dieses geschah, konnten im Vergleich zur Lärmbelastung am Tage regelmäßig stärkere Zusammenhänge zwischen der nächtlichen Lärmbelastung und Gesundheit gefunden werden, was die Bedeutung der Nachtruhe für die Gesundheit unterstreicht.

Es ist bis jetzt nicht schlüssig geklärt worden, welche unter Fluglärm-Einfluss veränderten (primären) Schlafparameter in welchem Masse zu einer als kritisch zu taxierenden Beeinträchtigung der Gesundheit oder des Wohlbefindens auf lange Sicht beitragen. Hierzu sei angefügt, dass bei einer erweiterten Auslegung des Gesundheitsbegriffs auch lärmgestörter Schlaf per se, und somit auch Störungen ohne langfristige Folgen mit somatisch-medizinischem Krankheitswert, als Gesundheitsabträglich aufgefasst werden können. Nicht zuletzt sollte der Tatsache Gewicht beigemessen werden, dass für viele Menschen Schlaf nicht nur ein "notwendiges Übel", sondern durchaus eine mit Genuss verbundene Tätigkeit darstellt, die deutlich aufzeigt, dass man mit rein funktionalen Kriterien die Bedeutung des Schlafs oder die Begründung dessen Schutzes, nicht vollumfänglich erfassen kann.

Vor dem Hintergrund der bisherigen Darstellungen kann festgehalten werden, dass es nicht möglich ist, einen "sicheren" Grenz- oder Schwellenwert für Fluglärmbelastung in der Nacht anzugeben, unterhalb dessen "keine" gesundheitlichen Wirkungen mehr zu erwarten sind (es sei denn, man unter-

bindet jegliche Exposition, z.B. in Form von rigorosen zeitlich ausgedehnten Nachtflugverboten). Hinsichtlich somatischer Wirkungen/Schädigungen kann gefolgert werden, dass ausreichend Evidenz vorliegt, dass langfristig hohe Fluglärmbelastung in erster Linie mit Beeinträchtigungen des *Herz-Kreislaufsystems* verbunden ist (v.a. mit *Hypertonie* sowie *Herzinfarkt*), wobei wahrscheinlich Lärmefekte in der Nacht bedeutsamer sind als solche am Tage. Fluglärm-Belastungen in der Nacht oder zu Randzeiten sind zudem mit wesentlich ausgeprägteren *Belastungsreaktionen* verbunden, als Belastungen am Tag. Schon bei vergleichsweise geringen Maximalpegeln einzelner Fluglärmereignisse zeigen sich außerdem statistisch signifikante Zunahmen der *Wahrscheinlichkeit physiologischer Reaktionen* (Arousal, Aufwachreaktionen), die zwar nicht demonstrierbar pathogen sind, aber bei welchen auch nicht erwiesen ist, dass sie es nicht sind.

Die Verursachungskette von akuten Fluglärmereignissen während der Nacht bis zu psychischen oder körperlichen Beeinträchtigungen ist bis heute noch nicht in allen Details erforscht. Hierfür wären groß angelegte Längsschnitt- bzw. Kohortenstudien und Belastungsdaten in feiner Auflösung und gleichbleibender Qualität über viele Jahre vonnöten. Eine ursächliche (kausale) Verknüpfung zwischen akuten Reaktionen und langfristig erhöhter gesundheitlicher Risiken ist zwar empirisch nicht zweifelsfrei belegbar, jedoch "biologisch plausibel" (vgl. WHO, 2009). Die Beantwortung der Frage der kausalen Verursachung langfristiger gesundheitlicher Beeinträchtigungen wird durch verschiedene Einschränkungen erschwert, die mit forschungsmethodischen und ethischen Grenzen der ganzen Lärmwirkungsdisziplin zusammenhängen. Die wichtigste Einschränkung ist wahrscheinlich die Tatsache, dass man in der Umweltepidemiologie nicht "experimentieren" kann. Grundsätzlich stellt das Experiment in allen empirischen Wissenschaften die einzige sichere Methode dar, zweifelsfreie Rückschlüsse auf kausale Beziehungen zu ziehen. Ein Experiment zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass Einflussgrößen, von denen man annimmt, dass sie eine bestimmte Wirkung auf abhängige Variablen ausüben, systematisch und kontrolliert variiert werden, bei größtmöglicher Kontrolle weiterer Einflussfaktoren. Im engeren Sinn als Experimente zu bezeichnende Untersuchungen im aktuell betrachteten Gegenstand sind z.B. die DLR-Laborstudien. In der Belästigungsforschung und im Rahmen epidemiologischer und von Beobachtungsstudien, die "im Feld", also in ökologischen Settings (im "richtigen Leben") durchgeführt werden, besteht die Möglichkeit der experimentellen Kontrolle in der Regel nicht. Mitunter ergibt sich dann und wann die Möglichkeit von Quasi-Experimenten, bei welchen man sich die von außen vorgegebene systematische Veränderung externer Faktoren (z.B. die Änderung der Belastung durch Inbetriebnahme einer neuen Landebahn oder eines neuen Flughafens) zunutze machen kann (z.B. im Rahmen der NORAH-Studie, vgl. Schreckenberg, Eikmann, Guski et al. 2012), dies stellt jedoch eher einen nicht-typischen Sonderfall dar, und da auch in solchen Fällen nur eine rudimentäre Kontrolle der unabhängigen Variable(n) gegeben ist, können die Vorteile eines echten Experiments nur teilweise ausgeschöpft werden.

In der Umweltepidemiologie werden zur Linderung des geschilderten "Mißstands" verschiedene (Mindest-)Kriterien (vgl. Hill, 1964) angesetzt, um eine kausale Verursachung von Erkrankungen durch das Vorhandensein bestimmter Umwelttoxine (z.B. Lärm) dennoch postulieren zu können. Dazu gehört zum Beispiel, dass die Ursache der Krankheit vorausgeht, dass die Expositions-Wirkungs-Beziehung plausibel ist, dass der Zusammenhang konsistent in unabhängigen Studien gefunden wurde, dass die Beziehung eine gewisse Stärke hat usw. Diese Kriterien sind in allen in diesem Bericht vorgestellten epidemiologischen Studien jeweils unterschiedlich gut erfüllt, wobei die Einschätzung, ob eine Beziehung als kausal gelten kann oder nicht, auch immer von nicht gänzlich objektivierbaren

Urteilen der beteiligten Forscher abhängt. Forschende haben zudem vom Forschungsgegenstand unabhängige eigene - in der Regel nie offen deklarierte - Motive, die solche Urteile beeinflussen können und die man demgemäß bei der Bewertung des wissenschaftlichen Schrifttums nicht gänzlich unberücksichtigt lassen sollte: Vor allem wollen sie ihre Hypothesen in aller Regel bestätigen können, denn die Publikation signifikanter Ergebnisse ist einfacher als die Publikation eines Nullzusammenhangs.

