

## **Bewertung und Auswirkungen von unzumutbaren Belästigungen durch Fluglärm**

Im Auftrag von: **BMVIT - II/L1 (Luftfahrtrecht und Flugsicherung)**  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Erstellt von: Ao.Univ.Prof.Dr.Michael Kundi  
Dr.Thomas Haider  
DI.Dr.Hans-Peter Hutter  
Priv.Doz.Dr.Hanns Moshhammer  
Dr.Peter Wallner

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>BEWERTUNG UND AUSWIRKUNGEN VON UNZUMUTBAREN BELÄSTIGUNGEN DURCH FLUGLÄRM</b> .....	<b>1</b>
<b>1 AUFTRAGSERTEILUNG</b> .....	<b>4</b>
<b>2 EINLEITUNG</b> .....	<b>4</b>
<b>3 GRUNDLAGEN</b> .....	<b>4</b>
3.1 GRENZ- UND RICHTWERTE.....	4
3.2 GRUNDLAGEN DER RICHTWERTABLEITUNG.....	5
3.3 AUSGANGSPUNKT DER RICHTWERTABLEITUNG.....	6
3.4 DIE ABLEITUNG DES RICHTWERTES.....	8
3.5 GRUNDLEGENDE BEGRIFFE.....	10
3.5.1 Schadeffekte.....	10
3.5.2 Gesundheit.....	11
3.5.3 Gesundheitsschädigung, Gesundheitsgefährdung.....	12
3.5.4 Belästigung, Störung des Wohlbefindens, Beeinträchtigung des Wohlbefindens.....	13
3.5.5 Zumutbarkeit.....	14
3.5.6 Schall und Lärm.....	15
3.5.7 Schalldruck, Schall(druck)pegel.....	15
3.5.8 Bewertungskurven.....	16
3.5.9 Energieäquivalenter Dauerschallpegel.....	16
3.5.10 Statistische Schallpegel.....	16
3.5.10.1 Basispegel ( $L_{A,95}$ ).....	17
3.5.10.2 Mittlerer Spitzenpegel ( $L_{A,01}$ ).....	17
3.5.10.3 Maximaler Schallpegel ( $L_{A,max}$ ).....	17
3.5.10.4 Grundgeräuschpegel ( $L_{A,Gg}$ ).....	17
3.5.10.5 Tag-Abend-Nacht-Pegel ( $L_{den}$ ).....	17
3.5.10.6 Mittlere Ereignispegel ( $L_{E,eq}$ ).....	18
3.5.10.7 Angaben zur Anzeigedynamik: ‚slow‘ ( $L_S$ ), ‚fast‘ ( $L_F$ ) und ‚impulse‘ ( $L_I$ ).....	18
<b>4 ÜBERSICHT ÜBER DIE WISSENSCHAFTLICHE FAKTENLAGE</b> .....	<b>19</b>
4.1 BEEINTRÄCHTIGUNG DER MENSCHLICHEN GESUNDHEIT DURCH FLUGLÄRM.....	19
4.1.1 <i>Nachtschlaf</i> .....	19
4.1.1.1 Akute Reaktionen (objektive Parameter).....	19
4.1.1.2 EEG-Schlafuntersuchungen.....	20
4.1.1.3 Aufwachreaktionen mit der Drückermethode - Signalisiertes Aufwachen.....	22
4.1.1.4 Körperbewegungsmessungen (Aktimetrie).....	23
4.1.2 <i>Folgen schlafgestörter Nächte</i> .....	24
4.1.2.1 Subjektive Beurteilung der Schlafqualität.....	24
4.1.2.2 Leistungsfähigkeit nach der lärmgestörten Nacht.....	25
4.1.3 <i>Extraaurale Effekte</i> .....	26
4.1.3.1 Extraaurale Wirkungen – allgemeine Grundlagen.....	26
4.1.3.2 Physiologische Effekte.....	28
4.1.3.2.1 Akute kardiovaskuläre Reaktionen.....	31
4.1.3.2.2 Chronische Wirkungen.....	33
4.1.3.3 Kognitive Effekte.....	34
4.1.3.3.1 Studien zum Flughafen München.....	35
4.1.3.3.2 Studien zum Flughafen Heathrow (London).....	38
4.1.3.3.3 Die RANCH-Studie (London, Amsterdam und Madrid).....	42
4.1.3.3.4 Zusammenfassende Darstellung der großen Feldstudien.....	47
4.2 BEEINTRÄCHTIGUNGEN DES WOHLBEFINDENS UND BELÄSTIGUNGEN DURCH FLUGLÄRM.....	48
4.2.1 <i>Grundlagen</i> .....	48
4.2.2 <i>Belästigungshäufigkeit nach Lärmquellen</i> .....	49
4.2.3 <i>Intensität der Belästigung durch verschiedene Verkehrsträger</i> .....	50
4.2.4 <i>Wirkung von Lärm auf Kommunikation</i> .....	53
4.3 <b>PHYSIKALISCHE ASPEKTE</b> .....	54
4.3.1 <i>Innen- vs. Außenpegel</i> .....	54
4.3.2 <i>Effizienz von Lärminderungsmaßnahmen</i> .....	55

4.3.3	<i>Mittelungs- und Maximalpegel</i> .....	56
<b>5</b>	<b>GUTACHTEN</b> .....	<b>59</b>
5.1	ABLEITUNG VON IMMISSIONSSCHWELLENWERTEN AUF GRUNDLAGE DER WISSENSCHAFTLICHEN FAKTENLAGE, DIE EINE „UNZUMUTBARE BELÄSTIGUNG“ DER NACHBARN DURCH FLUGLÄRM FESTLEGEN .....	59
5.1.1	<i>Vorbemerkungen</i> .....	59
5.1.2	<i>Auswahl der Schlüsseluntersuchungen</i> .....	60
5.1.3	<i>Empfundene Belästigung</i> .....	61
5.1.4	<i>Beeinträchtigung kognitiver Funktionen bei Kindern</i> .....	65
5.1.5	<i>Auslösung akuter vegetativer Reaktionen und chronischer Störungen</i> .....	66
5.1.6	<i>Störung des Nachtschlafs</i> .....	69
5.1.7	<i>Zusammenfassung der Immissionsschwellenwerte</i> .....	72
5.2	DARSTELLUNG EINES WISSENSCHAFTLICH FUNDIERTEN IRRELEVANZWERTES (UNTERGRENZE FÜR DIE RELEVANZ EINER PEGELÄNDERUNG) .....	74
5.3	DARLEGUNG DER MÖGLICHEN AUSWIRKUNGEN EINER ÜBERSCHREITUNG DER SCHWELLENWERTE AUF DIE GESUNDHEIT DER NACHBARN UND MÖGLICHE VORBEUGENDE GEGENMAßNAHMEN (Z.B. BESTIMMTE WIRKSAME LÄRMSCHUTZMAßNAHMEN WIE INSBESONDERE LÄRMSCHUTZFENSTER IN SCHLAFRÄUMEN) .....	75
5.4	DARSTELLUNG DES PEGELUNTERSCHIEDES ZWISCHEN INNEN UND AUßEN (DÄMMWERT DES GEKIPPTEN FENSTERS) .....	77
5.5	AUSEINANDERSETZUNG MIT DEN GÄNGIGEN KRITIKPUNKTEN AN DEN VORHANDENEN ZUSAMMENFASSENDEN ANALYSEN UND EMPFEHLUNGEN .....	79
5.5.1	<i>„Fluglärmsynopse“ von Griefahn, Jansen, Scheuch und Spreng</i> .....	79
5.5.2	<i>WHO Night Noise Guidelines</i> .....	86
<b>6</b>	<b>VERWENDETE LITERATUR</b> .....	<b>87</b>

## 1 Auftragserteilung

Mit Vertrag vom 08.05.2009 zwischen dem Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (II/L1, Luftfahrtrecht und Flugsicherung) und der Medizinischen Universität Wien wurde das Institut für Umwelthygiene des Zentrums für Public Health beauftragt ein Gutachten zur „Bewertung und Auswirkungen von unzumutbaren Belästigungen durch Fluglärm“ zu erstellen. Dabei sollen folgende Punkte gutachterlich behandelt werden:

- Ableitung von Immissionsschwellenwerte auf Grundlage der wissenschaftlichen Faktenlage, die eine „unzumutbare Belästigung“ der Nachbarn durch Fluglärm festlegen
- Darstellung eines wissenschaftlich fundierten Irrelevanzwertes (Untergrenze für die Relevanz einer Pegeländerung)
- Darlegung der möglichen Auswirkungen einer Überschreitung der Schwellenwerte auf die Gesundheit der Nachbarn und mögliche vorbeugende Gegenmaßnahmen (z.B. bestimmte wirksame Lärmschutzmaßnahmen wie insbesondere Lärmschutzfenster in Schlafräumen)
- Darstellung des Pegelunterschiedes zwischen innen und außen (Dämmwert des gekippten Fensters).
- Auseinandersetzung mit den gängigen Kritikpunkten an den vorhandenen zusammenfassenden Analysen und Empfehlungen („Fluglärmsynopse“ von Griefahn, Jansen, Scheuch und Spreng sowie die WHO-Studie)

## 2 Einleitung

Das Gutachten gliedert sich in drei Teile. Der erste Teil behandelt grundlegende Fragen der Ableitung von Immissionsschwellenwerten („Richtwerten“) und definiert die wesentlichen Begriffe. Der zweite Teil besteht in einer kritischen Übersicht über die wissenschaftliche Faktenlage. Der dritte Teil beinhaltet das eigentliche Gutachten mit der Stellungnahme zu den in Kapitel 1 genannten Punkten.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Grenz- und Richtwerte

Es hat sich bewährt, bezüglich Immissionsschwellenwerte einen begrifflichen Unterschied zwischen Grenz- und Richtwerten zu machen. In diesem Dokument bezeichnen Richtwerte Expositionsgrenzen, die auf Basis wissenschaftlicher Untersuchungen und einer

Risikobeurteilung unter Berücksichtigung von Erkenntnislücken und Unsicherheiten in der Datenbasis abgeleitet wurden. Das Ziel von Richtwerten ist, unter Ausschöpfung der wissenschaftlichen Erkenntnisse eine möglichst hohe Sicherheit für die Gesundheit der Bevölkerung zu gewährleisten. Wenn es der Sachverhalt erlaubt, dann werden Richtwerte derart abgeleitet, dass auch bei lebenslanger Exposition unterhalb des Richtwerts beim gegenwärtigen Stand der Erkenntnis mit keinen gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu rechnen ist. In Fällen, bei denen keine Schwelle für die Beeinträchtigung der Gesundheit existiert (z.B. bei krebsauslösenden Einwirkungen), kann ein Richtwert nur bis zu einem gewissen Grad einen Schutz bieten.

Im Gegensatz zu Richtwerten bezeichnen in dieser Terminologie Grenzwerte gesetzlich bindende Expositionsgrenzen, die auf Basis eines gesellschaftlichen Konsenses, z.B. auf Grundlage einer Abwägung von Nutzen und Risiko, festgelegt wurden. Grenzwerte müssen demnach nicht notwendigerweise das gleiche Schutzniveau bieten wie Richtwerte. In manchen Fällen wird der Gesetzgeber Richtwerte zu verbindlichen Grenzwerten machen, in anderen Fällen wird er davon abweichen, etwa wenn deren Einhaltung mit sehr hohen Kosten verbunden ist, oder wenn ein Nutzen für die Allgemeinheit gefährdet würde. Grenzwerte können in diesen Fällen nicht wissenschaftlich, sondern nur politisch gerechtfertigt werden. Es ist einzig und allein eine gesellschaftspolitische Aufgabe, über die Verteilung von Kosten und Nutzen, von Risiken und Vorteilen zu entscheiden.

### **3.2 Grundlagen der Richtwertableitung**

Streng genommen erforderte die Ableitung eines Richtwerts die genaue Kenntnis sämtlicher mit der Exposition einhergehender Wirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden. Das schließt die Kenntnis aller Dosis-Wirkungsbeziehungen und insbesondere derjenigen zur sensitivsten Wirkung und die von Kombinationswirkungen ein. Darüber hinaus wäre eine detaillierte Kenntnis der Verteilung der Sensitivität gegenüber den diversen Wirkungen in der Population nötig, und es müsste der Wirkungsmechanismus entweder genau bekannt sein oder über die Existenz von Wirkungsschwellen Klarheit herrschen.

Im Allgemeinen ist der Stand der Kenntnisse weit geringer. Deshalb sind bis zu einem gewissen Grad Werturteile, die Verwendung außerwissenschaftlicher Begriffe (wie z.B. ausreichende Evidenz) und subjektive Entscheidungen (z.B. was die Berücksichtigung von Unsicherheiten anlangt) notwendig.

Der wissenschaftliche Charakter einer Richtwertableitung liegt in den folgenden Aspekten:

- Als Grundlage dient die wissenschaftliche Evidenz

- zu biologischen und gesundheitlichen Wirkungen und solchen auf das Wohlbefinden
- zur Sensitivität gegenüber der Exposition in der Population
- zu den Mechanismen der Wirkung der Exposition
- zur Verteilung und Intensität der Exposition in der Population
- Die Risikobeurteilung ist transparent
  - indem auf die Lücken der Erkenntnis hingewiesen wird
  - aufgezeigt wird, wo und auf welche Weise subjektive Entscheidungen und Beurteilungen einfließen
  - die Interpretation der wissenschaftliche Grundlagen nachvollziehbar dargestellt wird
- Die Ableitung erfolgt nach einem nachvollziehbaren Schema
  - indem die Gründe für die Wahl der Ableitungsgrundlagen aufgeführt werden
  - die einzelnen Schritte a priori festgelegt werden
  - das Ausmaß, in dem Unsicherheiten und Lücken in der Erkenntnis die Ableitung beeinflussen, dargelegt wird.

Es liegt aufgrund dieser dargestellten Grundlagen einer Richtwertableitung auf der Hand, dass verschiedene Autoren zu unterschiedlichen Werten kommen können. Diese Unterschiede beruhen hauptsächlich auf

- unterschiedlichen Bewertungen der Belastbarkeit der wissenschaftlichen Daten
- Unterschieden in der Beurteilung der Erkenntnislücken und Unsicherheiten
- Unterschieden in der Beurteilung der Verteilung der Empfindlichkeit der zu schützenden Population.

### **3.3 Ausgangspunkt der Richtwertableitung**

Die Grundlage der Risikobeurteilung und der Richtwertableitung bildet die Gesamtheit der wissenschaftlichen Fachliteratur, die zu der Exposition vorliegt. In den meisten Fällen wird man sich auf die sogenannte peer-reviewte Literatur beschränken. Das ist jener Teil der Fachliteratur, der vor Veröffentlichung einer Überprüfung durch Fachkollegen unterzogen wurde. Das garantiert einen gewissen Mindeststandard, kann aber eine kritische Würdigung in jedem einzelnen Fall nicht ersetzen. In bestimmten Fällen können auch Forschungsberichte und sogenannte graue Literatur einbezogen werden.

Es ist unzulässig bloß bestimmte einzelne Untersuchungen heranzuziehen und darauf die Ableitung zu gründen. Dennoch können Untersuchungen je nach deren Umfang oder Qualität eine geringere oder größere Rolle bei der Ableitung spielen. Diese Wertungen müssen jedoch transparent dargestellt werden.

Zunächst geht es um die Frage, inwiefern für den betrachteten Endpunkt eine Schwelle existiert oder nicht. Grundsätzlich ist eine Schwelle bei allen durch Schall direkt oder indirekt hervorgerufenen Wirkungen mindestens bei der Hörschwelle anzusetzen. Es liegt auf der Hand, dass diese absolute Schwelle nicht als Richtwert tauglich ist. Bei den Wirkungen von Schall muss man, wie wir in Kapitel 4.1.3 darstellen, zwischen auralen und extraauralen Wirkungen unterscheiden. Bei den auralen Wirkungen ist insbesondere die Hörschwellenverschiebung relevant. Die permanente Hörschwellenverschiebung infolge von Schalleinwirkung wird Lärmschwerhörigkeit genannt. Für diese Wirkung gibt es eine Schwelle im Bereich von 80 bis 85 dB bei 8-stündiger Einwirkung. Bei den extraauralen Wirkungen ist die Faktenlage komplizierter. Wir werden zeigen, dass es für Wirkungen, die für die Gesundheit in einem noch anzugebenden Sinn bedeutsam sind, eine Schwelle oberhalb der Hörschwelle gibt, während für Wirkungen auf das Wohlbefinden eine solche Schwelle streng genommen nicht angesetzt werden kann.

Bei der Betrachtung von Schallwirkungen ist neben der Schallintensität eine Reihe weiterer Parameter der Schallsituation und des Schalls selbst zu berücksichtigen. Diese zusätzlichen Eigenschaften des Schalls oder der Situation können für die Wirkung bedeutsamer sein als die Intensität.

Die Richtwertableitung beginnt mit den folgenden Überlegungen:

- Existiert eine Schwelle für die betrachteten Wirkungen?
- Welche der für die Gesundheit relevanten Wirkungen besitzt die niedrigste Schwelle?
- Wo liegt die Schwelle dieser Wirkung?

Es ist dabei von größter Bedeutung, dass wissenschaftliche Daten für die betrachtete Wirkung bis zu Intensitäten vorliegen, die gesundheitliche Beeinträchtigungen nahe legen. Dabei können solche Daten Surrogatmarker darstellen, wenn aus ethischen oder praktischen Gründen der eigentliche Endpunkt (die gesundheitliche Beeinträchtigung) nicht ermittelt werden kann. In vielen Fällen wird der Zusammenhang zwischen der Stärke der Einwirkung (z.B. dem Schallpegel) und der Wirkung monoton sein, d.h. dass das Ausmaß der Wirkung mit zunehmender Stärke der Einwirkung nicht abnimmt. In diesem Fall ist es prinzipiell möglich, eine Grenze anzugeben, die als niedrigstes Schadwirkungsniveau (LOAEL, lowest observed adverse effect level) bezeichnet wird. Die Existenz eines solchen

LOAEL wird vorausgesetzt, wenn die Daten weiter geprüft werden, ob sie belastbare Informationen über eine Expositionsstärke enthalten, bei der diese Schädigung nicht mehr beobachtet wird. Der höchste derartige Wert, bei dem noch keine Schädigung auftrat, wird als NOAEL (no observed adverse effect level) bezeichnet.

Die Ableitung des Richtwerts beruht auf diesem NOAEL. Dabei werden die Umstände, unter denen dieser NOAEL beobachtet wurde, so berücksichtigt, dass eine Verallgemeinerung auf die gesamte Population und insbesondere auf empfindliche Untergruppen möglich ist. Diese Verallgemeinerung macht es in der Regel erforderlich, dass ausgehend vom NOAEL Reduktionen vorgenommen werden, die diesen Umständen Rechnung tragen.

### **3.4 Die Ableitung des Richtwertes**

Die Untersuchungen, die als Grundlage für den NOAEL herangezogen werden, sind unter bestimmten Umständen durchgeführt worden, die in der Regel eine direkte Verallgemeinerung nicht erlauben. Dabei sind insbesondere folgende Aspekte zu beachten:

- Die Dauer und Verteilung der Exposition entspricht nicht den für den Richtwert relevanten Umständen
- Die untersuchten Personen sind nicht repräsentativ für das zu schützende empfindliche Populationssegment
- Es wurden nur kurzfristige Wirkungen untersucht, es soll aber vor chronischen Einwirkungen geschützt werden
- Es wurden Endpunkte herangezogen, die nicht die niedrigste Wirkungsschwelle besitzen
- Es fehlen Daten zu Wechselwirkungen mit anderen Belastungen oder andere für die Verallgemeinerung wichtige Informationen

Je nach wissenschaftlichem Kenntnisstand (insbesondere zum Wirkmechanismus und physiologischen Reaktionsmustern) werden die genannten Umstände zu einer mehr oder weniger starken Reduktion des Richtwertes führen. Bei der Ableitung von Richtwerten für die Exposition gegenüber Luftschadstoffen und potenziell toxischen Nahrungsmittelbestandteilen haben sich bestimmte Unsicherheitsfaktoren in Abwesenheit ausreichender Evidenz zu den genannten Punkten bewährt. So rechnet man z.B. bei kumulativen Wirkungen von Untersuchungen an Arbeitnehmern mit einer Exposition während einer 40-Stunden Woche auf die Allgemeinbevölkerung mit einer möglichen Exposition rund-um-die-Uhr mit einem Faktor  $168/40=4,2$  um (d.h. wenn bei einer Untersuchung mit einer Exposition über 40 Stunden pro Woche der NOAEL bei x liegt, dann dividiert man x durch 4,2, um den



NOAEL für eine Exposition ohne zeitliche Begrenzung zu erhalten). Fehlende Daten zur Verteilung der Empfindlichkeit werden gewöhnlich mit einem Unsicherheitsfaktor von 10 berücksichtigt (d.h. man geht davon aus, dass die empfindlichsten Personen bereits bei einem Zehntel der Exposition die Schadwirkung zeigen).

Obwohl die Vorgangsweise prinzipiell auf beliebige gesundheitsschädliche Einwirkungen übertragen werden kann, sind bei Schall nicht dieselben Faktoren anwendbar. Ein grundlegender Unterschied liegt darin, dass Schall nicht per se gesundheitsschädlich ist, sondern in Abhängigkeit von Qualität, Intensität, Tageszeit und anderen Umständen Schadwirkungen entfalten kann, ansonsten aber eine essentielle Rolle bei der Informationsaufnahme aus der Umwelt spielt. Während für die Aufnahme von Luftschadstoffen die Tageszeit nur insoweit eine Rolle spielt, als in der Nacht die Ventilationsrate geringer ist, was man durch die über 24 Stunden umgesetzte (aufgenommene und abgeatmete) Schadstoffmenge berücksichtigen kann, ist bei Schalleinwirkungen grundsätzlich je nach Tageszeit (und vorherrschender Aktivität, mit der die Schalleinwirkung interferieren kann) ein Unterschied zu machen. Für manche Endpunkte (z.B. Kommunikationsstörungen, Weckschwellen) ist die Verteilung in der Population, was die Auslösebedingungen anlangt, zumindest teilweise bekannt. Daher kann man die für die Variabilität innerhalb der Population (Intraspeziesvariation) relevanten Sicherheitsfaktoren anhand plausibler Annahmen bestimmen. Weiters muss man berücksichtigen, dass für manche Schallwirkungen die Schallintensität maßgeblich ist, die proportional dem Quadrat des Schalldruckes ist. Einer Verdopplung des Schalldruckes entspricht daher im Pegelmaß eine Zunahme um 6 dB. Es ist also stets zu untersuchen, auf welche physikalische Größe sich allfällige Unsicherheitsfaktoren beziehen müssen.

Eine andere Methode, die nicht nur die Schwelle für einen Schadeffekt, sondern die Gesamtheit der Daten zu einem bestimmten Endpunkt berücksichtigt, ist die sogenannte Benchmark-Dosis Methode. Es handelt sich im Wesentlichen um ein Regressionsverfahren, wobei die Intensität der Exposition als unabhängige Variable und die Intensität des Effektes als abhängige Variable betrachtet wird. Um diese Regressionsfunktion wird ein Konfidenzintervall (gewöhnlich mit 95% statistischer Sicherheit) ermittelt. Man bestimmt einen Cut-off für die Intensität der Wirkung, der als tolerabel angesehen wird. Die Benchmark-Dosis ist dann gleich der unteren Konfidenzgrenze der mit diesem Effekt verbundenen Intensität der Exposition.