Über die vermittelnden Mechanismen, die zwischen primären Störungen des Schlafs durch Lärm und langfristigen Endpunkten kausal wirksam sind, bestehen unter Anderem aus o.g. Gründen erhebliche Unsicherheiten. Es ist jedoch berechtigt, anzunehmen, dass langfristige (tertiäre) Wirkungen ohne primäre Wirkungen nicht denkbar sind, d.h. dass sich alle langfristigen Wirkungen (z.B. kardiovaskuläre Endpunkte) auf im Kern primäre Effekte zurückführen lassen (müssen). Es ist wenig plausibel, dass eine Person, die nicht physisch oder psychisch auf einzelne Lärmereignisse in irgend einer Weise reagiert, langfristig lärmbedingte Krankheitsbilder entwickelt. Offen ist also nicht die Frage, ob am Anfang der Verursachungskette einzelne Lärmereignisse stehen, sondern mit welchen Zwischenschritten solche auf lange Sicht zu erhöhten Gesundheitsrisiken beitragen. Z.B. ist es zurzeit ungeklärt, ob allein Aufwachreaktionen, damit verbunden fragmentierter Schlaf, kardiovaskuläre Arousal, lärmbedingte Schlafdefizite, oder weitere direkte oder indirekte Reaktionen, ggf. in Zusammenhang mit situativen oder individuellen Moderatoren für die Entwicklung langfristiger gesundheitlicher Beeinträchtigungen verantwortlich sind. Z.B. ist denkbar, dass nicht das Aufwachen allein, sondern auch die damit verbundene Belästigungsreaktion, der Ärger über den Flughafen, das Misstrauen gegenüber den für Lärmschutz Verantwortlichen, der mit der Erwartung schlechten Schlafs verbundene Schlafmittel- oder Alkoholkonsum vor dem Zubettgehen, die gezielte Vermeidung, vor dem letzten Flieger schlafen zu gehen (ggf. mit der Folge chronischen Schlafdefizits), und/oder das Schließen der Schlafzimmerfenster mit der Folge schlechter Raumluftqualität usw. - als wichtige Zwischenglieder langfristiger Gesundheitseffekte angesehen werden müssen. Es ist durchaus möglich, dass z.B. die Häufigkeit von gesundheitsabträglichen Bewältigungsstrategien mit der Zunahme der Belastung ebenfalls zunehmen, was die in epidemiologischen Studien gezeigten Erhöhungen von Krankheitsrisiken mit zunehmendem Pegel auch dann erklären würde, wenn man über diese Zwischenglieder keinerlei Kenntnis hat. Vor dem Hintergrund des allgemeinen Stressmodells ist deshalb der Schluss zulässig, dass lärmbedingte akute Beeinträchtigungen des Nachtschlafs auf Dauer zu Entstehung und Ausmaß von Krankheiten beitragen. Man wird künftig in der Forschung versuchen müssen, die Wirkungen direkter und indirekter Vorläufer sowie protektiver und gesundheitsschädigender Verhaltensweisen bei der Beschreibung der Kausalkette einzeln zu identifizieren.

Die Festsetzung von Lärmgrenzwerten und Flugbetriebsbeschränkungen ist nicht Aufgabe der Wissenschaft, sondern der Politik, die verschiedene Interessen abzuwägen hat. Ziel dieses Textes war es deshalb nicht, entsprechende Vorschläge zu erarbeiten. Der Wissenschaft kommt in dieser Beziehung aber eine beratende Funktion zu. Sie kann durch entsprechende Studien den Zusammenhang zwischen (nächtlicher) Fluglärmbelastung und verschiedenen gesundheitlichen Wirkungen (nächtliches Erwachen, Tagesmüdigkeit, Bluthochdruck) beschreiben und damit eine objektive Grundlage für die politische Diskussion schaffen. Aber selbst wenn die von der Wissenschaft erarbeiteten Grundlagen nicht immer als ausreichender Beleg für einen kausalen Zusammenhang zwischen Belastung und unerwünschter Wirkung angesehen werden können, muss dies nicht bedeuten, dass präventives Handeln bis zur Klärung noch ungelöster Fragen aufgeschoben werden sollte.

Wir möchten an dieser Stelle auf die bereits erwähnten "Night Noise Guidelines for Europe" (WHO, 2009) hinweisen. In dieser Richtlinie haben sich zahlreiche auf ihren Gebieten anerkannte Lärmwirkungsforscher auf eine auf dem L_{Night} (nächtlicher Dauerschallpegel) basierende Einteilung der Gesundheitsrisiken in vier Bereiche geeinigt (s. Tabelle 4):

Tabelle 4: Night Noise Guidelines for Europe (NNG)

$L_{\text{night,außen}}$ Bereich	Gesundheitswirkung
< 30 dB(A)	Keine wesentlichen biologischen Effekte.
30 - 40 dB(A)	Moderate Effekte werden beobachtet (Körperbewegungen, Aufwachreaktionen, bewusste Schlafstörungen, Arousals). Empfindliche Gruppen sind stärker betroffen.
40 - 55 dB(A)	Ungünstige Gesundheitseffekte werden messbar in Populationen. Empfindliche Gruppen sind jetzt erheblicher betroffen.
> 55 dB(A)	Die Situation ist zunehmend als gefährlich für die Gesundheit einzustufen. Ein großer Teil der Bevölkerung ist stark belästigt (highly annoyed). Das Risiko für Herz-Kreislauferkrankungen ist erhöht.

Die "Night Noise Guidelines" nehmen eine Dämmung von 21 dB für innen und außen gemessene Lärmpegel bei *geschlossenen* Fenstern an.

Die WHO selbst fasst $L_{\text{Night}}=55$ dB(A) als ein Interimsziel auf, d.h. möglichst viele momentan mit Pegeln über 55 dB(A) Belastete sollen schnellstmöglich von Lärminderungsmaßnahmen profitieren. Mittelfristig gibt die WHO ein Ziel von $L_{\text{Night}}=40$ dB(A) an. Basner et al. (2010) konnten zeigen, dass die vier Belastungs- bzw. Wirkungsbereiche recht gut mit in Fluglärmfeldstudien beobachteten Schlafstörungen übereinstimmen. Die Vorhersage von Schlafstörungen würde jedoch deutlich verbessert, wenn zusätzlich zum L_{Night} die Anzahl der den L_{Night} verursachenden Fluggeräusche mit in die Bewertung aufgenommen würde.

4 Zusammenfassung

Dieser Text beschreibt die gesundheitlichen Auswirkungen nächtlichen Fluglärms nach dem Stand der Jahresmitte 2012. Dabei werden im ersten Kapitel zunächst die Recherche-Methoden und die Art der narrativ-qualitativen Metanalyse dargestellt, gefolgt von einer Einführung in die Themen „gesundheitliche Bedeutung des Schlafs“ und „akustische Charakterisierung des Fluglärms“. Hinsichtlich der Recherche-Methoden soll hier wiederholt werden, dass die Analyse der gesundheitlichen Auswirkungen nur an Hand von Originalarbeiten geschieht, die in wissenschaftlichen Fachzeitschriften mit peer-Review in den Jahren 1990-2012 erschienen sind – teilweise ergänzt durch wissenschaftliche Berichte, die in direktem Zusammenhang mit diesen Veröffentlichungen stehen. Hinsichtlich des ersten Themas wird deutlich, dass der Nachtschlaf vor allem der Erholung von den Belastungen des vorangegangenen Tages sowie der Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit für den nächsten Tag dient. Ungestörter Schlaf von ausreichender Dauer ist unerlässlich für den Erhalt der Leistungsfähigkeit und Gesundheit. Dies steht im Einklang mit dem in der Lärmwirkungsforschung üblichen Stress-Modell,

das gesundheitliche Beeinträchtigungen vor allem dann vorhersagt, wenn der Körper sich dauerhaft nicht ausreichend von akuten Überlastungen erholen kann. Hinsichtlich der akustischen Charakterisierung von Fluglärm als Parameter für das Ausmaß der nächtlichen Lärmbelastung wird deutlich, dass der in unseren gesetzlichen Regelungen verankerte energie-äquivalente Dauerschallpegel (Leq bzw. Lnight) allein keine ausreichende Handhabe bietet, um (insbesondere akute) Wirkungen des Nachtfluglärms zu reflektieren. Kriterien, die auf Maximalpegeln und Häufigkeitsangaben beruhen, oder bei denen die Bewertung des Dauerschallpegels in Abhängigkeit von der Anzahl der Fluggeräusche vorgenommen wird, erscheinen hier überlegen.