### 3.5 Grundlegende Begriffe

#### 3.5.1 Schadefekte

Die Unterscheidung zwischen biologischen und Schadefekten (adversen Effekten) ist dann besonders schwierig, wenn der betrachtete Faktor für den Organismus essentiell ist oder – wie im Fall von Schalleinwirkungen – eine spezifische physiologische Reaktion, die für den Organismus bedeutsam ist, existiert. Jeder biologische Effekt kann einen Schadefekt darstellen, wenn bestimmte Voraussetzungen zutreffen. Dabei ist es wichtig hervorzuheben, dass der biologische Effekt allein in vielen Fällen nicht im Hinblick auf die Schädlichkeit für den Organismus beurteilt werden kann. Beispielsweise sind die Farbsinnveränderungen, die bei chronischer Exposition gegenüber bestimmten Lösungsmitteln beobachtet wurden, nicht als solche Schadefekte, weil sie im Alltag zu keinerlei Problemen führen. Sie zeigen aber an, dass irreversible neurotoxische Schäden auftreten, die sich bei einer komplexen Leistung des ZNS, wie sie das Farbsehen darstellt, aufdecken lassen. Es ist also oft nicht der biologische Effekt allein, sondern das, was er anzeigt, das es erlaubt, von einem Schadefekt zu sprechen. Daher lässt sich in vielen Fällen erst auf Basis eines Wirkmechanismus entscheiden, ob ein Schadefekt durch einen biologischen Effekt angezeigt wird oder nicht. In dieser Frage können also zwei Arten von Fehlern gemacht werden: Es kann ein beobachteter Effekt als bloß biologisch abgetan werden, obwohl er ein Indikator für eine Schädwirkung ist; und andererseits kann ein biologischer Effekt für einen Schadefekt gehalten werden, obwohl er nur anzeigt, dass der Organismus die Exposition „registriert“, aber ohne Schaden zu nehmen.

Schadefekte sind dadurch bestimmt, dass funktionelle Störungen oder pathologische Veränderungen auftreten, die die Leistungsfähigkeit des Gesamtorganismus beeinträchtigen oder seine Fähigkeit, andere Belastungen zu bewältigen, einschränken. Obwohl diese Definition allgemein anerkannt wird, gibt es in vielen Fällen erhebliche Kontroversen, was die Beurteilung von Effekten anlangt. Deshalb soll an dieser Stelle klar gelegt werden, wie wir bei der Beurteilung der Datenlage vorgegangen sind.

Liegen Daten zu pathologischen Veränderungen vor (z.B. ist das bei der in diesem Gutachten nicht behandelten Frage der Lärmschwerhörigkeit der Fall), so stellen diese schon von vornherein einen Schaden für die Gesundheit dar und können daher ohne weitere Erwägungen als Grundlage herangezogen werden.

Wenn der betrachtete Endpunkt die Leistungsfähigkeit des Organismus selbst ist (z.B. bei Untersuchungen zu kognitiven Leistungen von Schülern), dann handelt es sich definitionsgemäß um einen Schadefekt, und es geht dann nur um die Frage, wie belastbar die Untersuchungsergebnisse sind, um eine Richtwertableitung zu begründen. Grundsätzlich

dieselbe Vorgangsweise würde bei der Beobachtung einer eingeschränkten Belastungsbewältigung gelten.

Handelt es sich um Daten über funktionelle Störungen, dann wurde folgendermaßen verfahren:

Solche Befunde wurden bei der Ableitung nicht berücksichtigt, wenn sie nur in einer einzigen Untersuchung beobachtet wurden (z.B. Auswirkungen auf die Frühgeburtlichkeit). Grundsätzlich müssen solche Befunde, insbesondere dann, wenn sie auch aufgrund von Überlegungen zum Wirkmechanismus nicht gänzlich unplausibel erscheinen, in Empfehlungen zum Forschungsbedarf aufgeführt und können bei der Wahl der Unsicherheitsfaktoren berücksichtigt werden.

Wurde in mehreren Untersuchungen oder in einer Untersuchung an mehreren Standorten konsistent ein Zusammenhang zwischen Exposition und funktionellen Störungen beobachtet, die unter Berücksichtigung weiterer wissenschaftlicher Befunde in pathologischen Veränderungen resultieren, die Leistungsfähigkeit des Gesamtorganismus beeinträchtigen oder seine Fähigkeit, andere Belastungen zu bewältigen, einschränken können, dann wurde solchen Befunden ein höherer Stellenwert eingeräumt. Solche Daten können die Basis für die Richtwertableitung darstellen. Dies erfolgt allerdings unter Abwägung der Für und Wider hinsichtlich der Annahme, dass die funktionelle Störung einen Schadeffekt anzeigt.

Gibt es konsistente Daten zu pathologischen Veränderungen, dann stellen diese den klarsten Ausgangspunkt für Richtwertableitungen dar.

### **3.5.2 Gesundheit**

Die Problematik des Begriffs der Gesundheit liegt darin, dass er aufgefasst als Erfahrungsbegriff unmöglich empirisch synthetisch definiert werden kann, während er als gemachter Begriff im Spannungsfeld der Auseinandersetzung hinsichtlich Sinnhaftigkeit, Angemessenheit und Anerkennbarkeit im gesellschaftlichen und legitistischen Kontext steht. Die Definition der Gesundheit gemäß der Verfassung der Weltgesundheitsorganisation aus dem Jahre 1946: „Gesundheit ist ein Zustand vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur des Freiseins von Krankheit und Gebrechen“ ist wohl die am häufigsten zitierte und diskutierte Fassung des Begriffes. Sie ist als bloße Nominaldefinition anzusehen und ihr Zweck ist es, eine Zielvorstellung zu formulieren, ohne dass der Anspruch zu erheben ist, diese vollkommen umsetzen zu können. Sie identifiziert Gesundheit mit dem Optimum des Wohlbefindens und daher ist nach dieser Definition eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens bereits ein Verlust der Gesundheit.

Es kann hier nicht auf die umfassende Diskussion und Literatur zum Gesundheitsbegriff eingegangen werden. Gesundheit wird in diesem Gutachten als implizit definiert angesehen, wobei man als Zielvorstellung durchaus die WHO-Definition im Auge behalten kann.

### **3.5.3 Gesundheitsschädigung, Gesundheitsgefährdung**

Die folgenden Ausführungen orientieren sich an Haider et al. (1984). Diese definieren Gesundheitsschädigung und Gesundheitsgefährdung wie folgt:

Als **Gesundheitsschädigend** gilt eine Einwirkung (Immission), die Krankheitszustände, Organschäden oder pathologische organische bzw. funktionelle Veränderungen, die die situationsgemäße Variationsbreite von Körper- und Organformen bzw. -funktionen signifikant überschreiten, herbeigeführt hat, oder nach den Erfahrungen der medizinischen Wissenschaft mit hoher Wahrscheinlichkeit erwarten lässt.

Als **Gesundheitsgefährdung** gilt eine Einwirkung (Immission), durch die nach den Erfahrungen der medizinischen Wissenschaft die Möglichkeit besteht, dass Krankheitszustände, Organschäden oder unerwünschte organische oder funktionelle Veränderungen, die die situationsgemäße Variationsbreite von Körper- oder Organformen bzw. -funktionen signifikant überschreiten, entweder bei der Allgemeinbevölkerung oder auch nur bei bestimmten Bevölkerungsgruppen bzw. auch Einzelpersonen eintreten können.

Obwohl diese Definitionen bei umwelthygienischen Begutachtungen in Österreich verbreitet angewendet werden, lassen sie offensichtlich einen erheblichen Spielraum für die Zurechnung in einem konkreten Einzelfall oder in allgemeinen Erwägungen zu bestimmten Immissionen. Im Falle der Gesundheitsschädigung muss entweder im Einzelfall eine Kausalbeziehung zwischen der Immission und den Auswirkungen auf den Organismus hergestellt oder auf der Basis der medizinischen Evidenz eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen solchen Zusammenhang abgeleitet werden. Da grundsätzlich die Herstellung eines Kausalzusammenhangs im Einzelfall nicht ohne den Bezug auf die allgemeinen Erkenntnisse zu den Wirkungen der Immission möglich ist, ist die Unterscheidung der beiden Fälle für die Definition unerheblich. Es geht also darum, dass eine Schädigung der Gesundheit nur dann behauptet werden kann, wenn aufgrund der Evidenz eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass bei Einwirkung des Agens die Schädigung eintritt. Was aber bedeutet in diesem Zusammenhang ‚hohe Wahrscheinlichkeit‘? Es ist unbefriedigend, aber unvermeidbar, dass dies unbestimmt bleibt. Was als ausreichend hohe Wahrscheinlichkeit anzusehen ist, hängt unter anderem vom Ausmaß und der Art der Auswirkungen ab: Wenn irreversible Schädigungen auftreten können, die zu einer folgenschweren Behinderung führen, wird bereits eine geringere Wahrscheinlichkeit ausreichen, als bei einer Einwirkung, die mit einer die Lebensqualität kaum

beeinträchtigenden Funktionsveränderung verbunden ist. Der Sachverständige hat im Einzelfall die Evidenz so aufzuarbeiten, dass die Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts wenn schon nicht exakt quantifiziert, so doch in Stufen der Höhe nach eingeordnet werden kann.

Nach der Definition der Gesundheitsgefährdung reicht die Möglichkeit des Schadenseintritts aus. Und es ist auch nicht notwendig, dass dieser Schaden bei allen Personen gleichermaßen zu erwarten ist, sondern es reicht, wenn dies nur für empfindliche Personengruppen oder sogar nur für Einzelpersonen gilt. Es ist hervorzuheben, dass in dieser Definition die bloße Denkmöglichkeit des Schadenseintritts nicht ausreicht, sondern dass diese Möglichkeit aufgrund des Kenntnisstandes der medizinischen Wissenschaften abgeleitet werden muss. Inwiefern die Möglichkeit des Schadenseintritts bei einer Einzelperson aus den allgemeinen Erkenntnissen gefolgert werden kann, ist nur bei einem sehr weit entwickelten Kenntnisstand über die Ätiologie und Pathophysiologie der betrachteten Schädigung und der Dosis-Wirkungsbeziehung der Immission positiv zu beantworten. Im Allgemeinen wird man höchstens in der Lage sein, einige wenige Kriterien für eine erhöhte Empfindlichkeit anzugeben und daher nur bestimmte Bevölkerungssegmente mit erhöhter Empfindlichkeit hervorheben können.

#### **3.5.4 *Belästigung, Störung des Wohlbefindens, Beeinträchtigung des Wohlbefindens***

Damit eine Belästigung und dadurch eine Störung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens auftreten kann, ist die spezifische Wahrnehmung der Immission oder der durch sie ausgelösten körperlichen Reaktionen Voraussetzung. Während eine Schädigung oder Gefährdung der Gesundheit auch ohne jede Wahrnehmung einer Exposition auftreten kann (z.B. radioaktive Strahlung), ist die Vermittlung über die Wahrnehmung für die Belästigung und die dadurch ausgelöste Störung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens essentiell.

Jede Immission - vorausgesetzt, dass sie überhaupt wahrgenommen wird, d.h., dass sie im Falle der direkten Affektion eines Sinnesorgans die Wahrnehmungsschwelle überschreitet (z.B. bei Schall) oder indirekt wahrnehmbare körperliche Reaktionen auslöst (z.B. Aufstellen der Haare in einem elektrischen Feld) - kann vom gesunden, normal empfindenden Menschen als Belästigung empfunden werden und damit eine Störung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens bewirken.

Das Empfinden einer Belästigung ist inter- und intraindividuell sehr unterschiedlich. Die Wahrnehmung einer Immission an sich stellt noch keine Belästigung dar. Dass Belästigung eintritt, setzt die Bewertung der Immission, der Situation und/oder der eigenen Reaktion voraus. Zum Belästigungserleben kommt es insbesondere, wenn die Immission emotional

negativ bewertet wird. Auch Störungen höherer geistiger Funktionen und Leistungen - wie etwa der geistigen Arbeit, der Lern- und Konzentrationsfähigkeit, der Sprachkommunikation können zu den Beeinträchtigungen oder Störungen des Wohlbefindens gezählt werden.

Wenn solche Funktions- und Leistungsstörungen über einen längeren Zeitraum hinweg auftreten, dann können diese zu Gesundheitsgefährdungen oder -schädigungen werden.

### **3.5.5 Zumutbarkeit**

Es ist weder möglich noch wünschenswert, Maßnahmen gegen jedwede empfundene Störung zu ergreifen, weil im Prinzip jede wahrnehmbare Einwirkung für eine beliebige Person unter bestimmten Umständen eine Belästigung und Störung des Wohlbefindens darstellen kann. Daher muss eine Unterscheidung zwischen zumutbarer und unzumutbarer Belästigung getroffen werden. Hier ist nach der ständigen Rechtsprechung der gesunde, normal empfindende Erwachsene bzw. das gesunde, normal empfindende Kind zugrunde zu legen. Da dies eine wissenschaftlich nicht fassbare Bezugsgruppe darstellt, muss man sich mit pragmatischen Zugängen behelfen. Ein solcher kann z.B. darin bestehen, dass man Gruppen von Personen ohne offensichtliche Erkrankungen mit der Bewertungsaufgabe betraut (z.B. Panels von Geruchstestern).

Offen ist auch die Frage, wie viele der apostrophierten normal empfindenden Personen eine Belästigungsreaktion zeigen müssen, damit man von Unzumutbarkeit sprechen kann.

Gemäß Haider et al. (1984) ist eine Belästigung unzumutbar, wenn sie zu erheblichen Störungen des Wohlbefindens, zu psychosomatischen Beschwerden bzw. zu funktionellen oder organischen Veränderungen führen kann, oder über das ortsübliche Ausmaß hinausgeht, wobei in diesem Fall auch die für die Widmung von Liegenschaften maßgebenden Vorschriften zu berücksichtigen sind. Dabei ist zur Abgrenzung von Gesundheitsgefährdungen zu beachten, dass die funktionellen und organischen Veränderungen innerhalb der physiologischen Schwankungsbreite bleiben müssen.

Der Begriff der erheblichen Störung bleibt allgemein undefiniert und muss in jedem Einzelfall operationalisiert werden. Ebenso muss die Verbreitung, d.h. der Anteil der Bezugsgruppe, die eine erhebliche Störung aufweist, zahlenmäßig definiert werden.

Der Begriff der Ortsüblichkeit ist ebenfalls nicht unproblematisch, weil, was an einem bestimmten Einwirkungsort üblich ist, im Allgemeinen weder genau bekannt noch normativ festzulegen ist. Die Ortsüblichkeit ist aber nach den tatsächlichen Verhältnissen in der Umgebung zu beurteilen. Dabei muss sich diese nicht unbedingt auf eine gesamte politische Gemeinde beziehen. Es ist aber der typische Umkreis einer Gegend und nicht nur ein kleiner Bereich für die Zumutbarkeit von Immissionen entscheidend. Zu prüfen ist daher,

was dem Gebiet die örtliche Prägung gibt, dabei ist wie erwähnt die Widmung zu berücksichtigen (z.B. ein Erholungsheim).

### **3.5.6 Schall und Lärm**

Schwingungen eines elastischen Mediums im Hörbereich (16 Hz bis 20000 Hz) werden als Schall bezeichnet.

Nach der Richtlinie 6/18 des Österreichischen Arbeitsringes für Lärmbekämpfung (ÖAL) ist Lärm - im weitesten Sinn - unerwünschter Schall, der Menschen belästigen, ihre Gesundheit stören, gefährden oder schädigen kann. Insbesondere im Bereich extraauraler Auswirkungen versteht man unter Lärm auch die negativ gefärbte Erlebnisqualität, die durch bestimmte Schallimmissionen ausgelöst wird und die mit physiologischen und pathologischen Reaktionen einhergehen kann.

Lärm ist demgemäß nicht ohne Bezug auf die Wirkung von Schall definierbar. Entweder ist es die negative Bewertung im Sinne einer Belästigung oder die Gesundheitsschädigung oder –gefährdung, die Schall zu Lärm macht.

### **3.5.7 Schalldruck, Schall(druck)pegel**

Der adäquate Reiz für das menschliche Gehör sind Druckschwankungen des elastischen Mediums (gewöhnlich der Luft) innerhalb des Frequenzbereichs von 16 bis 20000 Hz, die eine bestimmte, von der Frequenz abhängige Schwelle überschreiten und dem statischen Luftdruck überlagert sind. Diese Druckschwankungen breiten sich mit einer für das Medium charakteristischen Geschwindigkeit (in Luft ca. 331 m/s bei 0 °C) aus. Die Schallstärke oder Schallintensität ist definiert als die Energie, die pro Zeiteinheit durch die Einheitsfläche hindurchtritt. Diese wird in W/m<sup>2</sup> angegeben und ist gegeben durch:

$$J = \frac{p^2}{2\rho c} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet p den Schalldruck (in N/m<sup>2</sup>=Pa), ρ die Dichte des Mediums (in kg/m<sup>3</sup>) und c die Schallgeschwindigkeit (in m/s). Der Schalldruck ist die auf die Einheitsfläche durch die schwingenden Luftteilchen ausgeübte Kraft.

Für Luftschwingungen liegt die Hörschwelle für eine Schwingung von 1000 Hz bei einem effektiven Schalldruck (p<sub>0</sub>) von 20 μPa. Der Hörbereich erstreckt sich über 6 bis 7 Zehnerpotenzen. Deshalb und wegen der angenähert logarithmischen Beziehung zwischen Empfindungsstärke und Schallintensität wird die Schallintensität im Pegelmaß angegeben. Dabei wird als Bezugsgröße die Schallintensität bei der Hörschwelle für 1000 Hz verwendet und der Schallpegel als Dezibel definiert:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{p}{p_0} [\text{dB}] \quad (2)$$

Daraus folgt, dass eine Verdopplung der Schallstärke zu einer Zunahme um etwa 3 dB, eine Halbierung zu einer Abnahme um 3 dB führt.

### **3.5.8 Bewertungskurven**

Da das menschliche Gehör eine sehr unterschiedliche Empfindlichkeit für die verschiedenen Frequenzen besitzt, muss dies bei der Charakterisierung der Schallimmission durch ein Pegelmaß berücksichtigt werden. Das geschieht durch näherungsweise Anpassung der Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke durch Bewertungskurven. Diese Bewertungskurven unterscheiden sich danach, in welchem Schallpegelbereich sie die Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke anpassen. Die A-Bewertungskurve ist besonders für niedrige bis mittlere Schallintensitäten geeignet. Wird bei der Messung oder Berechnung diese Bewertung vorgenommen, dann spricht man von A-bewertetem Schallpegel und gibt ihn als  $L_A$  an. Für Fluggeräusche wurde eine D-Bewertungskurve vorgeschlagen, die eine geringeren Dämpfung der niedrigen Frequenzen und bei Frequenzen über 1000 Hz eine bessere Anpassung an die Kurven gleicher Lautstärke bewirkt. Eine noch stärkere Aufwertung der tiefen Frequenzen wird mit der C-Bewertung erreicht, die deshalb zwar nicht die Hörempfindung aber die Belästigung besser anzeigt.

### **3.5.9 Energieäquivalenter Dauerschallpegel**

Da Schalleinwirkungen selten über die Zeit konstant sind, muss zur Charakterisierung einer Situation mit schwankendem Pegel eine Mittelung vorgenommen werden. Wird diese derart vorgenommen, dass ein Wert resultiert, der gleich dem ist, der ermittelt würde, wenn während der ganzen Zeit ein konstanter Schall mit gleicher Gesamtenergie eingewirkt hätte, dann spricht man von energieäquivalentem Dauerschallpegel (bezeichnet  $L_{eq}$ ). Wird dieser auf Basis einer A-Bewertung ermittelt, dann spricht man von A-bewertetem energieäquivalentem Dauerschallpegel (bezeichnet  $L_{Aeq}$ ).

### **3.5.10 Statistische Schallpegel**

Bei der Schallmessung wird die Häufigkeitsverteilung der während der Messzeit aufgetretenen Schallpegel ermittelt. Die Summenhäufigkeitsverteilung gibt an, in welchem Anteil der Zeit ein bestimmter Schallpegel überschritten wurde. Aus der Summenhäufigkeitsverteilung werden für die Beurteilung einer Schallimmission vor allem zwei Werte herangezogen: der Basispegel und der mittlere Spitzenpegel.



### 3.5.10.1 Basispegel ( $L_{A,95}$ )

Der Basispegel ist der in 95 % der Messzeit überschrittene A-bewertete Schallpegel. Er charakterisiert die niedrigsten aufgetretenen Schallpegel. Der Basispegel darf nicht mit dem Grundgeräuschpegel verwechselt werden, denn diese können, müssen aber nicht zusammenfallen.

### 3.5.10.2 Mittlerer Spitzenpegel ( $L_{A,01}$ )

Der mittlere Spitzenpegel ist der in 1 % der Messzeit überschrittene Schallpegel; er charakterisiert demnach die herausragenden Schallpegelspitzen.

### 3.5.10.3 Maximaler Schallpegel ( $L_{A,max}$ )

Der maximale Schallpegel ist der höchste, während der Messzeit aufgetretene Schallpegel.

### 3.5.10.4 Grundgeräuschpegel ( $L_{A,Gg}$ )

Nach der neuen ÖÄL Richtlinie 3/1 wird der Grundgeräuschpegel aus verschiedenen Gründen nicht mehr verwendet. Gemäß ÖNORM S 5004 ist der Grundgeräuschpegel "der geringste an einem Ort während eines bestimmten Zeitraumes gemessene A-bewertete Schalldruckpegel in dB, der durch entfernte Geräusche verursacht wird, und bei dessen Einwirkung Ruhe empfunden wird. Er ist der niedrigste Wert, auf welchen die Anzeige des Schallpegelmessers (Anzeigedynamik "schnell") wiederholt zurückfällt. Er kann nur ermittelt werden, wenn benachbarte Betriebe oder andere Schallquellen, die an der Erzeugung von deutlich erkennbaren Schallereignissen beteiligt sind, abgeschaltet werden können. Wenn eine Schallpegelhäufigkeitsverteilung vorliegt, ist der in 95 % des Meßzeitraumes überschrittene Schalldruckpegel, also der Basispegel, als Grundgeräuschpegel einzusetzen".

### 3.5.10.5 Tag-Abend-Nacht-Pegel ( $L_{den}$ )

Im Zusammenhang mit Verkehrslärm und insbesondere Fluglärm werden zur Charakterisierung der Exposition während unterschiedlicher Tageszeiten Dauerschallpegel für bestimmte Zeitabschnitte angegeben. Dabei werden gemäß der Direktive 2002/49/EC die folgenden Perioden unterschieden: Tagzeit 07.00 bis 19.00 Uhr, Abend 19.00 bis 23.00 Uhr und Nacht 23.00 bis 07.00 Uhr (diese Mittelungszeiten können aber in den einzelnen Ländern unterschiedlich gewählt werden, in Österreich wird derzeit die Nachtzeit mit 22.00 bis 06.00 festgelegt). Der  $L_{Aeq}$  für diese Perioden wird als  $L_{day}$ ,  $L_{evening}$  bzw.  $L_{night}$  bezeichnet. Bei einer summarischen Angabe über den gesamten Tag wird der  $L_{den}$  als gewichteter Summenpegel über diese Abschnitte ermittelt:

$$L_{den} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{24} \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \right] \quad (3)$$

Dies entspricht einer Gewichtung der Abendstunden mit Wurzel  $10 \approx 3,16$  und einer Gewichtung der Nachtstunden mit dem Faktor 10.

Besonders in den skandinavischen Ländern wird eine etwas andere Definition verwendet, mit den Abendstunden zwischen 19.00 und 22.00 und den Nachtstunden zwischen 22.00 und 07.00. Die Gewichtungsfaktoren für diese Zeiträume sind dabei 3 und 10.

Besonders in den USA wird auch ein Tag-Nacht Pegel  $L_{dn}$  verwendet, der wie der  $L_{den}$  die Nacht mit einem Faktor 10 bewertet. Der Unterschied liegt darin, dass der Tag mit 15 Stunden (07.00 bis 22.00) und die Nacht mit 9 Stunden eingeht. Der  $L_{den}$  ist im Durchschnitt wegen der stärkeren Bewertung der Abendstunden um ungefähr 0,6 dB höher als der  $L_{dn}$ .

### 3.5.10.6 Mittlere Ereignispegel ( $L_{E,eq}$ )

Bei Schallereignissen, die sich in charakteristischer Weise vom Hintergrund abheben und nur eine begrenzte Zeit einwirken, ist es sinnvoll und üblich einen Ereignispegel zu ermitteln. Es handelt sich dabei um das Integral über die Einwirkdauer des Schallereignisses im Pegelmaß. Der mittlere Ereignispegel  $L_{E,eq}$  ist der über die Ereigniszeit gemittelte äquivalente Dauerschallpegel. Wird z.B. eine A-Bewertung vorgenommen, dann wird dies durch den Buchstaben der Bewertungskurve angedeutet:  $L_{AE,eq}$ . Ist aus dem Zusammenhang klar, dass es sich um Ereignispegel handelt, dann wird oft auf diesen Zusatz verzichtet. Gelegentlich wird auch statt des Buchstaben E das Ereignis angegeben, z.B.  $L_{A,Überflug,eq}$

### 3.5.10.7 Angaben zur Anzeigedynamik: ‚slow‘ ( $L_S$ ), ‚fast‘ ( $L_F$ ) und ‚impulse‘ ( $L_I$ )

Bei der Messung von Flugereignissen und anderen Schallereignissen mit starken Pegelschwankungen kommt es darauf an, wie rasch die Messung (bzw. die Anzeige) den wechselnden Intensitäten folgt. Gewöhnlich wird mit der Dynamik ‚fast‘ gemessen, sodass diese Zusatzangabe in der Regel entfällt. Wird davon abweichend mit der Einstellung ‚slow‘ gemessen, dann wird dies durch den Zusatz ‚S‘ hervorgehoben, z.B.  $L_{AS,max}$  (A-bewerteter Maximalpegel mit der Einstellung ‚slow‘). In der Einstellung ‚slow‘ werden die Spitzenpegel aber auch die Minimalpegel innerhalb des Messzeitraums gedämpft, weil die Anzeige bzw. Messung der Schalldynamik nicht so rasch folgt. Es handelt sich beim  $L_{AS,max}$  also um eine Art Mittelung der höchsten Pegel. Bei ‚fast‘ und ‚slow‘ ist die Dynamik symmetrisch, während bei ‚impulse‘ die Messung dem Anstieg des Pegels sehr rasch, dem Abfall aber sehr langsam folgt.

## 4 Übersicht über die wissenschaftliche Faktenlage

### 4.1 Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch Fluglärm

#### 4.1.1 Nachtschlaf

Ausreichender Schlaf ist für die Aufrechterhaltung der körperlichen und psychischen Leistungsfähigkeit unentbehrlich. Obwohl trotz intensiver Forschung die Steuerung der Schlafarchitektur (d.i. der charakteristische in Schlafphasen geordnete Ablauf des Schlafes) nicht im Detail bekannt ist, geht man davon aus, dass sie zirkadiane und homöostatische Komponenten besitzt (Borbely 1982). Dauernder Schlafentzug ist mit dem Leben nicht vereinbar, aber über den tatsächlichen für die Gesundheit notwendigen Schlafbedarf besitzen wir nur unzureichende Kenntnis. Schlaf kann grundsätzlich auf verschiedene Weise vom gewohnten abweichen: er kann in der Länge verändert sein, der Eintritt des Schlafes ab dem Zeitpunkt des Zubettgehens kann verzögert sein (Einschlafstörung), er kann durch Aufwachen unterbrochen sein, wobei das Wiedereinschlafen leicht oder schwer sein kann (Durchschlafstörungen), es kann die Schlaftiefe und der Ablauf der Schlafphasen verändert sein. Störungen der Schlafarchitektur können auch darin bestehen, dass REM-Phasen in ihrer Dauer oder Verteilung verändert sind. Aus diesen Gründen ist der Begriff „Schlafstörung“ uneinheitlich und komplex. Entsprechend vielfältig sind auch die Methoden zur Messung von Schlafstörungen. Die Häufigkeit und das Ausmaß von Schlafstörungen werden von zahlreichen akustischen und nicht-akustischen Faktoren (situativen und individuellen) beeinflusst, die zu der relativ geringen Varianzaufklärung von etwa 20% der Schlafstörungsindikatoren auf Basis von Fluglärmpegeln beitragen (Michaud et al. 2008). Eine Quelle der Fehlervarianz liegt auch darin, dass die verwendeten Schallcharakteristika unzulänglich sind. Während die akuten Reaktionen mit dem Fluglärm in ursächlichem Zusammenhang stehen und diesem eindeutig zugeordnet werden können, ist bei den Folgereaktionen eine Zuordnung zu den Schallereignissen nur schwer möglich, da eine Reihe von qualitativ unterschiedlichen Stressoren sowohl einen Einfluss auf die über die gesamte Nacht erfassten Reaktionen als auch auf die subjektive Bewertung des Schlafes bzw. andere Folgeerscheinungen wie die Müdigkeit oder die Leistungsfähigkeit während des Tages haben.

##### 4.1.1.1 Akute Reaktionen (objektive Parameter)

Die Bandbreite der akuten Reaktionen auf Fluglärm erstrecken sich von bewussten Aufwachreaktionen, nicht erinnerbaren Schlafstadienveränderungen über Körperbewegungen bis zu Veränderungen von vegetativen Funktionen, wie Herzschlagfrequenz, Blutdruck und Ausscheidung von Stresshormonen (Kortisol, Adrenalin, Noradrenalin).

Als gemeinsame Ursache dieser vielfältigen Reaktionen sind zentralnervöse Aktivierungsprozesse (aufsteigendes retikuläres Aktivierungssystem und vegetatives Aktivierungssystem) zu sehen, welche als Folge der über das Hörorgan vermittelten Schallreize entstehen.

Die EEG-Veränderungen werden abhängig von der Dauer der Aktivierung in aufsteigender Folge in EEG-Arousal, Aufwachreaktion und erinnerbare Aufwachreaktion unterteilt.

Die Methode der Polysomnographie ist der Golden Standard der Schlafforschung. Damit können auch die kurzzeitigen EEG-Arousals detektiert werden (Bonnet et al. 2007, Iber et al. 2007), welche auch im engen Zusammenhang mit kurzzeitigen Aktivierungen des vegetativen Nervensystems (monophasische, prolongierte Herzfrequenzerhöhungen und Blutdruckerhöhungen) stehen (Basner et al. 2007b, Sforza et al. 2004). Insbesondere die monophasischen, prolongierten Herzfrequenzerhöhungen (ohne Gegenregulation) und Blutdruckerhöhungen sind von besonderer gesundheitlicher Relevanz, da sie auf Dauer zu Herzgefäßerkrankungen beitragen könnten (Babisch 2006).

Während EEG-Aktivierungen und vegetative Aktivierungen unmittelbar bei Einzelschallereignissen messbar sind, sind Aktivierungen des neuro-endokrinen Systems (Ausscheidung von Stresshormonen) aus ethischen und praktischen Gründen nur als kumulierte Reaktionen über bestimmte Zeiträume messbar.

Das Ausmaß der Reaktion wird im Wesentlichen durch den Maximalpegel im Innenraum und weniger durch den äquivalenten Dauerschallpegel bestimmt (Griefahn et al. 2006, Marks et al. 2008, Basner et al. 2007a, 2008).

### *4.1.1.2 EEG-Schlafuntersuchungen*

In Schlafstudien wird als aussagekräftigste Methode zur Beurteilung der Schlafqualität die Polysomnographie angewendet. Diese standardisierte Methode ermöglicht die gleichzeitige Aufzeichnung eines Hirnstrombildes (EEG), von Augenbewegungen (EOG) und Muskelspannungen (EMG) und ermöglicht damit eine valide und zuverlässige Quantifizierung des Schlaf- und des Wachzustandes sowie der Schlaftiefe.

Insgesamt gesehen decken EEG-Aufwachreaktionen eine Vielzahl von möglichen Schlafstörungsindikatoren ab und sind im Gegensatz zu anderen Erfassungsmethoden, wie Aktimetrie und Behavioral Confirmed Awakening, auch besser standardisiert (Brink et al. 2006). Als Nachteil ist die mögliche Beeinflussung des Schlafes durch die Elektroden sowie die notwendige höhere Fachexpertise für die Auswertung der Daten zu sehen. Darüber hinaus erfordert die Polysomnographie einen erheblichen Aufwand, sodass nur wenige mit dieser Methode durchgeführte Feldstudien bezüglich Fluglärm und Schlaf existieren. Diese

wurden überwiegend an kleinen Kollektiven mit einer geringen Anzahl an Probandennächten durchgeführt (Ehrenstein et al. 1982; Vallet et al. 1980) oder es wurden weniger aufwändige Schallmessungen vorgenommen. Nur Außenpegelmessungen wurden z.B. von Ollerhead et al. (1992) oder Hume et al. (2003) durchgeführt. Die Außenpegel sind aber kein zuverlässiger Indikator für die Pegel am Ohr des Schläfers (Fidell et al. 2000; Passchier-Vermeer et al. 2002; Basner et al. 2006).

Die bisher umfangreichste Studie wurde vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt im Zeitraum von 1999-2003 mit insgesamt 2.240 Probandennächten durchgeführt (DLR-Studie). Hierbei wurden neben Polysomnographie und biochemischen Messungen auch weitere physiologische Parameter wie EKG und Fingerpulsamplitude (vegetative Reaktionen) erfasst. Zusätzlich wurden auch die subjektive Einschätzung der Belastung und Belästigung erhoben und psychologische Leistungstests durchgeführt (Basner et al. 2004, 2005, 2006a,b; Quehl et al. 2005; Maaß et al. 2006).

In der DLR-Feldstudie in der Umgebung des Flughafens Köln-Bonn wurden 64 Personen im Alter von 19-61 Jahren in je 9 aufeinanderfolgenden Nächten (576 Personen-Nächte) untersucht. Alle nachgewiesenen Effekte waren unter Feldbedingungen erheblich geringer als unter Laborbedingungen, auch bei 20 Personen, die bereits bei der Laborstudie teilgenommen hatten. In der Feldstudie variierten die gemessenen Maximalpegel am Ohr des Schläfers zwischen 20-73 dB und als Schwelle zusätzlicher fluglärmbedingter EEG-Aufwachreaktionen ergab sich ein Maximalpegel innen von ca. 33 dB. Danach wurde ein monotoner aber mäßiger Anstieg der Aufwachwahrscheinlichkeit von etwa 2% pro 10 dB bis etwa 10% bei 73 dB ermittelt.

Die durchschnittliche Anzahl von spontanen, nicht durch Fluglärm induzierten EEG-Aufwachreaktionen pro Nacht war mit 24 relativ hoch. Andere Fluglärmstudien ermittelten 17 (Ollerhead et al. 1992) bzw. 10-12 (Passchier-Vermeer 2003) spontane EEG-Aufwachreaktionen. Die höhere Spontanrate in der DLR-Feldstudie ist größtenteils darauf zurückzuführen, dass in dieser Studie ein sensitiverer Ansatz gewählt wurde, indem als Indikator für eine Schlafstörung nicht nur ein Wechsel in das Wachstadium, sondern auch ein Schlafstufenwechsel in das oberflächliche Schlafstadium S1 miteinbezogen wurde. In der DLR-Feldstudie wurden mit drei Messgeräten die Schallpegel außen bzw. am Ohr des Schläfers (ereigniskorreliert) und die Hintergrundgeräusche separat gemessen. Dies ermöglichte eine genauere Zuordnung der Reaktionen zu den einzelnen Fluggeräuschen. Es wurden auch nur diejenigen Fluggeräusche in die Auswertung miteinbezogen, bei denen nicht gleichzeitig ein Hintergrundgeräusch auftrat, welches eine Aufwachreaktion unabhängig vom Fluggeräusch hätte hervorrufen können. Weiters wurden nur die zusätzlichen Aufwachreaktionen durch Fluggeräusche in die Auswertung miteinbezogen. Da

während einer fluggeräuschinduzierten Aufwachreaktion auch gleichzeitig eine Spontanreaktion hätte stattfinden können, würde es zu einer Überschätzung der fluglärmbedingten Aufwachreaktion kommen, wenn die innerhalb des betrachteten Zeitintervalls auch auftretenden Spontanreaktionen unberücksichtigt blieben. In der Folge würde es zu einer Überschätzung des durch Maßnahmen des Schutzes vor Fluglärm erzielbaren Effektes kommen. Die Vorgangsweise war dabei wie folgt: es wurde bei jedem Fluggeräusch in den jeweils anderen Nächten derselben Person zum gleichen Zeitpunkt nach Schlafbeginn überprüft, ob ein Fluggeräusch stattfand. Wenn in diesem spezifischen Zeitintervall kein Fluggeräusch auftrat, aber Spontanreaktionen registriert wurden, so wurden diese in Abzug gebracht ( $P_{\text{zusätzlich}} = P_{\text{induziert}} - P_{\text{spontan}}$ ).

Die DLR-Studie wurde unter besser kontrollierten Bedingungen durchgeführt und war umfangreicher im Vergleich zu älteren Feldstudien. Deshalb liefert sie eine validere Grundlage zur Ermittlung der Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen Maximalpegel und EEG-Aufwachreaktionen (Basner et al, 2004, 2005, 2006a).

### *4.1.1.3 Aufwachreaktionen mit der Drückermethode - Signalisiertes Aufwachen*

Bei der Drückermethode werden die Probanden angewiesen, bei jedem Erwachen eine Reaktionstaste zu betätigen (Behavioural Confirmed Awakening). Diese Drückermethode ermöglicht Untersuchungen an großen Personengruppen im Feld. In einer Metaanalyse von Feldstudien wurde eine Wirkungsschwelle für bewusstes, signalisiertes Aufwachen bei Maximalpegeln von 42 dB, danach ein monotoner, aber geringer Anstieg der Aufwachwahrscheinlichkeit bis zu Maximalpegeln von etwa 80 dB ermittelt (Passchier-Vermeer 2003). Dosis-Wirkungsbeziehungen früherer Metaanalysen, welche weitgehend dieselben Studien beinhalteten, erbrachten abweichende Werte (FICAN 1997; Finegold et al. 2002). Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass diese früheren Studien die Spontanreaktionen nicht miteinbezogen (Berglund et al. 2008).

In der Metaanalyse von Passchier-Vermeer (2003) wurde nach weitgehenden Anpassungen und Umrechnungen zur Vereinheitlichung der Daten zwar eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Aufwachreaktionen mit der Drückermethode im Vergleich zu jenen auf Basis der EEG-Aufwachreaktionen gefunden, allerdings geben die Autoren auch an, dass diese angepassten Dosis-Wirkungsbeziehungen nicht generell anwendbar sind (Passchier-Vermeer et al. 2003).

Die Drückermethode kann zu einer Unterschätzung der Aufwachreaktionen führen, weil nur jene Aufwachereignisse, die bewusst werden, ermittelt werden können, und andererseits kann es zu einer methodisch induzierten Störung des Schlafes kommen, weil das Drücken

der Taste die Wachdauer verlängert und das Wiedereinschlafen verzögern oder erschweren kann.

### 4.1.1.4 Körperbewegungsmessungen (Aktimetrie)

Wegen der einfachen Handhabung, der ökonomischeren Auswertung und der geringen Belastung der Probanden wurde die Methode der Aktimetrie bei Lärmwirkungsstudien im Feld häufig verwendet. Mit einem Beschleunigungsaufnehmer, meist in Form einer Armbanduhr werden die Körperbewegungen (Motilität) bei Überschreitung einer festgelegten Grenze registriert und aufgezeichnet.

Insgesamt zeigen die Dosis-Wirkungsbeziehungen der verschiedenen Feldstudien starke Abweichungen untereinander (Ollerhead et al. 1992; Fidell et al. 2000; Passchier-Vermeer et al. 2002), welche auf methodische Unterschiede in den Messungen bzw. den Analysen und auf verschiedenartige Definitionen von Körperbewegungen (motility, onset of motility) zurückzuführen sind (Michaud et al. 2007).

In einer Feldstudie an 418 Personen in der Umgebung des Flughafens Amsterdam Schiphol wurden die Körperbewegungen während 11 Nächten aufgezeichnet (4518 Personen-Nächte) und die Schallpegel im Innenraum gemessen. Es wurde eine Wirkungsschwelle für einen ereigniskorrelierten Anstieg der Körperbewegungen durch Fluglärm bei Maximalpegeln von 32 dB (Passchier-Vermeer et al. 2002) und ein mäßiger monotoner Anstieg der Bewegungswahrscheinlichkeit bis etwa 7% bei Maximalpegeln von 70 dB ermittelt. Im Vergleich zu den unmittelbaren Reaktionen auf Fluglärmereignisse wurden bei Betrachtung der durchschnittlichen Bewegungsreaktionen über die ganze Nacht höhere Bewegungswahrscheinlichkeiten beobachtet. Dies deutet auf eine Persistenz der Einzeleffekte hin.

Trotz verschiedener Endpunkte entspricht der ermittelte Schwellenwert, von etwa 32 dB, jenem der DLR-Studie (33 dB). Die Dosis-Wirkungskurve zeigt aber einen geringeren Anstieg.

Im Vergleich zu den Feldstudien mit der Drückermethode zeigt die Aktimetrie insgesamt eine höhere Sensitivität durch eine größere Reaktionswahrscheinlichkeit bei niederen Maximalpegeln.

In früheren Feldstudien in der Umgebung von US-amerikanischen Flughäfen an kleineren Kollektiven mit einer geringeren Anzahl an Personennächten wurden höhere Schwellenwerte für Bewegungsreaktionen ermittelt (Fidell et al. 2000). Bei einer Feldstudie an britischen Flughäfen wurde ebenfalls die Aktimetrie verwendet, wobei jedoch die

Schalldruckpegel nur außen und nicht im Schlafzimmer gemessen wurden (Ollerhead et al. 1992).

Die Methode der Aktimetrie hat im Vergleich zur Polysomnographie zwar eine relativ gute Sensitivität (>90%), aber eine niedrige Spezifität (Ancoli-Israel et al. 2003).

### **4.1.2 Folgen schlafgestörter Nächte**

Folgereaktionen umfassen alle Folgen der schlafgestörten Nächte, welche in der nachfolgenden Wachphase auftreten. Als Maß für die gesamte Schlafzeit werden Indikatoren wie die subjektive Beurteilung der Schlafqualität, das Befinden sowie die geistige und die psychomotorische Leistungsfähigkeit herangezogen.

#### *4.1.2.1 Subjektive Beurteilung der Schlafqualität*

In vielen Untersuchungen werden neben der Beeinflussung des Schlafes durch Lärm auch die empfundene Schlafqualität und die Eindrücke und Wahrnehmungen der Schläfer erfasst. Dazu werden unterschiedliche psychometrische Verfahren und Skalierungen eingesetzt.

Die subjektive Schlafqualität wird vor allem durch die Dauer, die Anzahl und den Verlauf der erinnerten Wachphasen bestimmt. Diese Einschätzung wird von zahlreichen persönlichen und situativen Faktoren beeinflusst und da die meiste Zeit des Schlafes in unbewusstem Zustand verbracht wird, ist kein klarer Zusammenhang zu objektiven Messungen der Schlafzeiten feststellbar (Silva et al. 2007).

Durch Zusammenfassung der Daten vieler Feldstudien aus verschiedenen Ländern wurde eine Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen der Fluglärmexposition  $L_{\text{night}}$  (23-7h) und den subjektiv angegebenen Schlafstörungen abgeleitet (Miedema et al. 2003, 2004, 2007). Bis zu einem  $L_{\text{night}}$  von 45 dB wurden - ohne eine darstellbare Schwelle - etwa 5% stark schlafgestörte Personen berechnet. Zwischen 45 dB und 65 dB stieg der Prozentsatz der Personen, die starke Schlafstörungen angaben, auf etwa 15% an. Die Studien zeigten, dass bei gleichen nächtlichen Dauerschallpegeln bei Fluglärm, im Vergleich zu Straßen- und Schienenlärm, ein größerer Prozentsatz an Personen Schlafstörungen angaben. Aufgrund der sehr starken individuellen Varianz und der auch sehr starken Abweichungen zwischen den einzelnen Studien ist diese Dosis-Wirkungsbeziehung nur als indikativ anzusehen.

In der DLR-Laborstudie „Leiser Flugverkehr II“ gab es bei Einzelexposition zwischen den drei untersuchten Verkehrsträgern (Flugverkehr, Straßenverkehr, Schienenverkehr) bei gleichen Maximalpegeln keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der subjektiven



Einschätzung der Schlafqualität (Basner et al. 2007), während im direkten Vergleich bei Mehrfachexposition der Flugverkehr die höchste Belästigung hervorrief.

In der DLR-Feldstudie konnten Dosis-Wirkungsbeziehungen des Anteils der durch Fluglärm mittel bis stark Belästigten sowohl für die Anzahl der Flugereignisse pro Nacht als auch für den nächtlichen Dauerschallpegel ermittelt werden. Der prozentuale Anteil der mittel- und stark-Belästigten zeigte einen monotonen Anstieg von etwa 10% bei einem  $L_{Aeq}$  -innen von 30 dB bis etwa 30% bei 47 dB (Quehl et al. 2005). Für die subjektive Einschätzung der Ermüdung, der Befindlichkeit und der Erholung bzw. Beanspruchung wurden für Fluglärm keine signifikanten Dosis-Wirkungsbeziehungen beobachtet.

### *4.1.2.2 Leistungsfähigkeit nach der lärmgestörten Nacht*

In Feldstudien ist die Zuordnung der Ergebnisse von kognitiven Leistungstests auf Lärmereignisse während der Nacht sehr schwierig, da zusätzlich zu den individuellen und situativen Einflussfaktoren während der aktuellen Testsituation am Tag ebenfalls Lärmeinwirkungen stattfinden können, die gelegentlich sogar stärker als jene in der Nacht sein können.

In der Feldstudie am Flughafen Schiphol ergaben Reaktionstests, welche aber nur abends durchgeführt wurden, keine Zusammenhänge mit dem vorangegangenen Schlaf (Passchier-Vermeer et al. 2002). Auch in der DLR Studie wurden nach durch Fluglärm gestörten Nächten keine signifikanten Effekte auf Leistungstests gefunden (Basner et al. 2004).

In diesen Studien wurden aber meist nur einfache Reaktionstests durchgeführt, die nur geringe Anforderungen an die kognitiven Funktionen stellen und daher wahrscheinlich nicht empfindlich genug sind, um mögliche Leistungsbeeinträchtigungen zu detektieren.

Neuere Laborstudien mit Tests auf spezielle, exekutive Funktionen (Aufgabenwechsel und Handlungsinhibition), welche mentale Prozesse höherer Ordnung darstellen und besonders empfindlich auf Schlafentzug und Schlafveränderungen reagieren (Jones et al. 2001), scheinen sensitiver bzgl. Fluglärmwirkungen zu sein als einfachere Reaktionstests (Schapkin et al. 2006). Bei der komplexen Go/NoGo-Aufgabe konnten zwar nach Lärmnächten keine signifikanten Leistungseinbußen nachgewiesen werden, dennoch wurden bei den aufgezeichneten ereigniskorrelierten Potenzialen Veränderungen sichtbar, die auf Beeinträchtigungen der Handlungsinhibition schließen lassen. Diese Ergebnisse sind aber noch nicht ausreichend, um Dosis-Wirkungs-Beziehungen oder Schwellen festlegen zu können.

### **4.1.3 Extraaurale Effekte**

#### *4.1.3.1 Extraaurale Wirkungen – allgemeine Grundlagen*

Im Unterschied zur Auswirkung von Luftschadstoffen auf den Menschen, welche sich in umwelttypischen Konzentrationsbereichen oft nicht akut äußern, und mit Ausnahme von Geruchsbelästigungen auch nicht unmittelbar als Missempfindung erlebt werden, kann die Einwirkung von Schallimmissionen, auch niedriger Pegel, subjektiv als Störung erlebt werden und zu Veränderungen im Organismus führen. Die besondere Problematik von Schalleinwirkungen ergibt sich schon aus den Charakteristika der Schallverarbeitung im Zentralnervensystem. Neben der Hörbahn mit ihren Projektionen in die primären akustischen Rindenfelder, die für die Wahrnehmung entscheidend sind, gibt es eine Reihe von Schaltungen, die einerseits (in den medialen Kniehöckern) für Reflexe auf akustische Reize verantwortlich sind und andererseits das Aktivierungs- und Hypothalamus-Hypophysen System beeinflussen können. Daraus kann man die Bedeutung des Hörsinns als Alarmsinn entnehmen. Durch entsprechende Schaltungen kann einerseits die Empfindlichkeit des Hörsinns moduliert, das Innenohr durch den akustischen Reflex geschützt und schließlich der Organismus vor Gefahren gewarnt werden. Letztere Funktion impliziert, dass das System nicht – wie der Gesichtssinn – während des Schlafs ausgeschaltet werden kann. Diese Alarmfunktion, die für eine rasche Reaktion des Organismus verantwortlich ist und auf einer Aktivierung des Sympathikus-Nebennierenmark Systems beruht, muss von Änderungen der Reaktionslage des Organismus unterschieden werden, die man in der Stressforschung als Reaktionen auf Territorialverlust kennt und die insbesondere durch Erhöhung von Kortisol charakterisiert sind.