In Kapitel 2 wird die aktuelle Wirkungsliteratur auf drei Ebenen dargestellt: auf der Ebene der unmittelbaren (akuten) Wirkungen von Fluglärm auf den Schlaf, auf der Ebene der langfristigen Wirkungen auf die körperliche Gesundheit, und – relativ kurz – auf der Ebene von Belästigungsangaben der Lärmbetroffenen.

1. Auf der Ebene der akuten Wirkungen besteht nach zahlreichen Labor- und Feldstudien kein Zweifel, dass Fluglärm den Schlaf stört und in Abhängigkeit von Anzahl und Lautstärke der Fluggeräusche zu Veränderungen der Schlafstruktur führt. Haupt-Endpunkt der aktuellen Untersuchungen ist die physiologische Aufwachreaktion, die in der Regel nicht bewusst wird, aber dennoch mit Leistungseinbußen am Folgetag verknüpft ist. Die Aufwachwahrscheinlichkeit ist signifikant sowohl mit dem Maximalpegel des Einzelschall-Ereignisses als auch mit dessen Häufigkeit verbunden. Eine – wenn auch geringe – Erhöhung der Aufwachwahrscheinlichkeit ist bereits ab Maximalpegeln von 33 dB zu beobachten, also nur wenige Dezibel über dem Hintergrundpegel am Ohr der Schläfer. Insgesamt werden die stärksten Effekte von Lärmereignissen auf den Schlaf in den frühen Morgenstunden registriert. Bei den Betroffenen des Nachtfluglärms sind zwar in gewissem Ausmaß Gewöhnungseffekte zu beobachten, jedoch sind diese nicht vollständig, und es ist sehr wahrscheinlich, dass das Ausmaß der Aufwachreaktionen langfristig mit körperlichen Erkrankungen statistisch assoziiert ist.

2. Auf der Ebene der langfristigen Wirkungen von Nachtfluglärm auf die körperliche Gesundheit wurden Felduntersuchungen an Erwachsenen und Kindern herangezogen, und zwar hinsichtlich der Endpunkte "Kardiovaskuläre Effekte", "Medikamentengebrauch", und "Endokrine Biomarker". Dabei konnte selten zwischen der Tages- und der Nachtbelastung unterschieden werden.

a. Ein erhöhtes Risiko durch die Belastung durch Tages- und/oder Nachtfluglärm kann nach gegenwärtigem Stand des Wissens bei zwei kardiovaskulären Krankheitsbildern als ausreichend gesichert angesehen werden: Bei ischämischen Herzkrankheiten und bei Bluthochdruck, wobei signifikante Risikoerhöhungen ab ca. 60 dB Mittelungspegel (Lden oder LAeq,24h) auftreten. Teilweise werden auch signifikante Risikoerhöhungen ab 50 dB Lden berichtet, insbesondere bei Personen, die länger als 15 Jahre am selben Ort wohnen.

b. Hinsichtlich der Einnahme von Medikamenten gibt es bisher eher inkonsistente Aussagen zwischen Ergebnissen aus unterschiedlichen europäischen Staaten, jedoch wird in der Literatur über signifikante Zusammenhänge zwischen der spät-abendlichen bzw. nächtlichen Fluglärmbelastung und der Einnahme von Beruhigungsmitteln (in mehreren Staaten) und blutdrucksenkenden Mitteln (in Deutschland, Niederlande, Großbritannien) berichtet.

c. Hinsichtlich der endokrinen Biomarker wurde eine einzige Feldstudie gefunden, die jedoch in 6 europäischen Ländern stattfand. Die Autoren beobachteten eine signifikante Erhöhung des freien

Cortisolspiegels in der Morgenprobe des Speichels bei Frauen mit einer Fluglärmbelastung von >60 dB ($L_{Aeq,24h}$) im Vergleich zu einer weniger belasteten Gruppe (≤ 50 dB); bei Männern war dieser Effekt statistisch nicht signifikant. Die Autoren schlussfolgern, dass die fluglärminduzierte erhöhte Cortisolkonzentration bei Frauen potentiell für die Genese kardiovaskulärer Effekte bedeutsam sein könnte.

3. Auf der Ebene der in systematischen Bevölkerungsuntersuchungen erhobenen Belästigung der Fluglärm-betroffenen wurde in zwei unabhängigen Felduntersuchungen an den Flughäfen Frankfurt/Main und Zürich festgestellt, dass die durchschnittlichen Belästigungswerte am späten Abend und am frühen Morgen deutlich höher sind als bei vergleichbarer Schallbelastung am Tage.

Einflüsse von Nachtfluglärm auf Kinder wurden bisher nicht explizit untersucht. Es gibt jedoch eine Reihe von Kinder-Untersuchungen, die die Tages- oder 24-Stunden-Fluglärmbelastung in Relation zu Einstellungen, kognitiven Leistungen und Blutdruck von Schulkindern stellen. Hier zeigte sich mehrfach, dass chronische Fluglärmbelastung mit geringerem Leseverständnis und schwächerem Langzeitgedächtnis verknüpft ist. Ein Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Blutdruck bei Kindern wurde bisher nur in den Niederlanden signifikant, aber viele Autoren halten dieses Ergebnis für wichtig genug, das Risiko des Fluglärms für die körperliche Gesundheit von Kindern im Auge zu behalten, insbesondere im Hinblick auf die notwendig längere Schlafdauer von Kindern, deren Verkürzung durch spätabendlichen und frühmorgendlichen Fluglärm als gesundheitliches Risiko bewertet wird.

Hinsichtlich der Wirkung von Fluglärm in den Tages- bzw. Nachtrandstunden gibt es noch keine speziellen Untersuchungen. Die Autoren dieses Textes legen jedoch dar, dass die verstärkte Nutzung eben dieser Stunden für die Gesundheit der Anwohnerinnen und Anwohner von Flughäfen Risiken birgt, die derzeit kaum kalkulierbar sind. Dies wird zum einen damit begründet, dass ein Grossteil unserer Bevölkerung zwischen 23 und 7 Uhr im Bett ist und durch Lärm im Schlaf gestört werden könnte, zum anderen damit, dass die frühen Morgen- und späten Abendstunden bei vergleichbaren Pegeln höhere Lärm-belastigungswerte aufweisen als die normalen Tagesstunden, und schließlich damit, dass insbesondere die frühen Morgenstunden empfindlicher gegenüber Störungen sind, weil im Fall des Aufwachens ein Wieder-Einschlafen erschwert wird.

In Kap. 1, 3 wird darauf hingewiesen, dass Expositions-Wirkungsbeziehungen in der Regel kontinuierlich verlaufende Kurven sind, aus denen sich „Schwellen“ für erhebliche Wirkungen nicht direkt ableiten lassen. Anders ausgedrückt: Wir haben es in der Regel mit kontinuierlich ansteigenden „Endpunkten“ bei kontinuierlich ansteigender Fluglärmbelastung zu tun. Wenn dennoch in der Literatur gelegentlich scheinbar exakte Werte angegeben werden, oberhalb deren die Gesundheitsgefährdung signifikant größer ist als unterhalb dieses Wertes, so muss berücksichtigt werden, dass diese „Schwelle“ direkt von der Wahl der Vergleichsgruppe abhängt, und dass die Wahrscheinlichkeit, einen signifikanten Unterschied herauszufinden, um so größer wird, je geringer die Vergleichsgruppe belastet ist. Im Fall des Fluglärms ist hier weiterhin zu berücksichtigen, dass die Beschreibung der Fluglärmbelastung mit Hilfe des Leq gerade im niedrigen Bereich (um 40 dB) mit großen Unsicherheiten (d.h. möglichen Fehlklassifikationen) verbunden ist. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass im Fall der gesundheitsrelevanten Wirkungen des Nachtfluglärms zwar Maximalpegel und deren Häufigkeiten in der Regel bessere Prädiktoren für akute Wirkungen im Vergleich zu Leq-basierten Belastungsbeschreibungen sind, aber bei den langfristigen Wirkungen beschränkt man sich auf den Leq, der wiederum zur Beschreibung der langfristigen Belastungen nur mit Hilfe sehr grober Annahmen (z.B. Kon-

stanz der Belastung über mehrere Jahre) berechnet werden kann. Diese Annahmen und die damit einhergehenden Unsicherheiten werden in vielen epidemiologischen Studien nicht diskutiert. Daraus ergibt sich insgesamt, dass keine exakten Pegelwerte auf Leq-Basis angegeben werden können, wohl aber Pegelbereiche, innerhalb deren Gesundheitsrisiken wahrscheinlich sind. Die Autoren dieses Textes weisen hierzu auf die Night Noise Guidelines (WHO, 2009) hin.

5 Literatur

- Amt für Gesundheit Frankfurt. (2008). Fluglärm und Gesundheit. Ergebnisse epidemiologischer Studien - Literaturübersicht.
- Aydin, Y., & Kaltenbach, M. (2007). Noise perception, heart rate and blood pressure in relation to aircraft noise in the vicinity of the Frankfurt airport. *Clin Res Cardiol*, 96(6), 347-358.
- Babisch, W. & van Kamp, I. (2009). Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. *Noise & Health*, 11, 161-168.
- Babisch, W. (2000). Traffic noise and cardiovascular disease: Epidemiological review and synthesis. *Noise & Health*, 2(8), 9-32.
- Babisch, W. (2006a). Transportation Noise and Cardiovascular Risk, from <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2997.pdf>
- Babisch, W. (2006b). Transportation Noise and Cardiovascular Risk: Updated Review and synthesis of epidemiological studies indicate that the evidence has increased. *Noise & Health*, 8, 1-29.
- Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Cadum, E., Katsouyanni, K., Velonakis, M., et al. (2009). Annoyance due to aircraft noise has increased over the years-Results of the HYENA study. *Environment International*, 35(8), 1169-1176.
- Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Cadum, E., Velonakis, M., Katsouyanni, K., et al. (2007). Associations between road traffic noise, aircraft noise and noise annoyance. Preliminary results of the HYENA study. Paper presented at the 19th International Congress on Acoustics ICA, Madrid.
- Banks, S. & Dinges, D. F. (2007). Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *J.Clin.Sleep Med.*, 3(5), 519-528.
- Basner, M. & Samel, A. (2004). Nocturnal Aircraft Noise Effects. *Noise & Health*, 6, 83-93.
- Basner, M. & Samel, A. (2005). Effects of nocturnal aircraft noise on sleep structure. *Somnologie*, 9(2), 84-95.
- Basner, M. & Samel, A. (2007). Schlafphysiologische Bewertung nächtlicher Flugbetriebsbeschränkungen vor dem Hintergrund aktueller Urteile des Bundesverwaltungsgerichts. *Lärmbekämpfung*, 2(3), 86-94.
- Basner, M. & Siebert, U. (2006). Markov-Prozesse zur Vorhersage fluglärmbedingter Schlafstörungen. *Somnologie*, 10(4), 176-191.
- Basner, M. & Siebert, U. (2010). Markov Processes for the Prediction of Aircraft Noise Effects on Sleep. *Medical Decision Making*, 30, 275-289.
- Basner, M. (2008). Nocturnal aircraft noise increases objectively assessed daytime sleepiness. *Somnologie*, 12(2), 110-117.
- Basner, M., Brink, M. & Elmenhorst, E. M. (2012). Critical appraisal of methods for the assessment of noise effects on sleep. *Noise & Health*, 14(61), 321-329.
- Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gehrich, A., Luks, N., Maaß, N., Mawet, L., Müller, E-W., Müller, U., Plath, G., Quehl, J., Rey, E. Samel, A. Schulze, M., Vejvoda, M. & Wenzel, J. (2004). *Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung*. Köln: DLR.
- Basner, M., Glatz, C., Griefahn, B., Penzel, T. & Samel, A. (2008). Aircraft noise: effects on macro- and micro-structure of sleep. *Sleep Med.*, 9(4), 382-387.
- Basner, M., Griefahn, B. & Van den Berg, M. (2010). Aircraft noise effects on sleep: mechanisms, mitigation and research needs. *Noise & Health*, 12(47), 95-109.
- Basner, M., Griefahn, B., Müller, U., Plath, G. & Samel, A. (2007). An ECG-based algorithm for the automatic identification of autonomic activations associated with cortical arousal. *Sleep*, 30(10), 1349-1361.
- Basner, M., Isermann, U. & Samel, A. (2005a). Die Ergebnisse der DLR-Studie und ihre Umsetzung in einer lärmmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 52, 109-123.