Bei diesen so genannten extraauralen Lärmwirkungen sind neben diesen allgemeinen Stressreaktionen vor allem Störungen zentralnervöser Funktionen (z.B. Aufmerksamkeitsleistung) zu nennen. Als Folge der Aktivierung von Stressreaktionen können Verengungen der peripheren Blutgefäße, Herzfrequenzsteigerung und auch Auswirkungen auf den Blutdruck erwartet werden. Diese können nach chronischer Belastung bei zur Hypertonie disponierten Personen auch zu einer Verstärkung dieser Tendenz und damit zu einem erhöhten Risiko des Auftretens einer klinisch bedeutsamen Hypertonie führen. Weiters können sich eine Hemmung der Magen-Darm-Peristaltik und der Funktion der Verdauungsdrüsen, eine erhöhte Muskelspannung sowie Stoffwechseleränderungen und Einflüsse auf das Immunsystem einstellen. Im Allgemeinen sind diese Funktionsstörungen bei kurzer Dauer der Schallimmission reversibel und ihr Krankheitswert ist schwer anzugeben. Die dadurch ausgelöste Beeinträchtigung der biologisch notwendigen Erholungsphasen kann allerdings z.B. Genesungsprozesse verzögern oder verhindern.

Damit können im Prinzip manche der extraauralen Effekte als Schadeffekte angesehen werden.

Ein kausaler Zusammenhang zwischen Schallexpositionen und deren Auswirkungen auf Organe, Organsysteme und -funktionen ist zumeist nur im isolierten Experiment nachweisbar. Dies ist darin begründet, dass die Reaktionen ähnlich verlaufen wie Auswirkungen anderer Stressoren und deshalb durch eine mögliche Kombinationswirkung derjenige Anteil am Zustandekommen einer manifesten Erkrankung, der auf die Schallimmission zurückzuführen ist, nachträglich nicht oder nur mehr schwer feststellbar ist. Erschwerend kommt hinzu, dass unerwünschte Schalleinwirkungen sowohl auf physischer, psychischer als auch auf sozialer Ebene zur Wirkung kommen und diese Wirkebenen vielfältig miteinander verkoppelt sind. Weiters hängen Art und Intensität der Schallwirkungen von einer Reihe von situativen und persönlichen Faktoren ab.

Im Rahmen der Psychoakustik wird nach Zusammenhängen zwischen psychologischen Prozessen wie Wahrnehmung und Empfindung einerseits und akustischen Parametern andererseits gesucht. Mit der Definition von Lärm als „unerwünschtem Schall“ ist darüber hinaus eine Ebene eingeführt, die eng mit dem Problem der Lärmbelastung verbunden ist. Das „Unerwünschtsein“ eines Geräusches, z.B. aufgrund negativer Einstellung zur Lärmquelle, ist ein wesentlicher Faktor für dessen Beurteilung. Dieser und andere Kofaktoren, die ausschlaggebend sind für die Klassifizierung eines Geräusches als störend, unangenehm oder belästigend führen zu einer starken inter- und auch intraindividuellen Streuung der Wirkungsintensität von Lärmbelastungen (Kalivoda & Steiner 1998), sodass Geräuschen mit demselben A-bewerteten Schallpegel unter Umständen ganz unterschiedliche Lästigkeit zugeschrieben wird. Eine Tatsache, zu deren Erklärung so genannte Moderatoren herangezogen werden.

Unter Moderatoren sind außerakustische Einflüsse zu verstehen, welche die Reaktion auf ein akustisches Ereignis beeinflussen: Sie verändern (moderieren) die reine Reiz-Reaktions-Beziehung und erschweren so die Zuordnung des Reaktionsspektrums zu rein akustischen Messgrößen. Dazu zählen Faktoren der aktuellen Situation des Betroffenen, sozialer Kontext und sonstige Umweltbedingungen sowie individuelle Faktoren der betroffenen Person (siehe dazu auch Kapitel 4.2).

Als Moderatoren seien beispielhaft angeführt: individuelle Lärmempfindlichkeit, erlebter Gesundheitszustand, Umwelt- und Lärmbewusstsein, Art der Tätigkeit während dem Auftreten von Schallimmissionen (z.B. geistige Arbeit) und Einsicht in die Notwendigkeit einer Schallerzeugung. Als „unnötig“ oder als Indiz für die Rücksichtslosigkeit der lärmerzeugenden Personen/Betriebe empfundene Geräusche werden negativer bewertet.

Auch der Grad der erlebten Hilflosigkeit spielt eine bedeutende Rolle. Besonders wenn innerhalb der Wohnung / des Hauses keine Rückzugsmöglichkeit besteht, man also keine Chance hat, der Schalleinwirkung zu entgehen, wird es zu stark negativen Reaktionen kommen, wobei das Ausmaß der Beeinträchtigung dann vom Grad des psychischen Lärmbewältigungsvermögens der Betroffenen abhängt.

Auch das Ausmaß von Leistungsveränderungen unter Lärmeinwirkung hängt nicht nur von physikalischen Parametern der Schallimmission ab, sondern auch von personenbezogenen Variablen wie Erregbarkeit, Störbarkeit, Ablenkbarkeit, emotionale Stabilität, Einstellung zum Lärm und schließlich auch von der individuellen Leistungsfähigkeit. In dieser Hinsicht ist auch das Lebensalter ein wesentlicher Faktor. Besonders für eine Beeinträchtigung der kognitiven Leistungsfähigkeit muss das Alter berücksichtigt werden, wobei bei Kindern auch die Folgewirkungen einer chronischen Leistungsminderung der kognitiven Funktionen bedacht werden muss.

### *4.1.3.2 Physiologische Effekte*

Die Hörschwelle überschreitender Schall stellt einen Reiz dar, der einerseits an die entsprechenden Hirnzentren weitergeleitet wird (und zu bewusster Wahrnehmung führt), andererseits aber auch in der Lage ist, das subkortikale Aktivierungsniveau des Organismus zu verändern (Ising et al. 2004). Von Bedeutung ist dabei, dass bereits an der Stelle der Umsetzung von Schallreiz in nervöse Erregung stets überschießende Erregungen auftreten (Proportional-Differentialverhalten der Sinneszellen) (Spreng 2001). Das Ausmaß des Überschießens hängt mit der Anstiegodynamik des Schallereignisses zusammenhängt. Die Dynamik ist bei Flugzeuglärm mit ca. 6 – 10 dB pro Sekunde im Vergleich zu anderen Lärmarten hoch, aber noch unterhalb der Dynamik, die charakteristisch für Impaktlärm ist.

Die überschießenden Erregungen entfalten in vielen Bereichen des Gehirns ihre Wirkung, wobei das primäre Aktivierungssystem der Retikulärformation und die Amygdala (Mandelkern) besondere Bedeutung besitzen. Die Amygdala – die auch als Furchtzentrum fungiert - besitzt eine außergewöhnliche Plastizität (Lernfähigkeit), insbesondere hinsichtlich aversiver (mit negativer Bewertung verbundener), wiederholter bzw. konditionierender Schallreize (Spreng 2001). Diese Plastizität äußert sich beispielsweise in der Verkürzung von Reaktionszeiten, im Zusammenschalten mehrerer neuronaler Elemente und in der Veränderung neuronaler Elemente hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit bezüglich bestimmter Schallfrequenzen.

Zwischen der Amygdala und dem Hypothalamus besteht eine sehr enge, aktivierende Verbindung. Der Hypothalamus als das beherrschende vegetativ-nervöse bzw. hormonelle Regulationszentrum des Organismus ist hauptverantwortlich für schnelle Veränderungen

etwa im Bereich des Herz-Kreislauf-Systems (Steigerung von Herzfrequenz, Gefäßwiderstand und Blutdruck) und für Verschiebungen des hormonellen Gleichgewichts (z.B. Stresshormon-Ausschüttung) (SRU 2008, Spreng 2001).

In vereinfachter Form könnte daher die Entstehung der Wirkungen von wiederholtem unerwünschten Schall (z.B. Flugzeuglärm) folgendermaßen dargestellt werden: Durch das Einlaufen der durch Schall bewirkten Erregungen wird die Amygdala sich unter Einfluss der gleichzeitig aktivierten Hirnrinde (Analyse des Schallereignisses: z.B. steiler Anstieg, charakteristische Frequenzzusammensetzung) und durch den für komplexere kognitive Prozesse verantwortlichen Hippocampus (Analyse der Schallquelle: z.B. Flugzeug im Anflug, Flugzeug im Abflug) plastisch verändern, wodurch der menschliche Organismus sensibler für derartige Geräusche werden kann. Es liegt dann ein sehr schnelles und grobes Verarbeitungssystem vor, welches auf komplexe Reize (z.B. Schall von Flugzeugen) mit direktem Zugriff auf vegetative und hormonelle Funktionseinheiten sowie auf emotionale Bereiche reagiert. Da dieses gebahnte System danach praktisch ohne kognitive Beteiligung funktioniert, ist es auch während des Schlafs fast vollständig aktiv.

Fluglärm kann als unspezifischer Stressor beschrieben werden, der vielfältige Anpassungsvorgänge des Organismus bewirkt und der unter anderem sympathikotone Erregungen des autonomen Nervensystems verursachen kann. In den Anfängen der Fluglärmforschung wurde als Parameter für physiologische Auswirkungen von Schallreizen häufig die Fingerpulsamplitude (als Maß für die periphere Durchblutung) bzw. deren Verringerung (Vasokonstriktion) herangezogen. Das Ausmaß der Amplitudenverringerng zeigte sich dabei als annähernd proportional dem Schallpegel. Aus entsprechenden Untersuchungen wurden auch Schwellenwerte für die „vegetative Übersteuerung“ abgeleitet. Der Wert von 19x99 dB(A) fand als „kritischer Toleranzwert“ (für den Tag) Aufnahme in die „Synopsis“ (Griefahn et al. 2002). Da es nicht um die Frage einer akuten Gefährdung durch Überlastung der Regulationsfunktion für den Kreislauf geht, sind diese Befunde für die Frage der zumutbaren Fluglärmbelastung irrelevant. Sie müssen aber bei der arbeitsmedizinischen Betrachtung der Arbeitssituation von Beschäftigten in der Flugindustrie beachtet werden.

Die Frage, ob jahrelange Lärmbelastung das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen erhöht, hatte als theoretische Basis das allgemeine Stressmodell nach Selye. Allerdings werden die klassischen Stressmodelle von manchen Experten als nicht geeignet angesehen, um Lärmwirkungen in hinreichender Weise zu beschreiben (Lercher 1996).

Hinsichtlich der lärmbedingten Stresshormon-Ausschüttung sind verschiedene Regulationsachsen von Bedeutung, wobei letztlich aus dem Nebennierenmark die Katecholamine Adrenalin und Noradrenalin und aus der Nebennierenrinde Kortisol

ausgeschüttet wird. Kortisol besitzt eine ungefähr 10-mal längere Abbauzeit (durchschnittlich 64 Minuten) als die Katecholamine und eine deutlich höhere Durchdringungsfähigkeit von Zellmembranen (Ising et al. 2004). Laut dem Stressmodell von Henry (1992), welches eine Weiterentwicklung älterer Modelle darstellt, wird bei erfolgreicher Kontrolle über eine Stresssituation primär Noradrenalin freigesetzt, unter fortgesetztem Ringen um Kontrolle hingegen vor allem Adrenalin. Bei Verlust der Kontrolle und Auftreten einer Niederlagereaktion steht die Freisetzung von Kortisol im Vordergrund. Es ist seit langem bekannt, dass chronisch erhöhte Kortisolspiegel oder eine Veränderung des Tagesgangs negative Auswirkungen auf den menschlichen Organismus haben (u.a. Erhöhung des Blutdrucks und des Cholesterins, Beeinflussung der Hämodynamik).

In den letzten Jahren wurde auf wissenschaftlicher Ebene vor allem der durch Lärm verursachten Kortisolausschüttung Aufmerksamkeit geschenkt. Lärmbelastungen, die zwar noch nicht zu Aufwachreaktionen, aber zu einer Erhöhung der Ausschüttung von Kortisol insbesondere in der ersten Hälfte der Nacht führen, können langfristig gesehen die Gesundheit beeinträchtigen (Jansen und Ising 2004). Die Konzentration von Kortisol im Blut weist u.a. eine Zirkadianrhythmik auf, mit einem Minimum in der ersten Hälfte der Nacht (Spreng 2001). Auf Basis eines Kortisolmodells – das die noch tolerierbare Zunahme der Konzentration enthält - berechnete Spreng (2002, 2004) die zulässigen Maximalpegel für eine vorgegebene Zahl von nächtlichen Geräuschen. Daraus ergab sich z.B. für den Maximalpegel von 55 dB(A) eine zulässige Zahl von 11 Lärmereignissen (Flugbewegungen) während 8 Stunden. Bei einem Innenraum  $L_{A,max}$  von 53 dB liegt die Grenze bei 13 Lärmereignissen. Allerdings sollte der Parameter „Kortisolkonzentration“ nicht als alleiniges Kriterium für die Festlegung, ab wann eine Gesundheitsgefährdung durch Lärm gegeben ist, verwendet werden (Ising et al. 2004).

Der in einigen Studien ermittelte quantitative Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der nächtlichen Lärmstörung und dem Grad der Veränderungen der Kortisol-Ausscheidung beschränkt sich auf die ersten Nächte und ist insgesamt gesehen widersprüchlich (Maschke et al. 1995 a,b; Evans et al. 1995; Harder 1999).

In vielen, aber nicht allen Fluglärmstudien wurde eine Erhöhung der Kortisolausschüttung beobachtet. In einer Studie von Maschke et al. (2002) wurden 16 Personen, die in der Nähe des Flughafens Hamburg-Fuhlsbüttel wohnten, in der Nacht (23.00 bis 6.00 Uhr) über mehrere Wochen mit Fluglärm beschallt (32 simulierte Starts bzw. Landungen). Am Flughafen selbst starteten bzw. landeten in der Nacht praktisch keine Flugzeuge. In den ersten 3 Tagen erfolgte keine (zusätzliche) nächtliche Fluglärm-Exposition, in den 37 Nächten danach waren die Proband/innen Maximalpegeln von 65 dB(A) – 32-mal pro Nacht – und einem 8-Stunden -  $L_{Aeq}$  von 42 dB ausgesetzt. Es wurde die Ausscheidung von freiem

Kortisol (nächtlicher Sammelurin) bestimmt. Im Gruppenmittel fand sich eine Erhöhung der Kortisolausscheidung in den ersten Lärmnächten, mit dem höchsten Wert in der 3. Lärmnacht. Danach normalisierten sich die Kortisolwerte. Bei Frauen blieb die Kortisolexkretion im Lauf der Untersuchung relativ konstant, während sie bei Männern nach der initialen Erhöhung abnahm und ungefähr nach drei Wochen wieder zunahm.

Bei der Mehrzahl der Testpersonen führte die nächtliche Fluglärmbelastung offensichtlich zu einer Beeinträchtigung der Hormonregulation. Neben einer Erhöhung der Kortisolausscheidung ( $n=6$ ), wobei in den letzten 10 Tagen des Experiments die Werte über dem Normalbereich lagen, fand sich bei einigen Personen ( $n=4$ ) eine deutliche Verminderung der Ausscheidung. Bei 5 Probanden änderten sich die Werte kaum und eine Person wurde wegen hoher Ausgangswerte ausgeschieden.

Dies könnte darauf hindeuten, dass es unterschiedliche Arten der Reaktion auf nächtlichen Fluglärm gibt. Die Autoren sprachen in diesem Zusammenhang von drei unterschiedlichen Adaptationsmustern. Dabei wurde von den Forschern betont, dass bei nächtlichen Lärmpegeln von  $L_{A,max} = 65$  dB bzw. einem  $L_{Aeq}$  von 42 dB mehr als die Hälfte der Testpersonen Stressreaktionen zeigen, die als Risiko für die Gesundheit zu werten sind.

In der DLR-Studie (Maaß und Basner 2006) konnten hingegen praktisch keine Auswirkungen von nächtlichem Fluglärm auf die Stresshormon-Ausschüttung gefunden werden. Möglicherweise ist die Untersuchung des nächtlichen Sammelurins zu unsensitiv, um nächtliche Stressreaktionen abbilden zu können. Eine mögliche Erklärung ergibt sich auch aus den Befunden von Maschke et al. (2002). Da nur ein Teil der Personen bei Fluglärmbelastung derartige Stressreaktionen zeigt, wovon teilweise sogar Werte oberhalb des Normalbereichs auftreten, könnten Flughafenrainer als Survivorpopulation anzusehen sein, die seltener starke oder dauerhafte Reaktionen des Hypophysen-Nebennierenrinden Systems aufweisen.

#### 4.1.3.2.1 Akute kardiovaskuläre Reaktionen

Fluglärmereignisse während der Nacht können auch zu akuten Reaktionen des Herz-Kreislaufsystems führen und wenige Sekunden bis Minuten andauern (Whitehead et al. 1998).

Eine Laborstudie (Griefahn et al. 2008), bei der die Probanden Fluglärm exponiert waren und gleichzeitig Polysomnographie und Elektrokardiographie (EKG) durchgeführt wurde, zeigte, dass insbesondere stärker ausgeprägte, gesundheitsrelevante vegetative Reaktionen (monophasische über eine Minute andauernde Herzfrequenzerhöhungen) mit gleichzeitigen Aufwachreaktionen einhergingen. Diese Herzfrequenzerhöhungen waren vom Schlafstadium, aber nicht von den akustischen Parametern des Lärmereignisses abhängig.

Schwächer ausgeprägte Herzfrequenzerhöhungen (biphasisch mit einem Maximum nach 4-11 Sekunden) wurden auch ohne Aufwachreaktionen beobachtet. Diese waren sowohl vom Schlafstadium als auch von der Art der Lärmquelle abhängig (frühester Anstieg bei Schienenlärmereignissen, spätester Anstieg bei Fluglärmereignissen). Im Laufe der Nacht wurden keine Abschwächungen dieser Reaktionen beobachtet.

Andere Autoren berichten ebenfalls von fehlender Habituationmöglichkeit vegetativer Reaktionen auch nach jahrelanger Fluglärmexposition, obwohl eine klare subjektive Habituation nach wenigen Nächten auftritt (Muzet 2007). Demgegenüber konnten Basner et al. (2008) in dem großen Laborkollektiv der DLR-Studie eine Habituation der Herzaktivierungen im Elektrokardiogramm (EKG) – allerdings innerhalb einer Nacht - feststellen, welche ein Plateau bei 32 Einzelschallereignissen aufwies. In dieser Laborstudie wurden bei 112 Probanden (985 Probandennächten) die EEG-Aufwachreaktionen auf Basis der Polysomnographie mit automatisch detektierten Herzaktivierungen in Zusammenhang gebracht. Basierend auf einem Einzelkanal-Elektrokardiogramm wurde ein Algorithmus verwendet (Basner et al. 2007b), welcher automatisch den Beginn und das Ende der Herzaktivierung ermittelt. Diese Herzaktivierungs-Reaktionen standen in einem engen Zusammenhang mit EEG-Arousal. Diese Herzaktivierungen traten allerdings mit einer bis zu etwa 18% höheren Wahrscheinlichkeit als die EEG Aufwachreaktionen auf. Diese höhere Sensitivität zeigte sich insbesondere in den niedrigen Maximalpegeln für die Auslösung der Reaktion. Wenn die Spontanreaktionen einberechnet wurden, waren aber, bezogen auf die Maximalpegel der Einzelflugschallereignisse, die Dosis-Wirkungskurven der EEG-Aufwachreaktionen praktisch ident mit der für die Herzaktivierungen.

In der multinationalen EU-Studie HYENA wurden über die gesamte Nacht Blutdruck- und Herzfrequenzmessungen (alle 15 Minuten) bei 140 Probanden in der Umgebung von vier Flughäfen durchgeführt. und diese akuten vegetativen Reaktionen mit den einzelnen Lärmereignissen (Fluggeräuschen, Straßengeräuschen, Innenraumgeräuschen) in Zusammenhang gebracht (Haralabidis et al. 2008). Es zeigten sich signifikante Blutdruckanstiege und tendenzielle Herzfrequenzerhöhungen bezogen auf das 15-minütige Zeitintervall ( $L_{Aeq-15}$  Minuten), in dem ein Fluggeräusch präsent war (Maximalpegel größer als 35 dB). Bei Betrachtung der tatsächlichen Maximalpegel der einzelnen Lärmereignisse konnte zwischen den einzelnen Geräuscharten kein Unterschied festgestellt werden.

Spreng (2002, 2004) gibt Spitzenpegelwerte  $L_{max}$  von 53 dB(A) - unter der Voraussetzung einer längeren Dauer und einer größeren Häufigkeit der Einzelereignisse - als nächtliche vegetative Überproportional-Reaktionsschwelle an. Dieser Wert bezieht sich auf eine ältere EEG-Studie (Keidel et al. 1976) und ergibt sich aus der Annahme, dass während der Nacht der Organismus empfindlicher auf Lärm reagiert und im Vergleich zur ungefähren



Tageswirkschwelle für vegetative überproportionale Reaktionen um 10 dB niedriger angesetzt wurde (Muzet et al. 1985).

Die Schwelle, ab der es zu vegetativen Reaktionen kommt, hängt aber wie bei allen Reaktionen auch von der Emergenz des Geräusches (die Differenz zwischen äquivalentem Hintergrundpegel und Maximalpegel) ab. In Feldstudien wurden erste Änderungen der Herzschlagfrequenz festgestellt, wenn die einzelnen Geräusche um mehr als 7 dB(A) über dem äquivalenten Dauerschallpegel lagen (Ehrenstein et al. 1982). Dies ist konsistent mit der DLR-Feldstudie, bei der die durchschnittlichen ersten Aufwachreaktionen bei Maximalpegeln auftraten, welche den durchschnittlichen Hintergrundpegel um mindestens 6 dB überschritten.

### 4.1.3.2.2 Chronische Wirkungen

Eine ökologische Querschnittstudie in der Umgebung des Flughafens Köln-Bonn zeigt einen Zusammenhang zwischen Arzneimittelverordnungen und Fluglärm - insbesondere von Antihypertensiva und Cardia. Dieser Zusammenhang war bei Nachtlärm stärker ausgeprägt als bei Taglärm. Wegen ihres ökologischen Charakters können diese Befunde aber nicht als Nachweis dafür herangezogen werden, dass die den Verordnungen zugrunde liegenden Erkrankungen durch Fluglärm hervorgerufen werden (Greiser et al. 2007). In ökologischen Studien werden Populationen als Untersuchungseinheit betrachtet und daher können individuelle Einflussfaktoren nicht berücksichtigt bzw. erfasst werden. Die Auswertung hinsichtlich einer Expositions-Wirkungsbeziehung erbrachte bei Analyse des Fluglärms als stetige Variable in dB(A) keine konsistenten Ergebnisse. Dies ist möglicherweise dadurch erklärbar, dass die Abschätzung der Exposition unter 46 dB ungenau war. Ferner spielt hierbei möglicherweise die starke Interaktion mit dem Alter und dem Sozialstatus eine Rolle. Weiters zeigte sich auch ein positiver Effekt von Lärmschutzmaßnahmen. Bei denjenigen Versicherten, die Anträge zur Finanzierung von Lärmschutzmaßnahmen stellen durften, war die verordnete Menge an Arzneimittel geringer als bei den Versicherten, die diese Möglichkeit nicht hatten.

Als Hinweis für den möglichen Einfluss von nächtlichem Fluglärm auf Bluthochdruck zeigen diese Studien eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der multinational angelegten Querschnittstudie HYENA (Hypertension and Exposure to Noise near Airports).