- Basner, M., Isermann, U. & Samel, A. (2005b). Lärmmedizinische Stellungnahme zum geplanten Aus- und Neubau des Flughafens Leipzig/Halle.
- Basner, M., Müller, U. & Elmenhorst, E. M. (2011). Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep*, 34(1), 11-23.
- Basner, M., Müller, U. & Griefahn, B. (2010). Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep. *Appl Acoustics*, 71(6), 518-522.
- Basner, M., Müller, U., Elmenhorst, E. M., Kluge, G. & Griefahn, B. (2008). Aircraft noise effects on sleep: a systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations. *Physiol.Meas.*, 29(9), 1089-1103.
- Basner, M., Samel, A. & Isermann, U. (2006). Aircraft noise effects on sleep: Application of the results of a large polysomnographic field study. *J.Acoust.Soc.Am.*, 119(5), 2772-2784.
- Basner, M., Van den Berg, M. & Griefahn, B. (2010). Aircraft noise effects on sleep: Mechanisms, mitigation and research needs. *Noise & Health*, 12(47), 95-109.
- Beihl, D. A., Liese, A. D. & Haffner, S. M. (2009). Sleep duration as a risk factor for incident type 2 diabetes in a multiethnic cohort. *Ann.Epidemiol.*, 19(5), 351-357.
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (1999). Guidelines for Community Noise (WHO Expert Task Force document). Geneva: World Health Organization.
- Besedovsky, L., Lange, T. & Born, J. (2011). Sleep and immune function. *Pflugers Arch.* doi: 10.1007/s00424-011-1044-0
- Björkman, M., Ahrlin, U. & Rylander, R. (1992). Aircraft noise annoyance and average versus maximum noise levels. *Arch Environ Health*, 47(5), 326-329.
- Blask, D. E. (2009). Melatonin, sleep disturbance and cancer risk. [Review]. *Sleep Medicine Reviews*, 13(4), 257-264. doi: 10.1016/j.smr.2008.07.007.
- BMU/UBA. (2010). Umweltbewusstsein in Deutschland 2010. Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsbefragung. Berlin: Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit. from www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4045.pdf
- Bonnet, M. H. & Arand, D. L. (2007). EEG arousal norms by age. *J.Clin.Sleep Med.*, 3(3), 271-274.
- Bonnet, M. H. (1985). Effect of sleep disruption on sleep, performance, and mood. *Sleep*, 8(1), 11-19.
- Bonnet, M. H. (1986). Performance and sleepiness as a function of frequency and placement of sleep disruption. *Psychophysiology*, 23(3), 263-271.
- Bonnet, M. H. (2000). Differentiating sleep continuity effects from sleep stage effects (Letter to the editor). *J.Sleep Res.*, 9(4), 403-404.
- Bonnet, M. H., Carley, D. W., Carskadon, M. A., Easton, P., Guilleminault, C., Harper, R., . . . Westbrook, P. R. (1992). EEG arousals: Scoring rules and examples. A preliminary report from the Sleep Disorders Atlas Task Force of the American Sleep Disorders Association. *Sleep*, 15(2), 173-184.
- Bonnet, M. H., Doghramji, K., Roehrs, T., Stepanski, E. J., Sheldon, S. H., Walters, A. S., . . . Chesson, A. L., Jr. (2007). The scoring of arousal in sleep: reliability, validity, and alternatives. *J Clin.Sleep Med.*, 3(2), 133-145.
- Brink, M. & Wunderli, J.-M. (2012). Response to "Comments on 'A field study of the exposure-annoyance relationship of military shooting noise' " [J. Acoust. Soc. Am. 127, 2301-22311 (2010)] (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(5), 3599-3600.
- Brink, M. (2012). A review of potential mechanisms in the genesis of long-term health effects due to noise-induced sleep disturbances. Paper presented at the Internoise 2012, New York.
- Brink, M., Basner, M., Schierz, C., Spreng, M., Scheuch, K., Bauer, G. & Stahel, W. (2009). Determining physiological reaction probabilities to noise events during sleep. *Somnologie*, 13(4), 236-243.
- Brink, M., Lercher, P., Eisenmann, A. & Schierz, C. (2008). Influence of slope of rise and event order of aircraft noise events on high resolution actimetry parameters. *Somnologie*, 12, 118-128.
- Brink, M., Müller, C. H. & Schierz, C. (2006). Contact-free measurement of heart rate, respiration rate, and body movements during sleep. *Behav.Res.Methods*, 38(3), 511-521.
- Brink, M., Schreckenberger, D., Thomann, G. & Basner, M. (2010). Aircraft Noise Indexes for Effect Oriented Noise Assessment. *Acta Acustica United with Acustica*, 96(6), 1012-1025. doi: Doi 10.3813/Aaa.918364

- Brink, M., Wirth, K., Rometsch, R. & Schierz, C. (2005). Lärmstudie 2000. Zusammenfassung. Teil 1: Die Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Flughafens Zürich (Bevölkerungsbefragungen der Jahre 2001 und 2003). Teil 2: Der Einfluss von abendlichem und morgendlichem Fluglärm auf Belästigung, Befindlichkeit und Schlafqualität von Flughafenanwohnern (Feldstudie). Zurich: ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften.
- Brink, M., Wirth, K., Rometsch, R. & Schierz, C. (2007). Lärmstudie 2000 - Der Einfluss von abendlichem und morgendlichem Fluglärm auf Belästigung, Befindlichkeit und Schlafqualität von Flughafenanwohnern (Schlussbericht zur Feldstudie), from <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:30137>
- Bullinger, M., Hygge, S., Evans, G. W., Meis, M., & von Mackensen, S. (1999). The psychological cost of aircraft noise for children. *Zentralbl Hyg Umweltmed*, 202(2-4), 127-138.
- Bundesamt für Umwelt. (2009). SonBase – die GIS-Lärmdatenbank der Schweiz Grundlagen., from www.umwelt-schweiz.ch/uw-0908-d
- Bütikofer, R. (2008). Aircraft Noise Calculations. Paper presented at the X3-Noise Workshop, Lausanne.
- Buxton, O. M., Cain, S. W., O'Connor, S. P., Porter, J. H., Duffy, J. F., Wang, W., . . . Shea, S. A. (2012a). Adverse metabolic consequences in humans of prolonged sleep restriction combined with circadian disruption. *Sci Transl Med*, 4(129), 129ra143. doi: 10.1126/scitranslmed.3003200
- Buxton, O. M., Ellenbogen, J. M., Wang, W., Carballeira, A., O'Connor, S., Cooper, D., . . . Solet, J. M. (2012b). Sleep Disruption Due to Hospital Noises: A Prospective Evaluation. *Ann Intern Med*. doi: 10.1059/0003-4819-156-12-201208070-00472
- Cappuccio, F. P., D'Elia, L., Strazzullo, P. & Miller, M. A. (2010). Sleep duration and all-cause mortality: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Sleep*, 33(5), 585-592.
- Carrington, M. J. & Trinder, J. (2008). Blood pressure and heart rate during continuous experimental sleep fragmentation in healthy adults. *Sleep*, 31(12), 1701-1712.
- Carskadon, M. A., Harvey, K., Duke, P., Anders, T. F., Litt, I. F. & Dement, W. C. (1980). Pubertal Changes in Day-time Sleepiness. *Sleep*, 2(4), 453-460.
- Clark, C., Martin, R., van Kempen, E., Alfred, T., Head, J., Davies, H. W., et al. (2006). Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension - The RANCH project. *American Journal of Epidemiology*, 163(1), 27-37.
- Dang-Vu, T. T., McKinney, S. M., Buxton, O. M., Solet, J. M. & Ellenbogen, J. M. (2010). Spontaneous brain rhythms predict sleep stability in the face of noise. *Current Biology*, 20(15), R626-R627.
- Diekelmann, S. & Born, J. (2010). The memory function of sleep. [Research Support, Non-U.S. Gov't Review]. *Nat Rev Neurosci*, 11(2), 114-126. doi: 10.1038/nrn2762.
- Eberhardt, J. L. (1990). The disturbance by road traffic noise of the sleep of prepubertal children as studied in the home. *Noise as a Public Health Problem*, 2(5), 65-74.
- Elmenhorst, E. M., Elmenhorst, D., Wenzel, J., Quehl, J., Mueller, U., Maass, H., . . . Basner, M. (2010). Effects of nocturnal aircraft noise on cognitive performance in the following morning: dose-response relationships in laboratory and field. *Int Arch Occup Environ Health*, 83(7), 743-751. doi: 10.1007/s00420-010-0515-5
- Elmenhorst, E. M., Pennig, S., Rolny, V., Quehl, J., Mueller, U., Maass, H. & Basner, M. (2012). Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance. *Sci Total Environ*, 424, 48-56.
- Empa. (2011). Vorlesungs-Skript Lärmbekämpfung. Dübendorf.
- Eriksson, C., Bluhm, G., Hilding, A., Ostenson, C. G., & Pershagen, G. (2010). Aircraft noise and incidence of hypertension--gender specific effects. *Environ Res*, 110(8), 764-772.
- Eriksson, C., Rosenlund, M., Pershagen, G., Hilding, A., Ostenson, C. G., & Bluhm, G. (2007). Aircraft noise and incidence of hypertension. *Epidemiology*, 18(6), 716-721.
- Evans, G. W., Bullinger, M., & Hygge, S. (1998). Chronic Noise Exposure and Physiological Response: A Prospective Study of Children Living under Environmental Stress. *Psychological Science*, 9(1), 75-77.
- Ferrie, J. E., Shipley, M. J., Akbaraly, T. N., Marmot, M. G., Kivimaki, M. & Singh-Manoux, A. (2011). Change in sleep duration and cognitive function: findings from the Whitehall II Study. [Research Support, N.I.H., Extramural Research Support, Non-U.S. Gov't Research Support, U.S. Gov't, P.H.S.]. *Sleep*, 34(5), 565-573.