In der HYENA-Studie wurden in der Umgebung von 6 großen europäischen Flughäfen auch auf individueller Ebene Blutdruckmessungen durchgeführt bzw. die ärztliche Diagnose Hypertonie in Verbindung mit dem Gebrauch von blutdrucksenkenden Mitteln (Antihypertensiva) miterfasst. Es wurden insgesamt 4861 Personen (Alter: 45 bis 70 Jahre) untersucht, die seit mindestens 5 Jahren in der Region wohnten. Da - im Gegensatz zu der

ökologischen Studie - die Einzelpersonen untersucht wurden, konnten auch weitere z.B. sozioökonomische bzw. lebensstilbedingte Einflussfaktoren in der Analyse zum Zusammenhang zwischen Bluthochdruck und Lärmexposition berücksichtigt werden. Es zeigten sich signifikante Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Nachtfluglärm ( $L_{\text{night}}$ ) und dem Risiko für Bluthochdruck (Jarup et al. 2008). Es konnten keine signifikanten Effekte für den  $L_{\text{eq}}$  am Tag beobachtet werden. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die Nachtlärmeffekte auch von der Exposition während des Tages abhängig sind. Gemäß diesen Untersuchungen erhöht ein Anstieg des nächtlichen Fluglärmpegels um 10 dB in Schallpegelbereichen zwischen 30-60 dB das Risiko für Bluthochdruck bei Frauen und Männern um 14%. Die Studie unterstützt die Annahme, dass Fluglärm während der Nacht zu Risikoerhöhungen für Bluthochdruck führen kann, eine Schwelle ist jedoch nicht direkt ableitbar, denn die Daten reichen nicht aus, um zwischen Modellen mit und ohne Schwelle eine empirisch begründete Entscheidung zu treffen.

In einer prospektiven Kohortenstudie wurden inzidente Fälle von Hypertonie unter 2027 Männern, die in einer von vier Gemeinden um den Arlanda Flughafen von Stockholm lebten, erfasst (Eriksson et al. 2007). Die Fluglärmexposition wurde auf Basis von Lärmkarten hinsichtlich des 24-Stunden äquivalenten Fluglärmpegels (einem über die Tageszeiten gewichteten äquivalenten Dauerschallpegel) und des Maximalpegels anhand der Geo-Koordination des Wohnhauses bestimmt. Die 24-Stunden Pegel wurden in Stufen von 5 dB zwischen 50 dB und 65 dB kategorisiert, die Maximalpegel in die Klassen 70-72, 73-75 und >75 dB eingeteilt. Für die kontinuierlichen Pegelwerte ergab sich ein signifikantes relatives Risiko von 1,10 [95% Konfidenzintervall: 1,01 – 1,19] pro 5 dB Anstieg des 24-Stunden energieäquivalenten Fluglärmpegels und ein signifikantes relatives Risiko von ebenfalls 1,10 [95% Konfidenzintervall: 1,02 – 1,19] pro 3 dB Anstieg des Maximalpegels. Diese Schätzwerte des Inzidenzanstiegs der Hypertonie wurden deutlich höher, wenn man Personen, die vor der Blutdruckmessung geraucht oder Tabak geschnupft hatten, ausschloss. In diesem Fall waren die relativen Risiken für beide Fluglärmindikatoren 1,15. Leider konnte eine getrennte Auswertung für die Exposition während der Nacht nicht vorgenommen werden. Der fehlende oder nur gering ausgeprägte Anstieg des Risikos über die Lärmkategorien kann sowohl auf einen Plateaueffekt hindeuten, als auch anzeigen, dass die Lärmindikatoren nicht die korrekte Metrik zur Erfassung des für die Wirkung wesentlichen Aspektes der Exposition darstellen.

### 4.1.3.3 Kognitive Effekte

Grundsätzlich können alle mentalen Leistungen sowie jene physischen Aktivitäten, die einer besonderen geistigen Kontrolle bedürfen, durch Lärmexposition beeinträchtigt werden. Eine

Beeinträchtigung der geistigen (kognitiven) Leistungsfähigkeit wird als besonders störend wahrgenommen und durch jede Art von „Auffälligkeiten“ des Schallreizes verstärkt: durch intermittierenden, unvorhersehbaren Lärm, unregelmäßige Pegelschwankungen, hochfrequente Anteile oder besondere Ton- und Informationshaltigkeit des Schallereignisses (z.B. Sprache).

Zu den Veränderungen geistiger Leistungsfähigkeit unter Schalleinwirkung zählen u.a. eine Verminderung der Aufmerksamkeit bzw. der Konzentration, eine Erhöhung der Reaktionszeit und daraus resultierende Verlangsamung geistiger Prozesse sowie eine Veränderung des eigenen Leistungsanspruches und Verlust der Motivation.

In den letzten Jahren konnten klare Zusammenhänge zwischen kognitiver Leistungsfähigkeit und Fluglärmbelastung aufgezeigt werden. Beeinträchtigungen kognitiver Fähigkeiten und Fertigkeiten bei Kindern, die in fluglärmexponierten Regionen wohnen, Veränderungen in ihren kompetitiven Verhaltensmustern und Reduktion ihrer Motivation, Aufgabenstellungen zu lösen, wurden beschrieben.

Zur Frage der Auswirkung von Fluglärm auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit von Kindern wurden in den letzten Jahren epidemiologische Studien publiziert. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um Untersuchungen im Umfeld der Flughäfen von München (Bullinger et al. 1998/9, Evans et al. 1998, Hygge et al. 2002), Schuluntersuchungen im Umfeld von London-Heathrow (Haines et al. 2001a,b,c, Haines et al. 2002) und die multizentrische RANCH-Studie, die 2001-2003 im Umfeld der Flughäfen London, Amsterdam und Madrid (Stansfeld et al. 2005; Clark et al. 2006; van Kempen et al. 2006) durchgeführt wurde.

Im Folgenden werden diese drei bedeutsamen Untersuchungen genauer beschrieben. Neben dem Endpunkt mentale Leistungsfähigkeit wurden in unterschiedlichem Ausmaß auch Daten zu anderen Endpunkten wie zur Belästigung, zu Stress und Gesundheitszustand (Fragebogen und Stresshormone) erhoben. Auch diese werden der Vollständigkeit halber kurz angeführt.

#### 4.1.3.3.1 Studien zum Flughafen München

Anfang der 90er Jahre wurde eine prospektive Längsschnittstudie in München gestartet. Sechs Monate vor sowie 6 und 18 Monate nach Schließung des alten und Eröffnung des neuen Flughafens wurden 326 Kinder (Alter 9-13 Jahre) untersucht. Es wurden vier Gruppen gebildet: jeweils zwei „Fluglärmgruppen“ (Belastungsgruppe alter Flughafen und Belastungsgruppe neuer Flughafen) sowie zu den jeweiligen „Lärmgruppen“ Kontrollgruppen ohne Fluglärmbelastung. Dieses Design erlaubte einen Vergleich von Belastungsgebiete mit

Kontrollgebieten im Querschnitt sowie im Längsschnitt auch prospektiv die Auswirkung wegfallender (alter Flughafen) und hinzutretender (neuer Flughafen) Fluglärmbelastung.

Die Erhebungen umfassten folgende Untersuchungen

- Umweltwahrnehmung, Wohlbefinden (KINDL-Fragebogen)
- Motivation (Tests mit Lösungsversuche bei unlösbaren und lösbaren Puzzles)
- Kognitive Fähigkeiten: Lesetest, Gedächtnisleistung (Langzeitgedächtnis und Kurzzeitgedächtnis), Aufmerksamkeit (visuelle Erkennungsfähigkeit, visual search), Reaktionszeit, Spracherkennung
- Blutdruck und Stresshormone

Zur objektiven Erfassung der Schallsituation wurden Lärmmessungen im Wohngebiet der Kinder durchgeführt.

Die Lärmimmissionen im Wohngebiet der Kinder vor und nach Verlegung des Münchner Flughafens sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Lärmimmissionen im Wohngebiet der Kinder der Münchner Flughafenstudie

L <sub>A</sub> über 24 Stunden [dB]	6 Monate <b>vor</b> Verlegung des Flughafens	18 Monate <b>nach</b> Verlegung des Flughafens
Alter Flughafen - Belastungsgebiet	68	54
Alter Flughafen - Kontrollgebiet	59	55
Neuer Flughafen - Belastungsgebiet	53	62
Neuer Flughafen - Kontrollgebiet	53	55

Im Bereich des alten Flughafens machten die lärmbelasteten Kinder signifikant mehr Fehler bei den Lesetests als die Kinder aus dem Kontrollbereich. Alle Kinder zeigten über die Zeit eine Verbesserung, wobei die ehemals fluglärmbelasteten Kinder sich sehr stark verbesserten, und die Unterschiede zu den Vergleichskindern nahezu verschwanden.

Im Bereich des neuen Flughafens war zu beobachten, dass alle Kinder vor Eröffnung des Flugbetriebs eine höhere Fehlerrate zeigten als die Kinder unter Fluglärmbelastung am alten Flughafen. Mit der Zeit war aber eine deutliche Verbesserung feststellbar – in der neu fluglärmbelasteten Gruppe, aber auch in der Kontrollgruppe.

Während sich die Leseleistung insgesamt nicht zwischen fluglärmbelasteten Kindern und Vergleichskindern unterschied, zeigten gerade bei den schwierigsten Aufgaben die neu fluglärmbelasteten Kinder eine signifikant schlechtere Leseleistung.

In allen Gruppen nahmen die Leistungen bei der Testung des Kurzzeitgedächtnisses über die Zeit zu (dem Alter entsprechend). In der Umgebung des alten Flughafens hatten die

lärmbelasteten Kinder anfangs schlechtere Leistungen. Nach Schließung des Flughafens erreichten sie höhere Werte als die Kontrollgruppe.

In der Umgebung des neuen Flughafens hatten die Kinder der lärmbelasteten Gruppe vor der Eröffnung des Flughafens niedrigere Werte für das Kurzzeitgedächtnis. Auch hier war eine Zunahme nach Eröffnung des Flughafens zu erkennen. Insgesamt ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Bei der Überprüfung des Langzeitgedächtnisses fiel auf, dass die lärmbelastete Gruppe am alten Flughafen schlechtere Leistungen erbrachte als die Vergleichskinder. Darüber hinaus war eine Abnahme von der ersten zur zweiten Untersuchungsserie in allen Gruppen erkennbar, die bis zur dritten Untersuchungsserie wieder zunahm. Allerdings war die Zunahme in der dann lärmbelasteten Gruppe signifikant geringer als in allen anderen Gruppen. Damit zeigte sich eine Beeinträchtigung des Langzeitgedächtnisses in der fluglärmbelasteten Gruppe.

In der Belastungsgruppe des alten Flughafens und in beiden Kontrollgruppen verbesserte sich die Sprachwahrnehmung über die Zeit, während in der neuen Belastungsgruppe keine Verbesserung nachweisbar war. Fluglärm könnte so die altersabhängige Verbesserung der Sprachwahrnehmung negativ beeinflussen.

Zusammenfassend zeigte sich, dass neben einer signifikant höheren Umweltbelastung und einer Beeinträchtigung der Motivation (Bullinger et al., 1998/9), die kognitive Leistungsfähigkeit - nämlich Lesen (v.a. schwierige Leseaufgaben), das Langzeitgedächtnis und die Sprachwahrnehmung - durch Fluglärm beeinträchtigt wird (Hygge et al. 2002).

Der Vollständigkeit halber seien noch die Ergebnisse zu den Untersuchungen auf Stresshormone (Adrenalin, Noradrenalin und Kortisol im 12 h Nachtharn) und Blutdruck erwähnt. In beiden Gruppen zeigte sich ein altersabhängiger Anstieg der Blutdruckwerte, wobei der Anstieg der systolischen Blutdruckwerte in der neu lärmbelasteten Gruppe im Vergleich mit der Kontrollgruppe signifikant stärker ausgeprägt war.

Die Stresshormone Adrenalin und Noradrenalin nahmen in beiden Gruppen zu. Der Anstieg in der Belastungsgruppe war aber deutlich höher als in der Kontrollgruppe; bei den gemessenen Kortisolkonzentrationen konnten keine konsistenten Änderungen gefunden werden (Evans et al. 1998).

#### 4.1.3.3.2 Studien zum Flughafen Heathrow (London)

Zur Auswirkung des Fluglärms auf die Gesundheit und die kognitive Leistungsfähigkeit bei Schulkindern (Alter: 8-11 Jahre) wurden epidemiologische Studien in der Umgebung des Flughafens London Heathrow durchgeführt. Während in der Münchner Studie Untersuchungen im Wohngebiet durchgeführt wurden, wurden in dieser schulbezogenen Studie folgende zwei Ansätze gewählt.

Studienansatz I: Untersuchungen von Kindern die fluglärmbelastete Schulen besuchen im Vergleich zu nicht belasteten Schulen (Haines et al. 2001 a,b,c).

Studienansatz II: Querschnittuntersuchung von Kindern aus 123 Londoner Schulen mit unterschiedlicher Fluglärmbelastung (Haines et al. 2002).

#### **Studienansatz I: Untersuchungen von Kindern fluglärmbelasteter im Vergleich nicht belasteter Schulen**

Verglichen wurden Kinder aus fluglärmbelasteten Schulen ( $L_{Aeq} > 66$  dB [7.00 - 23.00 Uhr]) mit Schulen ohne Fluglärmbelastung ( $L_{Aeq} < 57$  dB). Untersucht wurde die kognitive Leistungsfähigkeit hinsichtlich Leseverständnis (Suffolk reading Skala), Aufmerksamkeit (sustained attention) und Motivation (Kinder- und Lehrerfragebogen).

Weiters wurden soziale Parameter, Belästigung und Stress aufgrund von Lärm, psychiatrische Endpunkte (Depression, Angst), Kortisol im Speichel und selbst berichtete Gesundheit (u. a. Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schlafstörungen) erhoben.

*Haines et al. 2001a: Vergleich Kinder aus 4 Schulen mit hoher Fluglärmbelastung mit Kindern aus 4 Schulen mit niedriger Fluglärmbelastung bei Erstuntersuchung*

In dieser Untersuchung wurden 340 Kinder aus je 4 Schulen mit Lärmbelastung  $L_{Aeq} < 57$  und  $L_{Aeq} > 66$  dB getestet. Es zeigte sich, dass die Kinder aus fluglärmbelasteten Schulen häufiger aus „nicht-weißen“ Familien mit anderer Muttersprache als die Landessprache und mit geringerem Sozialstatus kamen (Tabelle 2). Daher wurden die Ergebnisse der Tests auf diese Einflussfaktoren adjustiert.

Tabelle 2: Sozioökonomische Merkmale der Kinder in fluglärmbelasteten und nicht fluglärmbelasteten Schulen der Heathrow Studie

	Fluglärmbelastete Schulen	Nicht fluglärmbelastete Schulen
„Weiße“ Kinder	37%	88%
Kinder mit Englisch als Muttersprache	65%	93%
Kinder mit höherem Sozialstatus	47%	60%

Kinder der fluglärmbelasteten Schulen gaben nach Korrektur für die Einflussfaktoren Herkunft, Muttersprache und Sozialstatus signifikant häufiger höhere Belästigung durch Fluglärm an.

Keine signifikanten Unterschiede fanden sich zwischen den unterschiedlich lärmbelasteten Gruppen bezüglich Angst und Depression, psychischer Auffälligkeiten (z.B. Hyperaktivität, Verhaltens-, emotionale Probleme) und körperliche Gesundheit (nach Angaben der Kinder und ihrer Eltern zu allgemeiner Gesundheit, Kopfschmerzen, Müdigkeit und Schlafstörungen).

Allerdings wurde bei Kindern aus den fluglärmbelasteten Schulen ein signifikant geringeres Leseverständnis sowie im Mittel signifikant schlechtere Werte bei der Testung des Langzeitgedächtnisses (Wiedererkennungsfunktion) beobachtet als bei Kinder aus den Vergleichsschulen. Das Kurzzeitgedächtnis und die Abruffunktion des Langzeitgedächtnisses waren nicht beeinflusst. Im Hinblick auf die Motivation ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Der Zusammenhang zwischen Leseverständnis, Langzeitgedächtnis (Wiedererkennung) und Fluglärm legt nahe, dass chronische Fluglärmbelastung kognitive Fähigkeiten beeinträchtigt. Der Zusammenhang zwischen Fluglärm und Leseverständnis konnte nicht auf die angegebene Belästigung, aktuelle Lärmpegel oder Sozialfaktoren zurückgeführt werden.
- Chronischer Fluglärm war nicht mit psychischer Gesundheit der Kinder assoziiert (Angst, Depression, Hyperaktivität und Verhaltensprobleme etc.)
- Es fanden sich keine Assoziation zwischen Fluglärmbelastung an der Schule und subjektiver Gesundheit, Kortisol im Speichel als Stressindikator sowie Motivation der Kinder.

*Haines et al. 2001b: Vergleich von Kindern aus 4 Schulen mit hoher Fluglärmbelastung mit Kindern aus 4 Schulen mit niedriger Fluglärmbelastung bei Nachuntersuchung*

Ein Jahr nach der Erstuntersuchung konnten 271 Kinder (= 81 % der erstuntersuchten Kinder) mit den gleichen Methoden nachuntersucht werden.

Das Leseverständnis (Sprachverständnis durch Lesen) war weiterhin deutlich - und zunehmend – bei den Kindern aus den durch Fluglärm belasteten Schulen vermindert. Weiters wurden Kinder aus Schulen mit höherer Fluglärmbelastung bezüglich ihrer Aufmerksamkeit schlechter bewertet als Kinder aus weniger lärmbelasteten Schulen.

In dieser Folgeuntersuchung konnten die negativen Assoziationen zwischen Fluglärm und Leseverständnis sowie Aufmerksamkeit bestätigt werden. Die Analysen für Einzelpersonen bei beiden Untersuchungen weisen darauf hin, dass die fortdauernde Lärmbelastung das Leseverständnis zunehmend beeinflussen könnte, aber von sozioökonomischen Faktoren überlagert wird. Der negative Zusammenhang zwischen Fluglärm und Leseverständnis wurde durch die abnehmende Aufmerksamkeitsleistung nicht beeinflusst.

Da anzunehmen ist, dass die Fluglärmbelastung über das Untersuchungsjahr im Wesentlichen gleich blieb, erbrachte diese Untersuchung keinen Hinweis auf Gewöhnung.

*Haines et al. 2001c: Vergleich von Kindern aus 10 Schulen mit hoher Fluglärmbelastung mit Kindern aus 10 Schulen mit niedriger Fluglärmbelastung*

Die Autoren führten eine weitere, ausgedehntere Untersuchung mit 451 Kindern (Alter: 8-11 Jahre) durch. Dabei wurden je 10 Schulen mit hoher ( $L_{Aeq} > 63$  dB) und niedrigerer ( $L_{Aeq} < 57$  dB) Fluglärmbelastung (tags über 16 Stunden) ausgewählt.

Im Wesentlichen wurden die gleichen Untersuchungsmethoden wie bei den beiden oben beschriebenen Londoner Untersuchungen verwendet:

- Fragen zur Lärmbelästigung (Flug-, Straßenlärm zu Hause und in der Schule)
- Lewis Stress-Skala für Kinder
- Fragebogen zu Stärken und Schwächen (Strength and Difficulties Questionnaire, SDQ)
- Kognitive Fähigkeiten und Leistungen: Lesetest (Suffolk Reading Scale) mit 70 Multiple Choice-Fragen mit je 4 Antwortmöglichkeiten, Gedächtnis, Aufmerksamkeit
- Katecholamine im Morgenharn (Untergruppe) in jeweils 8 Schulen (mit und ohne Fluglärm)

Kinder aus den fluglärmbelasteten Schulen gaben deutlich häufiger Belästigung durch Fluglärm an als Kinder aus nicht fluglärmbelasteten Schulen. In der Lewis-Skala für Stress unterschieden sich die Kinder aus den beiden Gruppen jedoch nicht.

Die Kinder mit hoher und niedriger Lärmbelastung zeigten - nach Korrektur für soziale Einflussfaktoren - keine signifikante Unterschiede bei der Untersuchung der kognitiven Fähigkeiten wie Leseverständnis (insgesamt), Kurz- und Langzeitgedächtnis (Abruf und Wiedererkennung) und Daueraufmerksamkeit.

Im Hinblick auf das Leseverständnis muss man diese Ergebnisse detaillierter betrachten: Wenn alle 70 Aufgaben zusammen bewertet wurden, war der Unterschied zwischen den Gruppen nicht signifikant. Wurden allerdings nur die 15 schwierigsten Aufgaben bewertet, so



schnitten die fluglärmbelasteten Kinder in Bezug auf das Leseverständnis signifikant schlechter ab. Dieser Unterschied blieb auch nach Korrektur für soziale Einflussfaktoren signifikant.

Kinder aus den fluglärmbelasteten Schulen wiesen schlechtere Ergebnisse im Hinblick auf psycho-soziale Gesundheit auf als Kinder aus den nicht fluglärmbelasteten Schulen (SDQ-Skala insgesamt: grenzwertig signifikant; Hyperaktivität: hochsignifikant).

Die Autoren unterstreichen, dass 74 % der Kinder aus den fluglärmbelasteten Schulen auch zu Hause eine hohe Fluglärmbelastung hatten ( $L_{Aeq} > 63$  dB), während 96 % der Kinder aus den nicht-lärmbelasteten Schulen auch in nicht fluglärmbelasteten Wohnungen ( $L_{Aeq} < 57$  dB) wohnten. Auch wurde auf die hochsignifikanten Unterschiede der akuten Lärmbelastung während der Testung in den Schulen mit hoher und niedriger chronischer Lärmbelastung hingewiesen.

Folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich mentaler Leistungen können gezogen werden:

- Belastung durch Fluglärm an der Schule war mit Belästigung und Beeinträchtigung des Leseverständnisses (bei schwierigen Aufgaben) assoziiert.
- Ein Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung mit Leseverständnis insgesamt, Kurz- oder Langzeit-Gedächtnis oder Aufmerksamkeit konnte nicht beobachtet werden.

### **Studienansatz II: Querschnittuntersuchung von Kindern aus Londoner Schulen zu Fluglärmbelastungen und Schulleistungen der Kinder (Haines et al. 2002)**

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Routine-Schulleistungstests von rund 11.000 Londoner Kindern aus den 6. Klassen (Alter: 11 Jahre) in 123 Schulen im Hinblick auf die Fluglärmbelastung an diesen Schulen ausgewertet. Die Fluglärmbelastung der Schulen wurde den offiziellen Fluglärmkarten entnommen und in 3-dB-Schritten (16 Stunden 7-23 Uhr) klassifiziert. Für jedes Kind wurde Alter, Geschlecht und Untersuchungs-jahr erhoben. Als Parameter für „soziale Benachteiligung“ wurde auf Schulebene der Anteil der Kinder, die eine kostenlose Schulspeisung erhielten, erfasst.

Während in den weniger lärmexponierten Bereichen mehr private/kirchliche Schulen lagen, mit einem höheren Anteil an Kindern, die Englisch als Muttersprache sprechen und keiner kostenlosen Schulspeisung bedürfen, waren in den fluglärmbelasteten Bereichen mehr staatliche Schulen, mehr Kinder mit anderer Muttersprache als Englisch und mit freier Schulmahlzeit anzutreffen.

Die Auswertung der Leistungsbeurteilungen der Kinder wurde mit zwei Modellen für die Berücksichtigung der sozioökonomischen Faktoren vorgenommen:

Modell (1): Berücksichtigt wurden das Geschlecht der Kinder, das Jahr der Untersuchung und der Schultyp (staatlich vs. kirchlich/privat)

Modell (2): Berücksichtigt wurde darüber hinaus der Anteil der Kinder mit kostenloser Schulspeisung.

Die Ergebnisse zeigen keine Assoziation des Fluglärms an der Schule mit dem Schreiben (Handschrift und Aufsatz), aber eine deutliche Beeinträchtigung insbesondere bei hohen Fluglärmbelastungen  $L_{Aeq} > 69$  bzw.  $> 66$  dB auf die Leistungsbeurteilungen in „Englisch insgesamt“, beim „Sprechen“, „Lesen“, „Rechnen“ und in den Naturwissenschaften.

Die beobachteten Beeinträchtigungen waren für „Englisch insgesamt“ und „Lesen“ sowie „Rechnen“ signifikant. Nach Korrektur für Geschlecht, Alter und Schultyp blieben die Zusammenhänge signifikant. Nach zusätzlicher Berücksichtigung des Faktors „kostenlose Schulspeisung“ war kein signifikanter Zusammenhang mehr zwischen den verschiedenen Items der Leistungsfähigkeit und zunehmendem Fluglärm an den Schulen erkennbar.

Haines et al. (2002) folgerten, dass insgesamt Hinweise auf Zusammenhänge zwischen chronischer Fluglärmbelastung und Schulleistung der Kinder beim Lesen und Rechnen beobachtet wurden (mit Dosis-Wirkungsbeziehung). Diese Assoziation war jedoch von sozioökonomischen Faktoren überlagert.

#### 4.1.3.3.3 Die RANCH-Studie (London, Amsterdam und Madrid)

In den Jahren 2001 bis 2003 wurden im Rahmen der multizentrischen RANCH-Studie (**R**oad traffic and **a**ircraft **n**oise exposure and children's **c**ognition and **h**ealth: exposure-effect relationships and combined effects) insgesamt 2844 Kinder im Alter von 9 bis 10 Jahren aus 89 Schulen im Umfeld der Flughäfen London Heathrow, Amsterdam Schiphol, Madrid Barajas untersucht. In jedem Land wurden Schulen nach sozioökonomischem Status parallelisiert ausgewählt. In England und Spanien wurden dabei die Kriterien kostenlose Schulspeisung und Landessprache als Muttersprache gewählt, in Holland wurde der Armuts-Anteil und der Anteil Nicht-Europäer im Wohnumfeld genutzt.

In allen drei Ländern wurde die Fluglärmexposition als energieäquivalenter Dauerschallpegel (7.00 - 23.00 Uhr) an den Schulen aus den nationalen Fluglärmkarten entnommen. In Amsterdam wurde darüber hinaus die Straßenlärmbelastung mittels Modellrechnungen einbezogen, in London und Madrid wurden zusätzlich zu den Modellrechnungen auch Messungen im Außenbereich der Schulen vorgenommen.

Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Leseverständnis mittels standardisierter nationaler Tests; England: Suffolk reading scale (wie bei Studien von Haines et al. 2001 a-c), Holland: CITO Lesetest mit 42 Items, Spanien: Evaluación Comprensión Lectora mit 27 Items
- Gedächtnis (Kurz- und Langzeit, Abruf und Wiedererkennung)
- Aufmerksamkeitstest nach Toulouse Pieron
- Fragebogen (Gesundheitszustand, psychischer Gesundheit, Stress, Belästigung)

Die Exposition gegenüber Fluglärm war im Mittel- und Maximalbereich in England und Holland vergleichbar. In Spanien war die mittlere Fluglärmbelastung an den untersuchten Schulen niedriger, die Maximalbelastung lag jedoch höher. In England wurde eine etwas niedrigere mittlere Straßenlärmbelastung im Vergleich mit Holland und Spanien festgestellt, während die maximale Straßenlärmbelastung in England und Holland vergleichbar und etwas unterhalb der Maximalbelastung in Spanien lag (Abb. 1).

Die Fluglärmbelastung an den Wohnungen der Kindern korrelierte eng mit der Fluglärmbelastung an den Schulen; d.h. Kinder, die fluglärmbelastete Schulen besuchten, wohnten in der Regel auch in fluglärmbelasteten Wohnungen.

Tabelle 3: Messergebnisse zu Fluglärmimmissionen in der Schule und zu Hause der RANCH Studie

	Gesamt	England	Niederlande	Spanien
Fluglärm in der Schule $L_{Aeq}$ [dB]				
Mittel (Standardabweichung)	52 (9,7)	52 (9,4)	54 (7,0)	43 (10,7)
Bereich	30-70	34-68	41-68	30-77
Fluglärm zu Hause $L_{Aeq}$ [dB]				
Mittel (Standardabweichung)	50 (8,9)	53 (8,9)	49 (7,06)	46 (9,1)
Bereich	31-76	33-76	34-65	31-73

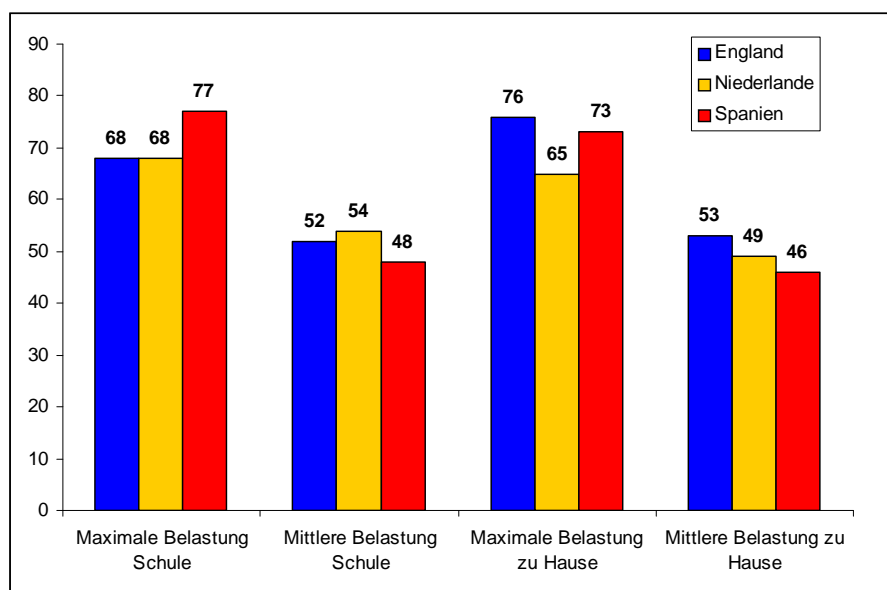


Abb. 1: Mittlere und maximale Fluglärmbelastung in dB(A) an den untersuchten Schulen und zu Hause in der Umgebung der Flughäfen London Heathrow, Madrid und Amsterdam

In England waren mehr als 20 % der Eltern arbeitslos (= doppelt so hohe Arbeitslosenrate wie bei den Eltern der Teilnehmer in den anderen Ländern). Auch die Rate des Wohnens in Miete und mit anderer Muttersprache als der Landessprache war bei den Teilnehmern aus England deutlich höher als bei denen aus Holland und Spanien. Enge Wohnverhältnisse oder chronische Erkrankung der Kinder waren bei den Kindern aus England und Holland häufiger vorzufinden als bei den Kindern aus Spanien.

Die Kinder aus Spanien hatten - bei der niedrigsten mittleren und höchsten maximalen chronischen Fluglärmbelastungen - die besten Werte für **Aufmerksamkeit**. Bei etwa vergleichbarer mittlerer und maximaler Fluglärmbelastung in England und Holland hatten die Kinder aus England deutlich niedrigere Aufmerksamkeitswerte als die Kinder aus Holland.

Bei der Überprüfung der **Gedächtnisleistungen** ergaben sich keine konsistenten Unterschiede zwischen den Kindern der einzelnen Regionen, wobei dabei sehr differenziert einzelne Gedächtnisleistungen getestet wurden:

- Recognition Memory: passives Gedächtnis (Wiedererkennensleistung)
- Episodic memory - recognition and recall: episodisches Gedächtnis
- Working and prospective memory: Arbeitsgedächtnis
- Information recall, conceptual recall: Erinnerungsfähigkeit für Informationen /konzeptuelles Wissen

Die stärksten Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung und kognitiven Fähigkeiten der Kinder ergaben sich bei der Untersuchung des Leseverständnisses. Gepoolt über alle Städte zeigte sich hier ein signifikanter, annähernd linearer Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung an der Schule und dem Leseverständnis, der sich nicht durch die angegebene Lärmbelastung oder individuelle unterschiedliche Gedächtnisleistung erklären ließ und auch nach Korrektur für Sozialvariablen erhalten blieb (Abb. 2). Straßenlärmbelastung an der Schule zeigte diesen Effekt nicht.

Die detaillierten Auswertungen der Erhebungen über alle Städte ist in Tabelle 4 dargestellt (die Analyse wurden unter Berücksichtigung von Störvariablen durchgeführt, näheres siehe Fußnote zur Tabelle).

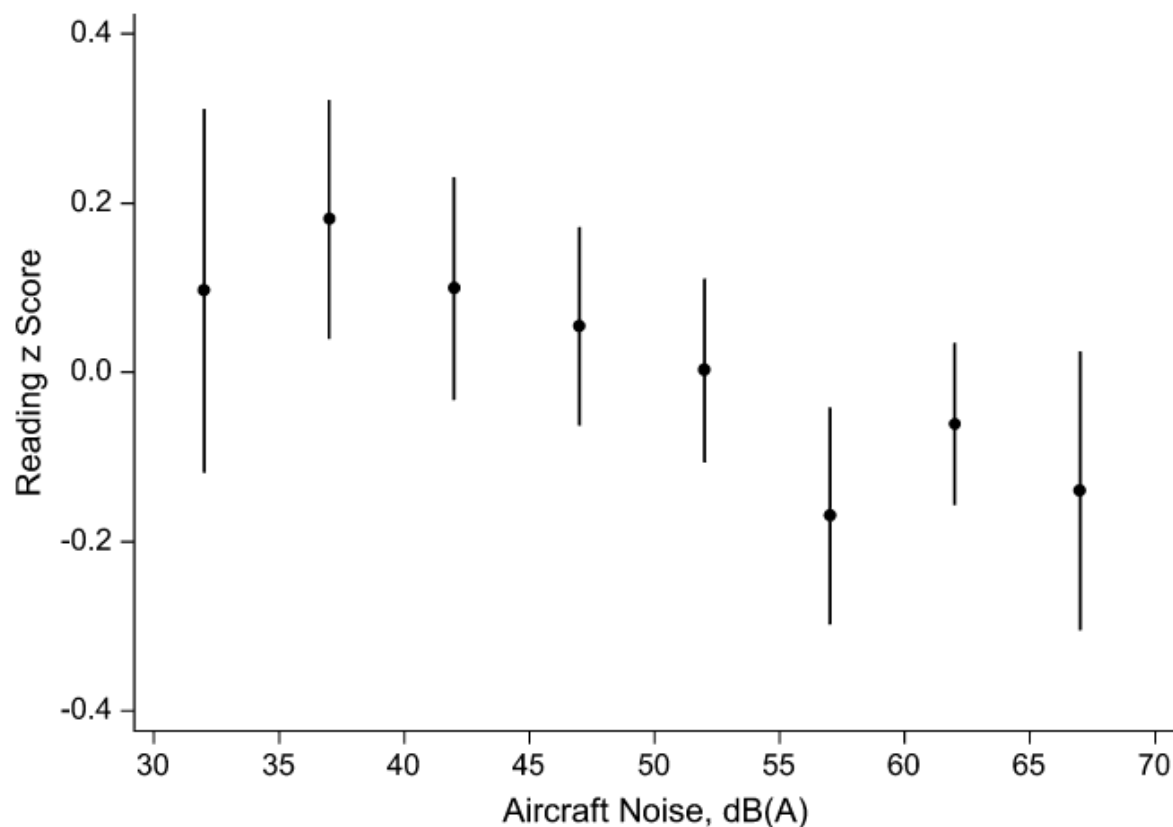


Abb. 2: Leseverständnis (adjustierte mittlere Z-Scores) bezogen auf die mittlere Fluglärmbelastung an den Schulen im RANCH Projekt

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen verschiedenen kognitiven Leistungen und Exposition gegenüber Fluglärm. Adjustierte lineare Regressionsanalyse.

	n	Fluglärm (Modell 1) $\beta$	Fluglärm (Modell 2) $\beta$	p-Wert (Model 2)
Leseverständnis	2010	-0,009	-0,008	0,0097
Gedächtnis Wiedererkennung	1998	-0,021	-0,018	0,0141
Cued recall, conceptual	1975	-0,006	-0,004	0,2684
Cued recall, information	1974	-0,030	-0,022	0,1531
Prospective memory	1958	-0,015	-0,015	0,1250
Arbeitsgedächtnis	1938	-0,024	-0,021	0,3412
Daueraufmerksamkeit	1938	-0,510	-0,037	0,7471
Psychische Gesundheit	2014	0,015	0,013	0,3098

Modell 1: Adjustiert nach Alter, Geschlecht, Land, sozioökonomischem Status, Bildung der Mutter

Modell 2: wie Modell 1 plus: Berücksichtigung chronischer Erkrankung des Kindes, Muttersprache in der Familie; elterliche Unterstützung bei den schulischen Hausarbeiten der Kinder und Verglasung der Fenster im Klassenraum

Dabei zeigt sich, dass das Leseverständnis gering aber statistisch hoch signifikant mit zunehmender Exposition gegenüber Fluglärm an den Schulen abnahm - auch nach Korrektur für die verschiedenen betrachteten Störvariablen. Straßenlärm hingegen zeigte keine Auswirkung auf das Leseverständnis. Bei den überprüften Gedächtnisleistungen und

bei Aufmerksamkeit zeigte sich tendenziell eine Beeinträchtigung durch Fluglärm. Statistisch signifikant war allerdings nur die Beeinträchtigung der Gedächtnisleistung. Bei der Erhebung zur psychischen Gesundheit konnte keine Auswirkung des Fluglärms festgestellt werden.

Schlussfolgerungen in der Publikation von Stansfeld et al. (2005):

- Es wurde eine lineare Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen der Intensität des Fluglärms an der Schule und dem Leseverständnis sowie - in geringerem Ausmaß – einfacher Gedächtnisleistungen beobachtet
- Keine Zusammenhänge von Fluglärm mit episodic memory, information and conceptual recall, working and prospective memory oder Aufmerksamkeit
- Fluglärm war mit dem Grad der Lärmbelastigung korreliert.

Schlussfolgerungen in der Publikation von Clark et al. (2006):

- Fluglärm an der Schule war mit dem Leseverständnis (auch nach Kontrolle für sozioökonomische Faktoren) negativ korreliert
- Fluglärm an den Schulen korrelierte hochsignifikant mit Fluglärm zu Hause (England  $r=0,91$ ; Niederlande  $r=0,93$ ; Spanien  $r= 0,85$ )
- Zunehmender Fluglärm zu Hause korrelierte hochsignifikant mit abnehmendem Leseverständnis
- Nach Adjustierung für Fluglärmbelastung an der Schule wurde keine zusätzliche Leistungsminderung durch Fluglärmbelastung zu Hause beobachtet.

Der Vollständigkeit halber seien hier auch die Schlussfolgerungen in der Publikation von van Kempen et al. (2006) angeführt. In diesem Teil des RANCH Projektes wurden Blutdruck und Pulsfrequenz gemessen:

- Der Zusammenhang zwischen Fluglärm und Blutdruck der Kinder war nicht durchgehend konsistent. Während bei den holländischen Kindern ein signifikanter Einfluss gefunden wurde, war dies bei der britischen Gruppe nicht der Fall. Diese Ergebnisse - im Zusammenhang mit früheren publizierten Studien aus München und London - legen nahe, dass keine eindeutigen Schlussfolgerungen über die Assoziation von Fluglärm und Blutdruck der Kinder gezogen werden können.
- Auch die Auswirkungen des Straßenlärms auf den Blutdruck der Kinder, die eine Abnahme der Blutdruckwerte bei zunehmender Straßenlärmbelastung zeigten, sind nicht konsistent und lassen keine endgültige Bewertung zu.

### 4.1.3.3.4 Zusammenfassende Darstellung der großen Feldstudien

Die drei großen epidemiologischen Studien, die mit Kindern seit 1990 u.a. zur Frage der Auswirkungen von Fluglärm auf die kognitive Leistungsfähigkeit durchgeführt wurden, sind durch unterschiedliche Fallzahlen, Studiendesigns und -methoden gekennzeichnet (Längsschnittuntersuchung München: rund 300 Kinder; Querschnittstudien London: jeweils 4 bzw. 10 Schulen mit hoher und geringerer Fluglärmbelastung mit rund 340 bis 450 Kindern bzw. 123 Schulen mit unterschiedlicher Fluglärmbelastung und rund 11.000 Kindern; RANCH: Querschnittstudie in 89 Schulen mit unterschiedlicher Fluglärmbelastung mit identischem Studiendesign in drei Ländern mit ca. 2850 Kindern).

Die Münchner Studie berücksichtigte die Fluglärmbelastung im Wohnumfeld der Kinder, die Londoner Untersuchungen betrachteten primär die Lärmbelastung an den Schulen der Kinder. In der RANCH-Studie wurde sowohl die Exposition gegenüber Fluglärm als auch gegenüber Straßenverkehrslärm an der Schule, teilweise auch in der Wohnung der Kinder untersucht.

In allen drei Studien wurden Auswirkungen des Fluglärms - neben einer erhöhten Belästigung der exponierten Kinder (siehe dazu auch Kapitel 3) - auf bestimmte kognitive Leistungen beobachtet.

Bei Lesetests schnitten höher lärmexponierte Kinder - zwar nicht bei allen Aufgaben insgesamt - aber insbesondere bei schwierigen Items signifikant schlechter ab als Kinder mit geringerer Fluglärmexposition. Nur beim Vergleich von jeweils 10 Schulen in London mit etwas geringerem Lärmgradienten waren diese Unterschiede nach Korrektur für Störvariable nicht mehr signifikant.

Weniger Übereinstimmungen wurden zu Effekten auf das Gedächtnis gefunden. In der Münchner Studie wurden teilweise signifikante Auswirkungen des Fluglärms auf das Lang- und Kurzzeitgedächtnis festgestellt. Mit einer Ausnahme konnten diese Ergebnisse in den verschiedenen Schulvergleichen in London sowie in der großen RANCH-Studie nicht beobachtet werden.

Die Daueraufmerksamkeitsleistung war in der Münchner Studie und in der Nachuntersuchung von jeweils 4 Schulen in London in der fluglärmbelasteten Gruppe signifikant schlechter. Bei dem Vergleich von jeweils 10 Schulen in London und in der RANCH-Studie zeigte sich dieser Effekt jedoch nicht.

Während in der Londoner Studie keine Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung und psychischer Gesundheit sowie Verhaltensproblemen festgestellt wurden, war bei der

Untersuchung der 2 x 10 Schulen in London die Fluglärmbelastung schwach mit Hyperaktivität und psychischer Beeinträchtigung assoziiert. Auch in der RANCH-Studie ließen sich keine Zusammenhänge zwischen Fluglärm und psychischer Gesundheit nachweisen.

### **4.2 Beeinträchtigungen des Wohlbefindens und Belästigungen durch Fluglärm**

#### **4.2.1 Grundlagen**

Dem Lärmbegriff liegt jenseits physikalischer Indizes eine subjektive Komponente zu Grunde. Das bedeutet, dass Lärm für den Menschen nicht nur die Einwirkung eines physikalischen Reizes, sondern ein „Erlebnis“ darstellt. In Abhängigkeit von Art, Intensität, Dauer und Häufigkeit des Auftretens dieser „Lärmerlebnisse“ und einer Reihe anderer situativer und personenbezogener Faktoren kann es zu Belästigungsreaktionen kommen.

Kaum ein anderer Umweltreiz führt wie unerwünschter Schall zu Belästigung und Gestörtheit, die in der Folge zu anhaltenden Störungen des Wohlbefindens und zu Beeinträchtigungen der Gesundheit führen können. Bestehen diese Beeinträchtigungen über längere Zeiträume hinweg, so sind Auswirkungen auf Risikofaktoren und Erkrankungen nicht auszuschließen, wenngleich im Einzelfall solche Effekte nur schwer oder gar nicht nachweisbar sind.

Unter Belästigung (annoyance) wird in diesem Zusammenhang nicht die negative Reaktion (i.S. eines Gestörtseins) in einem speziellen Bereich (z.B. Kommunikation, Erholung, Freizeitverhalten) verstanden, sondern eine integrative Beurteilung aller in einer bestimmten Situation mit der Lärmeinwirkung einhergehenden Empfindungen.

Belästigungen durch Lärm kommen u.a. zustande durch:

- Störungen von Tätigkeiten (z.B. Entspannen, geistige Arbeit)
- Störungen der Kommunikation (z.B. Gespräche, Unterricht)
- Nicht erfüllte Erwartungen (z.B. Ruhe am Abend)
- Störung der Erholung (z.B. während des Wochenendes)
- Geringe Akzeptanz der Quelle (z.B. Betriebsnotwendigkeit nicht nachvollziehbar)
- Erzwungenes Verhalten (z.B. erhöhte Konzentration, Aufenthalt in Innenräumen, Schließen der Fenster)

Belästigung drückt sich z. B. durch Unwohlsein, diffuse Angst, Bedrohungsgefühl, Ärger, Erregbarkeit, eingeschränktes Freiheitserleben oder Wehrlosigkeit aus.



Die Frage welche Bedeutung akustischen Faktoren bei der Lärmbelastigung zukommt, wurde in zahlreichen Untersuchungen behandelt. In älteren Studien ergibt sich größenordnungsmäßig, dass etwa ein Drittel der Varianz der Belästigungsreaktionen durch akustische Faktoren und etwa ein weiteres Drittel durch nicht-akustische Faktoren erklärt werden kann, während das restliche Drittel ungeklärt bleibt (Guski 1978; Guski 1999). In einem zusammenfassenden Reviewartikel wurde festgestellt, dass akustische Faktoren eingeschränkt auf den Lärmpegel nur etwa 9-29% der Varianz der individuellen Lärmreaktionen erklärt und dieser Anteil in den meisten Fällen weniger als 20% beträgt (Job 1988). In Belästigungsstudien zu Fluglärm, wie der Schweizer Lärmstudie zum Flughafen Zürich-Kloten (Wirth et al. 2004) und der Fluglärmbelästigungsstudie im Umfeld des Frankfurter Flughafens (Schreckenber & Meis 2007), erklärten die Fluglärmpegel nur maximal 15% (in Zürich) bis maximal 20% (in Frankfurt) der Varianz der Belästigung. Insgesamt wiesen die äquivalenten Dauerschallpegel den stärksten Zusammenhang auf. Dieser Zusammenhang war für die Nachtpegel schwächer ausgeprägt.

### **4.2.2 Belästigungshäufigkeit nach Lärmquellen**

Laut Mikrozensus für 2007 (Statistik Austria) fühlten sich 38,9% der Österreicher in ihrer Wohnung durch Lärm belastet (3,9% sehr stark, 6,6% stark). Die gesamte Lärmbelastung stieg zwischen 2003 und 2007 von 29,1% auf 38,9%, wobei insbesondere der Anteil jener Personen, der sich durch Lärm zumindest „geringfügig“ beeinträchtigt fühlt, stark gestiegen ist.

Die bedeutendste Lärmquelle stellte der Verkehr mit 64,2% dar. Im Vergleich zu 2003 (73,5%) ging seine Bedeutung aber erkennbar zurück. Die Lärmstörung durch andere Lärmquellen (Lokale, Betriebe, Baustellen, Nachbarwohnungen, Freizeit- und Tourismuseinrichtungen bzw. -veranstaltungen) ist im selben Ausmaß gewachsen, von 26,5% (2003) auf 35,8% (2007).

Entsprechend der geringeren räumlichen Ausdehnung von Wohngebieten mit Fluglärmimmissionen ist der Anteil derer unter den durch Verkehrslärm gestörten Personen, die den Flugverkehr als Quelle der Lärmstörung angeben, nur 6,5%. Mit 42,3% war der Anteil der durch Pkw-Verkehr gestörten am größten gefolgt vom Lkw- und Busverkehr (27,8%). Gebietsweise unterscheidet sich die Belastung durch Fluglärm jedoch stark, wenn in der entsprechenden Region ein Flughafen liegt.

In Österreich gibt es sechs Flughäfen - Wien, Graz, Innsbruck, Klagenfurt, Linz und Salzburg - für den kommerziellen Luftverkehr (Linien- und Bedarfsverkehr). Etwa drei Viertel der Flugbewegungen (An- und Abflüge) finden am Flughafen Wien statt. Auf die Stadt Salzburg

entfallen 6,6% der Flugbewegungen, auf Graz 5,4%, auf Innsbruck und Linz 4,3% und auf Klagenfurt 2,6%. Daneben gibt es Militär- und Sportflugeinrichtungen.