- Fields, J. M., De Jong, R. G., Gjestland, T., Flindell, I. H., Job, R. F. S., Kurra, S., et al. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242(4), 641-679.
- Finke, H. O. (1980). Messung und Beurteilung der "Ruhigkeit" bei Geräuschmissionen. *Acustica*, 46, 141-148.
- Floud, S., Vigna-Taglianti, F., Hansell, A., Blangiardo, M., Houthuijs, D., Breugelmans, O., et al. (2010). Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: results of the HYENA study. *Occup Environ Med*, 68(7), 518-524.
- Franssen, E. A., van Wiechen, C. M., Nagelkerke, N. J., & Lebet, E. (2004). Aircraft noise around a large international airport and its impact on general health and medication use. *Occup Environ Med*, 61(5), 405-413.
- Fritschi, L., Brown, A. L., Kim, R., Schwela, D. H. & Kephelopoulos, S. (Eds.). (2011). Burden of disease from environmental noise. Bonn, Germany: World Health Organization (WHO).
- Gallicchio, L. & Kalesan, B. (2009). Sleep duration and mortality: a systematic review and meta-analysis. *J.Sleep Res.*, 18(2), 148-158.
- Goel, N., Rao, H., Durmer, J. S. & Dingus, D. F. (2009). Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Semin.Neurol.*, 29(4), 320-339.
- Goto, K., & Kaneko, T. (2002). Distribution of blood pressure data from people living near an airport. *Journal of Sound and Vibration*, 250(1), 145-149.
- Greiser, E., Greiser, C., & Janhsen, K. (2007). Night-time aircraft noise increases prevalence of prescriptions of antihypertensive and cardiovascular drugs irrespective of social class—the Cologne-Bonn Airport study. *Journal of Public Health*, 15(5), 327-337.
- Greiser, E., Janhsen, K., & Greiser, C. (2006). Beeinträchtigung durch Fluglärm: Arzneimittelverbrauch als Indikator für gesundheitliche Beeinträchtigung (No. 205 51 100 UBA-FB). Dessau: Umweltbundesamt.
- Griefahn, B. (1990). Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 37, 7-14.
- Griefahn, B., Bröde, P., Marks, A. & Basner, M. (2008). Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. *Sleep*, 31(4), 569-577.
- Guilleminault, C., Abad, V. C., Philip, P. & Stoohs, R. (2006). The effect of CNS activation versus EEG arousal during sleep on heart rate response and daytime tests. *Clin.Neurophysiol.*, 117(4), 731-739.
- Guski, R. (1991). Zum Anspruch auf Ruhe beim Wohnen. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 38, 61 -65.
- Guski, R. (1999). Fluglärm und die allgemeine Lärmschutzpolitik. In K. Oeser & J.-H. Beckers (Eds.), *Fluglärm 2000. 40 Jahre Fluglärmbekämpfung. Forderungen und Ausblick* (pp. 1-7). Düsseldorf: Springer VDI Verlag.
- Guski, R. (2003a). Neuer Fluglärm gleich alter Fluglärm? *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 50(1).
- Guski, R. (2003b). How to predict future annoyance in planning? In *Proceedings of the International Congress on Biological Effects of Noise ICBEN* (pp. 255-256). Rotterdam (NL): ICBEN 2003.
- Guski, R. (2004). How to forecast community annoyance in planning noisy facilities? *Noise & Health*, 6, 59-64.
- Haines, M. M., Brentnall, S. L., & Stansfeld, S. A. (2001). A qualitative study of aircraft noise annoyance in children: Theoretical implications, The Hague, NL.
- Haines, M. M., Stansfeld, S. A., Brentnall, S., Head, J., Berry, B., Jiggins, M., et al. (2001). The West London Schools Study: the effects of chronic aircraft noise exposure on child health. *Psychol Med*, 31(8), 1385-1396.
- Haines, M. M., Stansfeld, S. A., Job, R. F., Berglund, B., & Head, J. (2001). Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. *Psychol Med*, 31(2), 265-277.
- Haralabidis, A. S., Dimakopoulou, K., Vigna-Taglianti, F., Giampaolo, M., Borgini, A., Dudley, M. L., . . . Consortium, H. (2008). Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *European Heart Journal*, 29(5), 658-664.
- Health Council of the Netherlands. (2004). The Influence of night-time Noise on Sleep and Health (pub no. 2004/14E). The Hague: Health Council of the Netherlands.
- Hill, A. B. (1965). The Environment and Disease: Association or Causation? *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 58, 295-300.

- Hobson, J. A. (2005). Sleep is of the brain, by the brain and for the brain. [10.1038/nature04283]. *Nature*, 437(7063), 1254-1256.
- Horne, J. A., Pankhurst, F. L., Reyner, L. A., Hume, K. I. & Diamond, I. D. (1994). A field study of sleep disturbance: Effects of aircraft noise and other factors on 5,742 nights of actimetrically monitored sleep in a large subject sample. *Sleep*, 17, 146-159.
- Horne, J. A., Reyner, L. A., Pankhurst, F. L. & Hume, K. I. (1995). Patterns of spontaneous and evoked body movements during sleep. *Sleep*, 18(3), 209-211.
- Hume, K. I., Gregg, M., Thomas, C. & Terranova, D. (2003). Complaints caused by aircraft operations: an assessment of annoyance by noise level and time of day. *Journal of Air Transport Management*, 9, 153-160.
- Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., & Rösli, M. (2010). Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction. *Epidemiology*, 21(6), 829-836.
- Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., & Rösli, M. (2010). Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction. *Epidemiology*, 21(6), 829-836.
- Hygge, S., Evans, G. W., & Bullinger, M. (2002). A Prospective Study of Some Effects of Aircraft Noise on Cognitive Performance in Schoolchildren. *Psychological Science*, 13(5), 469-474.
- Iber, C., Ancoli-Israel, S., Chesson, A. & Quan, S. F. (2007). The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specifications. Westchester, Illinois: American Academy of Sleep Medicine.
- Iglowstein, I., Jenni, O. G., Molinari, L. & Largo, R. H. (2003). Sleep Duration From Infancy to Adolescence: Reference Values and Generational Trends *Pediatrics*, 111(2), 302-307.
- Isermann, U. & Schmid, R. (1999). Bewertung und Berechnung von Fluglärm. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, FE-Nr. L-2/96-50144/96. Göttingen: DLR.
- Janssen, S. A., Vos, H., Van Kempen, E., Breugelmans, O. & Miedema, H. M. E. (2011). Trends in aircraft noise annoyance: The role of study and sample characteristics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), 1953-1962.
- Jarup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadum, E., . . . Vigna-Taglianti, F. (2008). Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environ. Health Perspectives*, 116(3), 329-333.
- Jarup, L., Dudley, M. L., Babisch, W., Houthuijs, D., Swart, W., Pershagen, G., et al. (2005). Hypertension and exposure to noise near airports (HYENA): Study design and noise exposure assessment. *Environmental Health Perspectives*, 113(11), 1473-1478.
- Kastka, J. & Faust, M. (1998). Vorhersage von Belästigungsreaktionen auf Fluglärm durch Pegelüberschreitungshäufigkeitsmasse. Paper presented at the DAGA'98.
- King, C. R., Knutson, K. L., Rathouz, P. J., Sidney, S., Liu, K. & Lauderdale, D. S. (2008). Short sleep duration and incident coronary artery calcification. *JAMA*, 300(24), 2859-2866.
- Knipschild, P. (1977). Medical Effects of Aircraft Noise - Community Cardiovascular Survey .5. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 40(3), 185-190.
- Knipschild, P., Meijer, H., & Salle, H. (1981). Aircraft Noise and Birth-Weight. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 48(2), 131-136.
- Knutson, K. L. (2010). Sleep duration and cardiometabolic risk: a review of the epidemiologic evidence. [Review]. *Best Pract Res Clin Endocrinol Metab*, 24(5), 731-743. doi: 10.1016/j.beem.2010.07.001
- Kronholm, E., Laatikainen, T., Peltonen, M., Sippola, R. & Partonen, T. (2011). Self-reported sleep duration, all-cause mortality, cardiovascular mortality and morbidity in Finland. *Sleep Med*, 12(3), 215-221. doi: S1389-9457(11)00018-9 [pii] 10.1016/j.sleep.2010.07.021
- Kronholm, E., Sallinen, M., Suutama, T., Sulkava, R., Era, P. & Partonen, T. (2009). Self-reported sleep duration and cognitive functioning in the general population. [Article]. *Journal of Sleep Research*, 18(4), 436-446. doi: 10.1111/j.1365-2869.2009.00765.x
- Luyster, F. S., Strollo, P. J., Jr., Zee, P. C. & Walsh, J. K. (2012). Sleep: a health imperative. *Sleep*, 35(6), 727-734. doi: 10.5665/sleep.1846

- Lyttikainen, P., Rahkonen, O., Lahelma, E. & Lallukka, T. (2011). Association of sleep duration with weight and weight gain: a prospective follow-up study. *J Sleep Res*, 20(2), 298-302. doi: 10.1111/j.1365-2869.2010.00903.x
- Marks, A., Griefahn, B. & Basner, M. (2008). Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise. *Noise Control Engineering Journal*, 56(1), 52-62.
- Matsui, T., Uehara, T., Miyakita, T., Hiramatsu, K., Osada, Y., & Yamamoto, T. (2004). The Okinawa study: effects of chronic aircraft noise on blood pressure and some other physiological indices. *Journal of Sound and Vibration*, 277(3), 469-470.
- Meier, U. (2004). Das Schlafverhalten der deutschen Bevölkerung - eine repräsentative Studie. *Somnologie*, 8(3), 87-94.
- Meyer, A. (2011). Comment on "A field study of the exposure-annoyance relationship of military shooting noise" [*J. Acoust. Soc. Am.* 127, 230122311 (2010)] (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2), 677-678.
- Michaud, D. S., Fidell, S., Pearsons, K., Campbell, K. C. & Keith, S. E. (2007). Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(1), 32-41.
- Miedema, H. M. E. & Oudshoorn, C. G. (2001). Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure Metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*, 109, 409-416.
- Morrell, M. J., Finn, L., Kim, H., Peppard, P. E., Badr, M. S. & Young, T. (2000). Sleep fragmentation, awake blood pressure, and sleep-disordered breathing in a population-based study. *Am. J. Respir. Crit Care Med.*, 162(6), 2091-2096.
- Morrell, S. L., Taylor, R., & Lyle, D. (1997). A review of health effects of aircraft noise. *Aust N Z J Public Health*, 21(2), 221-236.
- Morrell, S. L. (2003). Aircraft Noise and Child Blood Pressure [Doctoral Thesis]. University of Sydney.
- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), 135-142.
- Ollerhead, J. B., Jones, C. J., Cadoux, R. E., Woodley, A., Atkinson, B. J., Horne, J. A., . . . McKean, J. (1992). Report of a Field Study of Aircraft Noise and Sleep Disturbance. London, United Kingdom: Department of Transport.
- Oswald, I., Taylor, A. M. & Treisman, M. (1960). Discriminative responses to stimulation during human sleep. *Brain*, 83, 440-453.
- Passchier-Vermeer, W., & Passchier, W. F. (2000). Noise exposure and public health. *Environmental Health Perspectives*, 108, 123-131.
- Passchier-Vermeer, W., Vos, H., Steenbekkers, J. H. M., Van der Ploeg, F. D. & Groothuis-Oudshoorn, K. (2002). Sleep disturbance and aircraft noise exposure - exposure effect relationships (pp. 1-245). Netherlands: TNO.
- Pearsons, K., Barber, D., Tabachnick, B. G. & Fidell, S. (1995). Predicting noise-induced sleep disturbance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(1), 331-338.
- Perron, S., Tetreault, L. F., King, N., Plante, C. & Smargiassi, A. (2012). Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults. *Noise Health*, 14(57), 58-67. doi: 10.4103/1463-1741.95133
- Raschke, F. & Fischer, J. (1997). "Arousal" in der Schlafmedizin. *Somnologie*, 2, 59-64.
- Rechtschaffen, A., Kales, A., Berger, R. J., Dement, W. C., Jacobsen, A., Johnson, L. C., . . . Walter, R. D. (1968). A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Washington, D.C.: Public Health Service, U.S. Government, Printing Office.
- Rhee, M. Y., Kim, H. Y., Roh, S. C., Kim, H. J., & Kwon, H. J. (2008). The effects of chronic exposure to aircraft noise on the prevalence of hypertension. *Hypertens Res*, 31(4), 641-647.
- Rosenlund, M., Berglund, N., Pershagen, G., Jarup, L., & Bluhm, G. (2001). Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise. *Occup Environ Med*, 58(12), 769-773.
- Sallinen, M. & Kecklund, G. (2010). Shift work, sleep, and sleepiness - differences between shift schedules and systems. [Review]. *Scandinavian Journal of Work Environment & Health*, 36(2), 121-133.