Während sich daher im Österreichdurchschnitt 6,5% der verkehrslärmbelästigten Bevölkerung durch Fluglärm beeinträchtigt fühlen, sind es im Südteil des Wiener Umlandes 22,7%, in Innsbruck 18,0%, in der westlichen Obersteiermark 12,4%.

### **4.2.3 Intensität der Belästigung durch verschiedene Verkehrsträger**

Durch Zusammenfassung der Daten vieler Studien („gepoolte Analyse“) ergaben sich klare Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Belästigungsreaktionen und Lärmexpositionen (Miedema et al. 1998; Miedema & Oudshoorn 2001; Fidell et al. 1991). Dosis-Wirkungsbeziehungen wurden zwecks Konformität mit der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG auf Basis von  $L_{den}$  Werten als Dosisvariable erstellt. Die sogenannten Miedema-Kurven zeigen, dass Fluglärm, bei gleichen Dosiswerten, stärker belästigend als Straßenlärm und dieser stärker belästigend als Schienenlärm wirkt (Miedema & Oudshoorn 2001; EC 2002).

Neuere Erhebungen deuten darauf hin, dass es in der Umgebung von Flughäfen in höheren Raten zu Belästigungsreaktionen kommt, als durch die Miedema-Kurve vorausgesagt (van Kempen et al. 2005; Schreckenberget al. 2007; Babisch et al. 2007a). Diese Daten geben Anlass zur Vermutung, dass sich die Fluglärmelastigung bei vergleichbaren Pegeln über die Zeit verändert hat (Guski 2004).

Studien, die zeitliche Trends von Fluglärmelastigungen berücksichtigen, wurden in Sydney und in Amsterdam durchgeführt. Im Umfeld des Flughafens Amsterdam Schiphol wurde ein Anstieg der Belästigung in den Jahren 1967 bis 1996 beobachtet, mit Werten, die zuletzt über denen der Miedema-Kurve lagen (TNO 1998). Im Jahre 2003 wurde eine neue, zusätzliche Piste eröffnet, bei deren Errichtung der „umweltfreundliche“ Aspekt betont wurde, nämlich, dass es dadurch möglich wurde, über weniger dicht besiedelte Gebiete starten und landen zu können. Die folgenden Auswertungen im Rahmen dieser Langzeitstudie ergaben, dass zunächst der Anteil der „stark Belästigten“ in einem kleinen Anteil der Bevölkerung, welcher stark und neu exponiert war, anstieg. Dieser Anteil nahm im Jahr 2005 tendenziell wieder ab (Breugelmans et al. 2007). Die Gesamtbilanz zeigte, dass Belästigungsreaktionen auf lokaler Ebene stark schwanken können, aber insgesamt der Prozentsatz der „stark Belästigten“ seit 1996 abnahm (Houthuijs 2006).

In der Fluglärmelastigungsstudie im Umfeld des Frankfurter Flughafens wurden auch stündlich erfasste Belästigungsreaktionen bei gleichem  $L_{eq}$  im Bezug auf die Anzahl der Überflüge untersucht (Schreckenberget Meis 2006). Es zeigte sich, dass mit Einbeziehung der Anzahl der Überflüge eine zusätzliche Aufklärung der Varianz um 3-4%, und dies nur in

den kritischen Tagesrandstunden, frühmorgens und spätabends, im Vergleich zum korrespondierenden Stunden- $L_{eq}$  erreicht wurde, was wegen der hohen Korrelation zwischen der Zahl der Überflüge und dem  $L_{eq}$  auch nicht anders zu erwarten war. Da bei gleichem  $L_{eq}$  aber höherer Zahl von Überflügen die Ereignispegel geringer sein müssen, ergibt sich daraus, dass eine zunehmende Zahl von Flugereignissen leisere Ereignispegel hinsichtlich der Belästigungsreaktion mehr als kompensieren kann.

Trotzdem zeigen die bisher vorliegenden Untersuchungen, dass keine der verschiedenen bisher untersuchten Indikatoren der Schallsituation die Unterschiede in den Belästigungsreaktion weitgehend bestimmen, sondern dass auch nicht-akustische Faktoren wie Merkmale der Person, der Situation, der Umwelt und sozio-kulturelle Faktoren eine entscheidende Rolle spielen.

Belästigungsstudien in der Umgebung des Flughafens Sydney zeigten, dass bei Änderungen der Belastungsbedingungen im zeitlichen Verlauf - vor, ein Jahr nach und 6 Jahre nach einer Erweiterung durch eine zusätzliche Piste - die Einstellung der Betroffenen, insbesondere das Vertrauen in die Verantwortlichen, dass diese alles tun, um die Belastung so gering wie möglich zu halten, einen starken Einfluss auf die Belästigung haben (Job et al. 2007). Auch die wahrgenommene Unkontrollierbarkeit der Lärmsituation, welche in einem Ohnmachtsgefühl und Hilflosigkeit („learned helplessness“) münden kann, war ein stärkerer Prädiktor für bestimmte Reaktionen (z.B. Betroffenheit, Unzufriedenheit) (Hatfield et al. 2002; Hatfield et al. 2007).

Laborstudien bestätigen die Bedeutung der wahrgenommenen Kontrolle („perceived control“) für die Belästigungsreaktionen (Stallen 1999; Maris et al. 2007). Probanden, die einem störenden Fluglärmpegel während einer geistigen Aufgabe ausgesetzt waren, gaben signifikant geringere Belästigungsreaktionen an, wenn sie am Entscheidungsprozess teilnehmen und auswählen konnten, welchem Fluggeräusch sie während der Arbeit ausgesetzt werden. In Wirklichkeit wurden aber allen Probanden, auch jenen der Kontrollgruppe, die nicht wählen durften, die gleichen Fluggeräusche vorgespielt.

Auch Felduntersuchungen zeigen, dass die Einbeziehung der Bevölkerung positive Auswirkungen auf die Belästigungsreaktionen hat, selbst wenn diese Einbeziehung erst nach der Entscheidungsfindung einsetzt (Lind et al. 1990). Die Teilnahme an den Diskussionen war für die betroffenen Personen wichtiger als die Kontrolle über die Festlegung der Maßnahmen (Tyler 2000).

Die Bedeutung der Belästigungsreaktion für die Entwicklung und Ausprägung gesundheitlicher Beschwerden ist nicht eindeutig zu quantifizieren, selbst dann nicht, wenn man subjektive Gesundheitsindikatoren heranzieht (Schreckenberget al. 2007; Houthuijs et

al. 2006). Eine Fragebogenerhebung an ca. 12.000 Personen in der Umgebung des Flughafens von Tokyo, Narita, erbrachte keinen Zusammenhang zwischen Fluglärmpegeln und selbstberichteten gesundheitsbezogenen Beeinträchtigungen (Miyakawa et al. 2008).

Die Zusammenschau internationaler Studien, bei denen die Belästigung gegenüber Lärm durch die verschiedenen Verkehrsarten sowie die Exposition vergleichbar erfasst wurden, hat ergeben, dass die Belästigung bei gleicher (energieäquivalenter) Belastung in dieser Reihenfolge zunimmt: Schiene < Straße < Flug. Allerdings gibt es auch neuere Daten, die – vermutlich aufgrund der geänderten Ereignisfrequenz – den Schienenlärm zwischen Straßen- und Fluglärm verorten.

Beispielsweise zeigte sich auch in der RANCH-Studie, dass Flug- und Straßenlärm signifikant mit der Belästigung korrelierten, die Lärmbelastung durch Fluglärm aber stärker ausgeprägt ist (Stansfeld et al. 2005).

Wie auch aus anderen Studien bekannt (z.B. Bullinger et al. 1998), zeigte sich in der RANCH-Studie, dass es mit zunehmendem Fluglärm zu einer Zunahme der subjektiven Gestörtheit (annoyance) in diesem Fall von Kindern kommt. Wie aus Abb. 3 ersichtlich, ist der Anstieg der Dosis-Wirkungskurve in den höheren Pegelbereichen steiler.

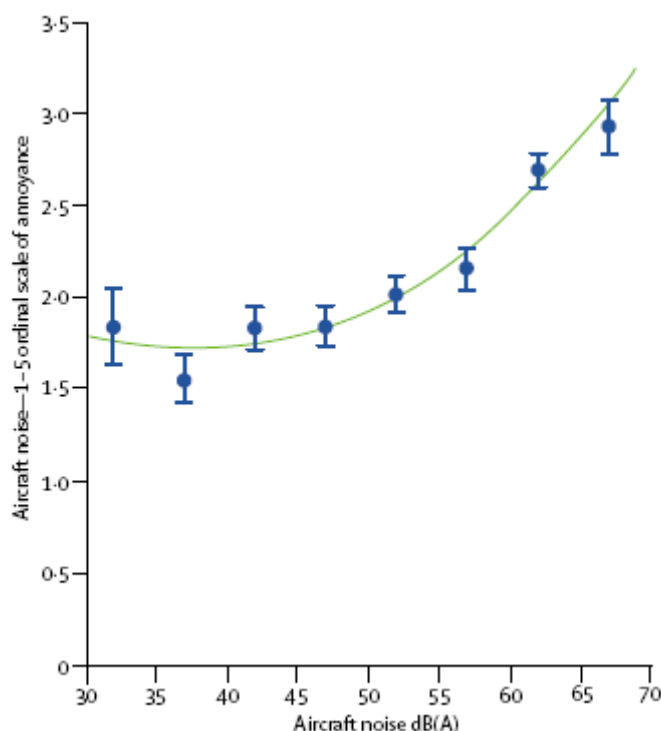


Abb. 3: Subjektive Gestörtheit (annoyance) in Abhängigkeit vom  $L_{day}$  außen am Ort der Schule (aus: Stansfeld et al. 2005)

In der Belästigungsstudie am Flughafen Frankfurt (Schreckenber & Meis 2007) zeigte sich bei der Betrachtung des Zusammenwirkens verschiedener Verkehrslärmquellen, dass die Gesamtlärmbelästigung im Wohngebiet am stärksten durch die Fluglärmbelästigung bedingt ist. Weitere zusätzliche Lärmquellen (Straßenlärm, Schienenlärm) hatten sowohl auf die Gesamtbelästigung als auch auf die Fluglärmbelästigung keinen bedeutsamen Einfluss.

In einer experimentellen Untersuchung im Rahmen der DLR-Studie (Quehl & Basner 2008) mit nächtlicher Verkehrslärmexposition wurde Straßen-, Schienen- und Fluglärm allein und in Kombination dargeboten. Die Probanden, die zwei oder mehrere Lärmarten wahrgenommen hatten, wurden gefragt, welche sie stärker bzw. am stärksten belästigt hatte. Daraus ergab sich, dass Fluglärm stärker belästigend wirkte als Schienen- oder Straßenlärm. Dabei kann jedoch die Tatsache, dass unter den dargebotenen Ereignissen der Fluglärm eine deutlich längere Dauer der Einzelereignisse aufwies, entscheidend gewesen sein. Denn je länger die Dauer, umso größer die Wahrscheinlichkeit, dass das Lärmereignis bewusst wahrgenommen wird. Das wiederum ist eine Voraussetzung für die Zuordnung der Belästigung zu einem Verursacher.

Dosis-Wirkungskurven für die im Feld wie auch die experimentell ermittelten Belästigungsreaktionen berichten Quehl und Basner (2006). Die Auswirkungen von nächtlichem Fluglärm wurde einerseits auf Basis des maximalen Ereignispegels  $L_{AS,max}$  in Kombination mit der Zahl der Flugereignisse, andererseits auf Basis des  $L_{AS,eq}$  mittels logistischer Regression untersucht. Dabei wurden bei der experimentellen Untersuchung 128 Personen im Schlaflabor und in der Felduntersuchung 64 Anrainer des Flughafens Köln/Bonn getestet. Es zeigte sich ein klarer Anstieg des Anteils belästigter Personen mit dem  $L_{AS,max}$  und der Zahl der Flugereignisse. In der experimentellen Untersuchung konnte auch bis etwa 50 dB ein klarer Anstieg mit dem  $L_{AS,eq}$  ermittelt werden. Oberhalb von 50 dB sank dieser Anteil, weil die Zahl der Ereignisse bei wachsenden Maximalpegeln in diesen Bedingungen abnahm. Die Felduntersuchung ergab ebenfalls ansteigende Dosis-Wirkungsbeziehungen, allerdings waren die Kurven flacher als in der Laborsituation, was vermutlich auf die schlechtere Schlafqualität im Labor zurückzuführen ist. Diese Untersuchung ist deshalb von großer Bedeutung, weil sie klar die Bedeutung der Anzahl der Schallereignisse neben dem energieäquivalenten Dauerschallpegel aufzeigt.

#### **4.2.4 Wirkung von Lärm auf Kommunikation**

Zur Frage der Wirkung von Lärm auf die Kommunikation liegen Ergebnisse einzelner sozialpsychologischer Erhebungen vor. Die direkte Störung der Sprachverständlichkeit dürfte demnach auch eine der Ursachen für soziale Isolierung sein. Der Zwang zu Erhöhung der Stimmlautstärke beeinflusst die Belästigungsreaktionen.

Frühere Untersuchungen zeigten, dass die Sprachverständlichkeit in Innenräumen bei einem Meter Entfernung und normal lauter Stimme bei einem gleichmäßigen Hintergrundgeräusch von bis zu 45 dB nicht verändert ist und bei 60 dB noch über 95% beträgt (USEPA 1974). Demgegenüber stellt der Interdisziplinäre Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen (UBA Berlin 1985) fest, dass für normalhörende Erwachsene in Räumen üblicher Größe und Möblierung eine gute Sprachverständlichkeit erhalten bleibt, wenn bei entspannter Sprechweise der Störgeräuschpegel unter 40 dB(A) liegt. Einen Richtwert von 40 dB(A) zur Vermeidung von Kommunikationsstörungen in Innenräumen geben Griefahn et al. (2002) an, was für Außengeräusche bei geschlossenen Fenstern einem  $L_{eq}$  von 61-65 dB entspricht.

Außerhalb von Gebäuden ist mit Störungen der Kommunikation am Tage bei Lärmpegeln oberhalb etwa  $L_{eq}$  50-55 dB zu rechnen (UBA Berlin 1985). Dosis-Wirkungsbeziehungen zeigen, dass der Anteil wesentlich gestörter Personen bei 65 dB bereits über 25% und bei 75 dB über 50% liegt.

### **4.3 Physikalische Aspekte**

#### **4.3.1 Innen- vs. Außenpegel**

Für Quellen im Außenraum (d.h. außerhalb eines Gebäudes) gibt es gut validierte Schallausbreitungsmodelle, die den Schallpegel außen (z.B. vor der Fassade eines Wohnhauses) in guter Näherung ermitteln. Da sich ein Großteil des Lebens in Innenräumen vollzieht, sind aber die Schallpegel im Innenraum oftmals relevanter für die gesundheitliche Bewertung (z.B. Höhe der Schallpegel am Ohr des Schlafenden).

Um auf Basis von Außenpegeln den Pegel im Inneren zu berechnen, muss die spezifische Dämmwirkung des Gebäudes und seiner Teile bekannt sein. Die Dämmwirkung hängt u.a. von der der spezifischen Dichte, dem Querschnitt und dem Material des Mauerwerks, dem Anteil der Fensterflächen in der Fassade, der Fenstergeometrie und der Konstruktion der Fenster ab. Bei Fluglärm spielt zudem die Dachkonstruktion eine Rolle. Neben dem Außenpegel ist der Einfallswinkel der Schallwellen bedeutsam. Daher kann der exakte Dämmwert nur bei genauer Betrachtung des betroffenen Objektes angegeben werden.

Durch den Einbau geeigneter passiver Schallschutzmaßnahmen (Optimierung des Schallschutzes der Fassade durch Schallschutzfenster und/oder durch eine zusätzliche vorgesetzte Fassadenebene etc.) sind erhebliche Pegelminderungen im Innenraum erzielbar. Die volle Dämmwirkung ist jedoch in solchen Fällen nur bei geschlossenen Fenstern zu erzielen. Dabei ist zu beachten, dass selbst bei eingebauter mechanischer

Lüftung Bewohner fallweise ihre Fenster öffnen wollen. Wenn keine mechanische Lüftung mit Kühlung vorhanden ist, müssen aus wohnmedizinischer Sicht die Fenster wenigstens fallweise (zur Stosslüftung, zur nächtlichen Kühlung im Sommer) geöffnet werden. Der Zwang, Fenster geschlossen zu halten, stellt unabhängig vom Vorhandensein einer mechanischen Lüftung eine Einschränkung und eine Belästigungsquelle dar.

Die Dämmwirkung herkömmlicher Fenster im geschlossenen, geöffneten und gekippten (Spaltlüftung) Zustand unterliegt einer großen Schwankungsbreite (siehe dazu auch Kapitel 5.4). Deshalb sind die Außenpegel oft für die Beurteilung geeigneter, weil die durch die Unsicherheiten und Variationen der Dämmwerte von Gebäuden im zu beurteilenden Gebiet eine zu starke Schwankungsbreite in den Prognosen resultiert.

Ein weiterer Grund, warum die Außenpegel unmittelbar medizinisch zu beurteilen sind, liegt darin, dass auch der Außenraum von Menschen (Balkone, Terrassen, Gärten) zu Erholungszwecken genutzt wird. Das Ausmaß der Nutzung des Außenraumes hängt dabei unter anderem auch von der Siedlungsstruktur bzw. Bebauung ab. Es ist daher auch auf unterschiedliche Nutzungsbedingungen zurückzuführen, dass der gleiche Schallpegel in einem städtischen Setting im Durchschnitt weniger ausgeprägte Wirkungen zeigt wie im ländlichen bzw. dörflichen Umfeld. Der Schutz des Freiraumes ist daher ebenfalls in ausreichendem Maße zu gewährleisten.

### **4.3.2 Effizienz von Lärminderungsmaßnahmen**

Bei der Reduktion der Lärmbelastung sind drei Strategien denkbar:

- Maßnahmen des aktiven Schallschutzes

Darunter versteht man die Reduktion der Schallemission an der Quelle, d.h. bei Fluglärm der Einsatz leiserer Flugzeugtypen und Maschinen, die Reduktion der Anzahl von Überflügen oder die Verlagerung von Flugrouten. In diesem Zusammenhang sind also der technische Schallschutz und Raumplanung bzw. Raumordnung die wesentlichen strategischen Mittel.

- Organisatorische Maßnahmen

Hier sind vor allem Zeitbeschränkungen zu nennen, worunter besonders Beschränkungen des Flugverkehrs während sensibler Tageszeiten (Abend, Nacht) fallen.

- Maßnahmen des passiven Schallschutzes

Unter passivem Schallschutz versteht man die Behinderung der Ausbreitung und/oder der Immission unvermeidlich entstehender Schallemissionen (z.B. Schallschutzfenster). Diese Maßnahmen sollten immer nur als letzter Ausweg betrachtet werden, da sie mit einer Reihe

von Nachteilen verbunden sind (z.B. Behinderung der Lüftung, erzwungene Isolation, eingeschränkte Nutzung des Außenraums).

In der Umgebung nationaler und internationaler Flugplätze, deren flugtechnische Einrichtungen festliegen, sind folgende Maßnahmen zur Lärminderung möglich:

- Optimierung der Aufteilung der Flugbewegungen auf die möglichen Start-, Landerichtungen und Flugrouten
- die Festlegung bestimmter lärmmindernder Flugverfahren (entsprechende Optimierung von operationellen Maßnahmen wie z.B. von Steiggeschwindigkeit / Flughöhe)
- Verteuerung der Gebühren für Flugzeuge mit hohen Schallemissionen.

Eine Voraussetzung für den Erfolg der Umsetzung dieser Maßnahmen ist – wenn keine sicherheitstechnischen Erfordernisse dagegen sprechen - eine durch die Anrainer nachvollziehbare und transparente Überwachung der Einhaltung der vereinbarten Flugwege (Flugkorridore) und -häufigkeiten (z.B. stationäre automatische Messstation mit geeigneter Fernabfragemöglichkeit). Dies dient nicht nur als vertrauensbildende Maßnahme der Überprüfung durch die Bevölkerung, sondern kann auch als partielle Kontrolle der Situation durch die Anrainer erlebt werden und dadurch die Belästigungsreaktion mindern oder beseitigen. Eine Verpflichtung zur Erarbeitung, Förderung und Durchführung einer regelmäßigen Optimierung dieser lärmmindernden Maßnahmen unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts ist in Analogie zum Arbeitnehmerschutz empfehlenswert.

Erst wenn diese Möglichkeiten der Lärmreduktion ausgeschöpft sind, ist der objektseitige, technische Schallschutz heranzuziehen. Dazu zählt die Optimierung des Schallschutzes der Fassade durch entsprechende Schallschutzfenster bzw. durch eine zusätzliche vorgeseetzte Fassadenebene. Auch Maßnahmen zum Freiraumschutz sollen erwogen werden (z.B. Förderung von Wintergärten).

Anzumerken ist, dass auch die Raumplanung vermehrt in Überlegungen zum präventiven Lärmschutz miteinbezogen werden muss. Beispielsweise ist sicherzustellen, dass Gebiete, die in ausgewiesenen Lärmzonen höherer Belastung rund um Flughäfen liegen, in Zukunft nicht in Bauland-Wohngebiet umgewidmet werden.

### **4.3.3 Mittelungs- und Maximalpegel**

Physiologisch und pathophysiologisch wirksam sind die einzelnen Schallereignisse, die unter anderem durch ihre Lautstärke und die Häufigkeit ihres Auftretens charakterisiert sind. Neben diesen beiden Kriterien spielen jedoch auch der Zeitpunkt des Auftretens, das Frequenzspektrum und der zeitliche Verlauf der einzelnen Schallereignisse eine wichtige



Rolle. Alle diese für Belästigung und Gesundheitswirkung wichtigen Faktoren bleiben unberücksichtigt, wenn die Diskussion auf den Schallpegel beschränkt wird.

Das einzelne Schallereignis wird in der Regel durch seinen Maximalpegel ( $L_{A,max}$ ) charakterisiert. Dabei zeichnet sich das einzelne Schallereignis bei beweglichen Schallquellen, wie sie für Verkehrslärm jeglicher Art und insbesondere auch für Fluglärm charakteristisch sind, durch ein (mehr oder weniger langsames) Anschwellen und danach wieder Abschwellen aus. Alternativ wird daher fallweise ein über die Dauer des Ereignisses gemittelter Ereignispegel angegeben. Pathophysiologisch bedeutsamer ist jedoch zumeist der Maximalpegel.

Die Bedeutung von Schallereignissen für Gesundheit und Wohlbefinden wächst mit zunehmendem Pegel und zunehmender Häufigkeit. Daher bietet sich eine Kombination von Lautstärke und Häufigkeit an, die im Prinzip von einem Mittelungspegel wie dem energieäquivalenten Dauerschallpegel geleistet wird. Es ist allerdings nicht anzunehmen, dass für jeden gesundheitlichen Endpunkt das gleiche Wichtungsverhältnis zwischen den beiden Komponenten besteht: Für den einen Endpunkt kann die Zahl der Ereignisse (mit einem Spitzenpegel über einer gewissen Schwelle) bedeutsamer sein, für einen anderen Endpunkt die maximal erreichten Pegel. Für die meisten Endpunkte ist die Datenlage aber nicht ausreichend, um eine exakte Formel für die Kombination von Pegel und Häufigkeit anzugeben. Daher bietet sich der energieäquivalente Dauerschallpegel als praktikable Alternative an. Sein Vorteil besteht darin, dass er physikalisch relativ einfach zu interpretieren ist und dass auch andere Schallquellen sowie die Vorbelastung in dieser Maßeinheit bestimmt werden.

Neben dem energieäquivalenten Dauerschallpegel sind bestimmte Varianten gebräuchlich. So werden beispielsweise für bestimmte Geräusche Zuschläge oder Abschläge vergeben oder die Pegel werden je nach Tageszeit (z.B.  $L_{den}$  – Day, Evening, Night) unterschiedlich gewichtet. Eine interessante Variante findet sich in früheren bundesdeutschen Regelungen, wo für Fluglärm, insbesondere für kleine Flughäfen, ein  $L_{eq}(4)$  berechnet wird. Nach den Regeln der Physik erhöht sich der Schallpegel um 3 dB, wenn die Schallstärke verdoppelt wird. Beim  $L_{eq}(4)$  wird der Pegel jedoch um 4 dB erhöht, wenn sich die Anzahl der Ereignisse (Überflüge) verdoppelt. Des Weiteren können sich die ausgewiesenen Mittelungspegel auch danach unterscheiden, welche Mittelungszeit zur Berechnung herangezogen wird. Dies betrifft sowohl saisonal wie tageszeitlich schwankende Belastungen.