- Sayk, F., Becker, C., Teckentrup, C., Fehm, H. L., Struck, J., Wellhoener, J. P. & Dodt, C. (2007). To dip or not to dip: on the physiology of blood pressure decrease during nocturnal sleep in healthy humans. *Hypertension*, 49(5), 1070-1076.
- Schell, L. M. (1981). Environmental noise and human prenatal growth. *Am J Phys Anthropol*, 56(1), 63-70.
- Scheuch, K., Spreng, M. & Jansen, G. (2007a). Fluglärm-schutzkonzept der sogenannten Synopse auf dem Prüfstand neuer Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung sowie gesetzlicher Rahmenbedingungen (Teil 1). *Lärmbekämpfung*, 2(4), 135-143.
- Scheuch, K., Spreng, M. & Jansen, G. (2007b). Fluglärm-schutzkonzept der sogenannten Synopse auf dem Prüfstand neuer Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung sowie gesetzlicher Rahmenbedingungen (Teil 2). *Lärmbekämpfung*, 2(5), 187-193.
- Schreckenberg, D. & Meis, M. (2006). Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Frankfurter Flughafens [Endbericht; Langfassung], from http://www.dialogforum-flughafen.de/fileadmin/PDF/Presse/Belaestigungsstudie_Langfassung.pdf
- Schreckenberg, D., & Meis, M. (2007). Lärmbelastung und Lebensqualität der Bevölkerung am Frankfurter Flughafen. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 2(6), 225-235.
- Schreckenberg, D., Basner, M. & Thomann, G. (2009). Wirkungsbezogene Fluglärmindizes. *Lärmbekämpfung*, 4(2), 47-62.
- Schreckenberg, D., Eikmann, T., Guski, R., Klatte, M., Müller, U., Peschel, C., . . . Möhler, U. (2012). NORAH (Noise Related Annoyance, Cognition and Health) - Konzept einer Studie zur Wirkung von Verkehrslärm bei Anwohnern von Flughäfen. *Lärmbekämpfung*, 6(3), 107-114.
- Schweizerische Eidgenossenschaft. (1986). Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 (LSV) [SR 814.41] Retrieved 20 August 2008, 2008, from <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.41.de.pdf>
- Seegers, V., Petit, D., Falissard, B., Vitaro, F., Tremblay, R. E., Montplaisir, J. & Touchette, E. (2011). Short sleep duration and body mass index: a prospective longitudinal study in preadolescence. *Am J Epidemiol*, 173(6), 621-629. doi: kwq389 [pii] 10.1093/aje/kwq389
- Selander, J., Bluhm, G., Theorell, T., Pershagen, G., Babisch, W., Seiffert, I., et al. (2009). Saliva Cortisol and Exposure to Aircraft Noise in Six European Countries. *Environ Health Perspect*, 117(11), 1713-1717.
- Sforza, E., Chapotot, F., Lavoie, S., Roche, F., Pigeau, R. & Buguet, A. (2004). Heart rate activation during spontaneous arousals from sleep: effect of sleep deprivation. *Clin.Neurophysiol.*, 115(11), 2442-2451.
- Sforza, E., Jouny, C. & Ibanez, V. (2000). Cardiac activation during arousal in humans: further evidence for hierarchy in the arousal response. *Clin.Neurophysiol.*, 111(9), 1611-1619.
- Spiegel, K., Sheridan, J. F. & Van, C. E. (2002). Effect of sleep deprivation on response to immunization. *JAMA*, 288(12), 1471-1472.
- Spiegel, K., Tasali, E., Leproult, R. & Van, C. E. (2009). Effects of poor and short sleep on glucose metabolism and obesity risk. *Nat.Rev.Endocrinol.*, 5(5), 253-261.
- Stansfeld, S. A., Berglund, B., Clark, C., Lopez-Barrio, I., Fischer, P., Ohrstrom, E., et al. (2005). Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *Lancet*, 365(9475), 1942-1949.
- Stansfeld, S., Haines, M., & Brown, B. (2000). Noise and health in the urban environment. *Reviews on Environmental Health*, 15(1-2), 43-82.
- Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, 437(7063), 1272-1278.
- Thomann, G. (2007). Mess- und Berechnungsunsicherheit von Fluglärmbelastungen und ihre Konsequenzen. Dissertation, ETH, Zürich (CH). Retrieved from <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:29931/eth-29931-01.pdf>
- van Kempen, E., Van Kamp, I., Fischer, P., Davies, H., Houthuijs, D., Stellato, R., et al. (2006). Noise exposure and children's blood pressure and heart rate: the RANCH project. *Occupational and Environmental Medicine*, 63(9), 632-639.
- van Kempen, E., van Kamp, I., Lebrecht, E., Lammers, J., Emmen, H., & Stansfeld, S. (2010). Neurobehavioral effects of transportation noise in primary schoolchildren: a cross-sectional study. *Environ Health*, 9, 25.
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R. & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427(6972), 352-355.

- Walker, M. P. (2010). Sleep, memory and emotion. [Research Support, N.I.H., Extramural Research Support, Non-U.S. Gov't Review]. *Prog Brain Res*, 185, 49-68. doi: 10.1016/B978-0-444-53702-7.00004-X
- Watanabe, M., Kikuchi, H., Tanaka, K. & Takahashi, M. (2010). Association of short sleep duration with weight gain and obesity at 1-year follow-up: a large-scale prospective study. *Sleep*, 33(2), 161-167.
- Wesensten, N. J., Balkin, T. J. & Belenky, G. (1999). Does sleep fragmentation impact recuperation? A review and reanalysis. *J.Sleep Res.*, 8(4), 237-245.
- WHO (2009). Night noise guidelines for Europe. Copenhagen, Denmark: World Health Organisation.
- WHO (2011). Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, from <http://www.euro.who.int/en/what-we-publish/abstracts/burden-of-disease-from-environmental-noise.-quantification-of-healthy-life-years-lost-in-europe>
- Wilhelm, B., Giedke, H., Ludtke, H., Bittner, E., Hofmann, A. & Wilhelm, H. (2001). Daytime variations in central nervous system activation measured by a pupillographic sleepiness test. *J.Sleep Res.*, 10(1), 1-7.
- Wirth, K. (2004). Lärmstudie 2000. Die Belastungssituation im Umfeld des Flughafens Zürich. Aachen: Shaker Verlag.
- Wolfson, A. R. & Carskadon, M. A. (1998). Sleep Schedules and Daytime Functioning in Adolescents. *Child Development*, 69(4), 875-887.
- Yaggi, H. K., Araujo, A. B. & McKinlay, J. B. (2006). Sleep duration as a risk factor for the development of type 2 diabetes. *Diabetes Care*, 29(3), 657-661.