Neben der Häufigkeit der Schallereignisse kann auch das zeitliche Intervall zwischen den Ereignissen, also ihre zeitliche Verteilung, von Bedeutung sein. So könnte etwa eine kurze

Aufeinanderfolge zweier Ereignisse den Schlaf stärker beeinträchtigen (das erste Ereignis könnte nur die Schlaftiefe reduzieren, während das zweite dann zur Aufwachreaktion führt).

Da die reale Situation also komplexer ist oder sein kann, als durch die summativen Angaben der Gesamtzahl der Ereignisse oder des  $L_{Aeq}$  abgebildet wird, ist in den Untersuchungen mit einer erheblichen Streuung der Wirkungsgrößen aufgrund der Fehlklassifikation der Exposition zu rechnen. Dies gilt insbesondere für akute Belastungsmaße wie die Sekretion von Stresshormonen oder die Müdigkeit während des Tages.

Es ist im Allgemeinen wesentlich einfacher, einen Mittelungspegel anzugeben als die Zahl der Schallereignisse je nach Maximalpegel zu ermitteln. Zur besseren Vergleichbarkeit der Angaben sollten aber bei Fluglärm jedenfalls auch die ausführlicheren Daten zu den Einzelereignissen (z.B. in Klassen zu je 5 dB) angegeben werden. Der energieäquivalente Dauerschallpegel sollte für die ungünstigsten (lautesten) drei Monate berechnet und für Tag, Abend und Nacht getrennt ausgewiesen werden. Falls in einem Teil der Nacht kein Betrieb erfolgt, ist dies darzustellen und der Dauerschallpegel für jenen Teil der Nacht, in welchem Flugbetrieb stattfindet, gesondert anzugeben. Wie erwähnt, sind aber für die Beurteilung der Störung des Nachtschlafs maximale und mittlere Ereignispegel von größter Bedeutung.

## 5 Gutachten

### 5.1 Ableitung von Immissionsschwellenwerten auf Grundlage der wissenschaftlichen Faktenlage, die eine „unzumutbare Belästigung“ der Nachbarn durch Fluglärm festlegen

#### 5.1.1 Vorbemerkungen

Wie in Kapitel 3 ausgeführt ist eine Belästigung dann unzumutbar, wenn sie zu erheblichen Störungen des Wohlbefindens, zu psychosomatischen Beschwerden bzw. zu funktionellen oder organischen Veränderungen führen kann. Fluglärm kann unter bestimmten Umständen zu erheblichen Störungen des Wohlbefindens und zu funktionellen (z.B. Beeinträchtigungen des Schlafs) oder organischen Veränderungen (vegetativen Reaktionen), ja vermutlich sogar zu manifesten Erkrankungen (Hypertonie) führen. Von den verschiedenen Indikatoren einer Störung des Wohlbefindens und der Gesundheit sind die folgenden nicht nur am besten belegt, sondern es sind auch Daten vorhanden, die einen Dosis-Wirkungszusammenhang quantitativ zu bestimmen gestatten:

- die empfundene Belästigung
- die Beeinträchtigung kognitiver Funktionen bei Kindern
- die Auslösung akuter und chronischer vegetativer Reaktionen
- die Störung des Nachtschlafs

Wie in Kapitel 4.2 dargestellt, sind Belästigungsreaktionen von vielen Faktoren abhängig und können nur zum Teil durch die bekannten Maße der Schalleinwirkungen (Dauerschallpegel, Ereignispegel, Ereignishäufigkeit) vorhergesagt werden. Da hier grundsätzlich jede wahrnehmbare Einwirkung eine Belästigungsreaktion auslösen kann, wäre ein Schutz im Sinne des Richtwertekonzepts nur bei Ereignispegeln deutlich unter dem Basispegel sicher zu stellen. Wir werden weiter unten ausführen, dass es hier notwendig ist, eine außerwissenschaftliche Entscheidung zu treffen, die die Stärke der Belästigung und die Zahl der Personen, die eine derartige Reaktion zeigen, betrifft.

Nach der Definition eines Schadeffektes stellt die Beeinträchtigung kognitiver Funktionen unmittelbar einen solchen Effekt dar. Wenn, wie im Fall von Fluglärm, solche Effekte bei Kindern nachgewiesen werden, dann ist das von besonderer Bedeutung, weil allgemein bei umwelthygienischen Risikobeurteilungen und Richtwertableitungen Kinder als besonders schutzwürdige Gruppe angesehen werden. Obwohl von den verschiedenen untersuchten kognitiven Funktionen nur einige einen klaren Zusammenhang mit der Fluglärmexposition aufwiesen, waren es insbesondere die komplexen Leistungen, die betroffen waren. Da

solche Störungen Folgewirkungen auf die kognitive Entwicklung der Kinder haben können, sind diese Effekte als besonders relevant anzusehen und können im Prinzip zur Ableitung einer Immissionsschwelle herangezogen werden. Da jedoch aufgrund der Vorgaben des § 145b LFG der Lärmschutz nicht für öffentliche Gebäude gilt und die vorliegenden Untersuchungen zwar auch einen Zusammenhang mit der Fluglärmbelastung zuhause ermittelt haben, dieser aber nicht in einer Weise dargestellt wurde, die die Ableitung eines Richtwerts erlauben, werden die in Kapitel 5.1.4 dargestellten Berechnungen für die folgenden Empfehlungen nicht herangezogen.

Akute vegetative Reaktionen auf Fluglärm sind organische Veränderungen im Sinne der Definition unzumutbarer Belästigung, obwohl sie im Allgemeinen, sofern die Zahl und Intensität der Flugereignisse nicht zu hoch sind, innerhalb physiologischer Schwankungsbreiten bleiben. Ihre Bedeutung ergibt sich aus pathophysiologischen Erwägungen und empirischen Hinweisen auf chronische Effekte.

Obwohl die Störung des Nachtschlafs die am häufigsten untersuchte und bekannteste Auswirkung nächtlicher Schallexposition und insbesondere von Fluglärm darstellt und kein Zweifel besteht, dass sie eine Belästigung darstellt, ist die Frage der Zumutbarkeit angesichts der auch durch andere Quellen und Prozesse hervorgerufenen Schlafstörung schwierig zu beantworten und hat hinsichtlich der Schwellenwerte zu heftigen Kontroversen geführt. Ein weiteres Problem liegt darin, dass die Frage, inwiefern chronische Schlafstörungen zu Erkrankungen führen, bis heute nicht befriedigend beantwortet werden kann.

Da wir im Folgenden, je nach vorliegenden Daten, sowohl Pegelangaben als auch Indices wie  $L_{dn}$  oder  $L_{den}$  verwenden, müssen wir darauf hinweisen, dass diese Angaben nicht unmittelbar vergleichbar sind.

### **5.1.2 Auswahl der Schlüsseluntersuchungen**

Untersuchungen, die sich als Basis für die Ableitung von Immissionsschwellenwerten eignen, müssen folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Sie müssen entweder klare Hinweise für einen NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) enthalten (d.h. Expositionswerte, bei denen eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens oder der Gesundheit auftrat sowie Werte bei denen, das nicht der Fall war) oder in einem hinreichend weiten Expositionsbereich eine Dosis-Wirkungsbeziehung abzuleiten gestatten

- sie müssen Daten an Personen erhoben haben, die für die zu schützende Bezugspopulation oder eine sensitive Untergruppe repräsentativ sind
- sie müssen insofern belastbar sein, als wichtige Störvariablen berücksichtigt wurden und Verzerrungen durch methodische Fehler weitgehend ausgeschlossen werden können.

### **5.1.3 Empfundene Belästigung**

Wie im Kapitel 4.2.3 ausgeführt, gibt es unterschiedliche Ansätze zur Untersuchung der Belästigungsreaktionen auf Fluglärm. Von den vorliegenden Untersuchungen können zwei besonders hervorgehoben werden: die gepoolte Analyse von Miedema und Oudshoorn (2001), die mehr als 20000 Personen aus 19 Untersuchungen in die Untersuchung einschloss, und die DLR-Studie (Quehl & Basner 2006, 2008), die für die Nachtsituation experimentelle und Feldbeobachtungen beinhaltet. Hinsichtlich der gepoolten Analyse von Miedema und Oudshoorn (2001) muss man hervorheben, dass die Daten teilweise aus älteren Untersuchungen stammen, welche die heute höhere Frequenz der Flugereignisse bei niedrigeren Ereignispegeln möglicherweise nicht adäquat abbilden. Weiters muss in konkreten Fällen bei substantiellen Änderungen des Flugverkehrs (z.B. Aufhebung des Nachtflugverbots, neue Pisten) und neuen Flughäfen mit weit stärkeren und häufigeren Belästigungsreaktionen gerechnet werden.

Zur Skalierung der Belästigung werden unterschiedliche Methoden verwendet. Die häufigste und in den hier herangezogenen Untersuchungen verwendete Methode ist die Skalierung mittels mehrstufigen Kategorienskalen. Es wurden 3 bis 11 Abstufungen in den verschiedenen Untersuchungen verwendet. Miedema und Oudshoorn (2001) haben mittels eines psychometrisch gut begründeten Verfahrens diese Skalierungen zum Zweck der Datenpoolung auf eine Skala von 0 bis 100 vereinheitlicht. Quehl und Basner (2006, 2008) haben eine 5-stufige Belästigungsskala verwendet.

Bevor diese Untersuchungen im Hinblick auf die Ableitung eines Immissionsschwellenwertes geprüft werden, müssen zwei Fragen behandelt werden:

- 1) Welcher Grad der Belästigung soll als Schwelle angesetzt werden?
- 2) Welcher Anteil der Bezugspopulation, der eine Belästigungsreaktion über dieser Schwelle zeigt, ist tolerabel?

Es ist klar, dass es auf diese Fragen keine wissenschaftlich begründeten Antworten geben kann. Pragmatisch gesehen und unter Berücksichtigung der individuellen und situativen Einflussgrößen auf das Belästigungserleben wird es sinnvoll sein, nicht jede, sondern nur Belästigungen oberhalb der Skalenmitte als Grundlage heranzuziehen. Die Beziehung

zwischen Schallpegel und Grad der Belästigung ist, wenn man situative Einflussgrößen konstant hält, monoton und ohne Sprünge, die auf eine Schwelle hindeuten (Oliva 1998). Miedema und Oudshoorn (2001) haben die Grenze für Belästigung bei einem Wert von 50 auf der Skala von 0 bis 100 angesetzt. Bei der DLR-Studie wurden bei einer 5-stufigen Skala die Kategorien  $\geq 3$  zusammengefasst.

Hinsichtlich der Frage eines tolerablen Anteils belastigter Personen muss eine ‚politische‘ Entscheidung getroffen werden. Bei klimatischer Unbehaglichkeit wird als normative Grenze 15% der Bezugspersonen angesetzt. Das heißt, es werden Normen für das Raumklima so definiert, dass bei deren Einhaltung sich höchstens 15% unbehaglich fühlen. Bei ergonomischen Richtlinien für Sitzmöbel werden 5% als pragmatisches Intoleranzmaß angesetzt, d.h. für 5% der Bezugspopulation sind diese Möbel nicht geeignet. Im Falle von Belästigung durch Lärm wurde vielfach ein Anteil von 25-28% definiert (Fidell et al. 1991; Miedema & Vos 1998; Schultz 1978). Dieser vergleichsweise hohe Anteil der Bezugspopulation, von dem man erwartet, Belästigungsreaktionen zu zeigen, ist nur aus dem allgemeinen Nutzen des Flugverkehrs argumentierbar und kann daher auch nur für solche Fälle angewendet werden, bei denen aus dem Flugverkehr ein solcher Nutzen für die Allgemeinheit resultiert. Nach dieser Argumentation müssen beispielsweise für Sportflugplätze strengere Regeln gelten.

Im Folgenden leiten wir Immissionsschwellenwerte für Belästigungsreaktionen derart ab, dass die Analogie zum Benchmark-Dosis-Verfahren (siehe Kapitel 3.4) erhalten bleibt. Wir geben dabei Werte für tolerable Anteile Belastigter von 10%, 15%, 20% und 25% an. Folgende Immissionswerte werden ermittelt:

- $L_{dn}$  und  $L_{den}$  aus der gepoolten Analyse von Miedema und Oudshoorn (2001)
- $L_{AS,eq}$  und Zahl Ereignisse für den Nachtflugverkehr aus der DLR-Studie

Da hinsichtlich der Frage der Belästigung der/die gesunde, normal Empfindende heranzuziehen ist, muss auf die Anwendung eines Intraspeziesfaktors verzichtet werden, der bei Gesundheitsgefahren zum Schutz sensitiver Subgruppen notwendig ist. Die Unsicherheiten hinsichtlich der Messung der Schallimmission und der Belästigungsreaktion sind bei der Anwendung des Benchmark-Dosis Ansatzes implizit berücksichtigt. Da die Belästigung eine akute Reaktion darstellt, wäre eine Korrektur bzgl. chronischer Effekte anzuwenden, allerdings werden wir im Folgenden solche Endpunkte behandeln, weswegen dies hier unterbleiben kann.

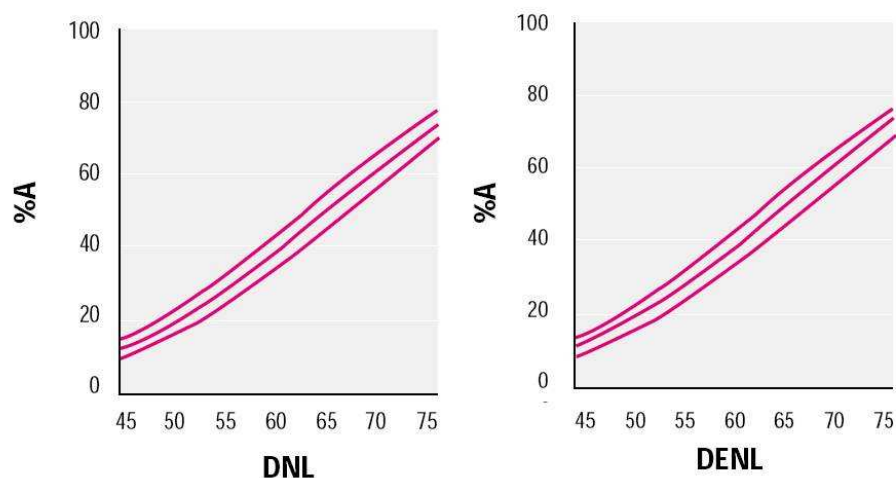


Abb. 4: Erwartungswerte und 95% Konfidenzgrenzen für den Prozentsatz belästigter Personen in Abhängigkeit vom Tag-Nacht  $L_{dn}$  bzw. Tag-Abend-Nacht  $L_{den}$  Pegel. Aus Miedema und Oudshoorn (2001)

Tabelle 5: Ergebnisse der Ermittlung der Immissionsschwellen mittels Benchmark-Methode auf Basis der gepoolten Analyse von Miedema und Oudshoorn (2001)

Tolerabler Anteil belästigter Personen	Immissionsschwelle für $L_{dn}$ [dB(A)]	Immissionsschwelle für $L_{den}$ [dB(A)]
10%	41,5	42,0
15%	44,6	45,1
20%	47,6	48,3
25%	50,4	51,2

Die Ergebnisse der Felduntersuchung bzgl. Belästigung durch Fluglärm der DLR-Studie (Quehl & Basner 2006) wurden mittels logistischem Modell auf die Anzahl Flugereignisse und die äquivalenten Ereignispegel  $L_{AS,eq}$  bzw. deren Kombination bezogen. Wir geben auf Basis der unteren 95%-Konfidenzgrenze der in der genannten Arbeit ermittelten Belästigungsfunktion einerseits Immissionsschwellen für die Anzahl Flugereignisse und Ereignispegel an und geben für deren Kombination Konturkurven für die verschiedenen

Anteile belästigter Personen. Dabei wurden die Konfidenzgrenzen nur jeweils für einen der beiden Parameter (Anzahl Flugereignisse und Ereignispegel) herangezogen.

Tabelle 6: Ergebnisse der Ermittlung der Immissionsschwellen für die nächtlichen Ereignispegel innen und die Zahl Flugereignisse mittels Benchmark-Methode auf Basis der Felduntersuchung der DLR-Studie (Quehl & Basner 2006)

Tolerabler Anteil belästigter Personen	Immissionsschwelle für $L_{AS,eq}$ [dB(A)]	Immissionsschwelle für die Anzahl Ereignisse
10%	16,2	11,0
15%	21,6	27,8
20%	25,7	40,5
25%	29,1	50,9

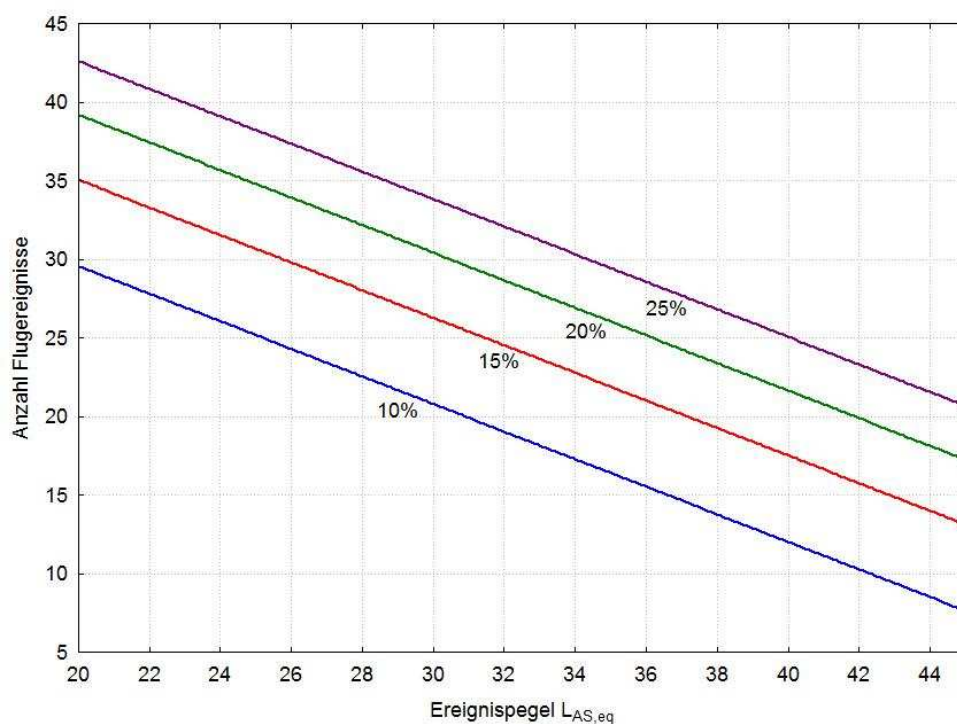


Abb. 5: Kurven gleicher Belästigungsanteile (10%, 15%, 20% und 25%) für die Anzahl Flugereignisse bei bestimmten nächtlichen Ereignispegeln  $L_{AS,eq}$  innen (auf Basis von Quehl & Basner 2006)



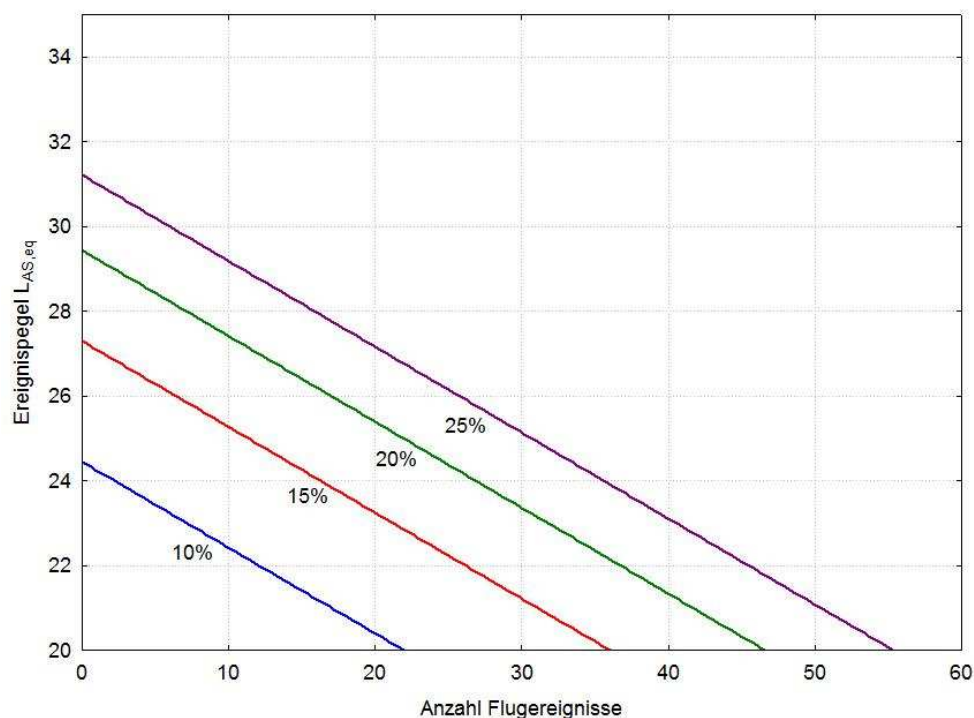


Abb. 6: Kurven gleicher Belästigungsanteile (10%, 15%, 20% und 25%) für die nächtlichen Ereignispegel  $L_{AS,eq}$  innen bei bestimmten Anzahlen von Flugereignisse (auf Basis von Quehl & Basner 2006)

#### 5.1.4 Beeinträchtigung kognitiver Funktionen bei Kindern

Im Kapitel 4.1.3.3 sind wir auf die Untersuchungen zur Beeinträchtigung kognitiver Funktionen bei Kindern eingegangen. Von den vier großen Untersuchungen, ist die RANCH-Studie aus mehreren Gründen für die Ermittlung eines Immissionsschwellenwertes am geeignetsten: Sie ist eine multinationale Studie und ist somit in der Lage, Unterschiede, die auf lokale Besonderheiten zurückgehen, auszugleichen; es wurden darüber hinaus einheitliche Methoden für die Ermittlung des Bezugspegels herangezogen und über einen relevanten Bereich von Fluglärmbelastungen Wirkungen bei Schülern untersucht. Es kann somit auf Basis dieser Untersuchung eine Dosis-Wirkungskurve erstellt werden. Der bedeutsamste und in der RANCH-Studie (Clark et al. 2005; Stansfeld et al. 2005) auch statistisch signifikante Endpunkt war das Leseverständnis. Es handelt sich dabei um eine komplexe Leistung der kognitiven Funktionen, weil es nicht nur um ein automatisiertes Verhalten oder eine einfache Wahrnehmungs-Reaktionsleistung geht, sondern um die gleichzeitige kontrollierte Aktivierung einer Vielzahl mentaler Prozesse (Gedächtnis, assoziative Funktionen etc.).

Da wegen des multinationalen Ansatzes unterschiedliche in den jeweiligen Ländern übliche Lesetests eingesetzt wurden, haben die Autoren zum Zweck der gemeinsamen Analyse eine

Standardisierung vorgenommen. Die auf einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 standardisierten Daten erlauben keine unmittelbare Definition eines Benchmark-Limits, das nicht unterschritten werden sollte. Eine grobe Kalkulation auf Basis der Angaben über die erreichten Punktezahlen ergibt, dass ein Wert von 0, also dem Gesamtmittel, annähernd auch dem zu erreichenden Niveau des Leseverständnisses entspricht. Die Immissionsschwelle wurde daher als Benchmark-Dosis für einen z-Wert von 0 ermittelt.

Unter Berücksichtigung der statistischen Schwankungsbreite ergibt sich eine Immissionsschwelle für die Verhinderung einer Beeinträchtigung des Leseverständnisses von  $L_{\text{day}}$  außen = 45 dB(A).

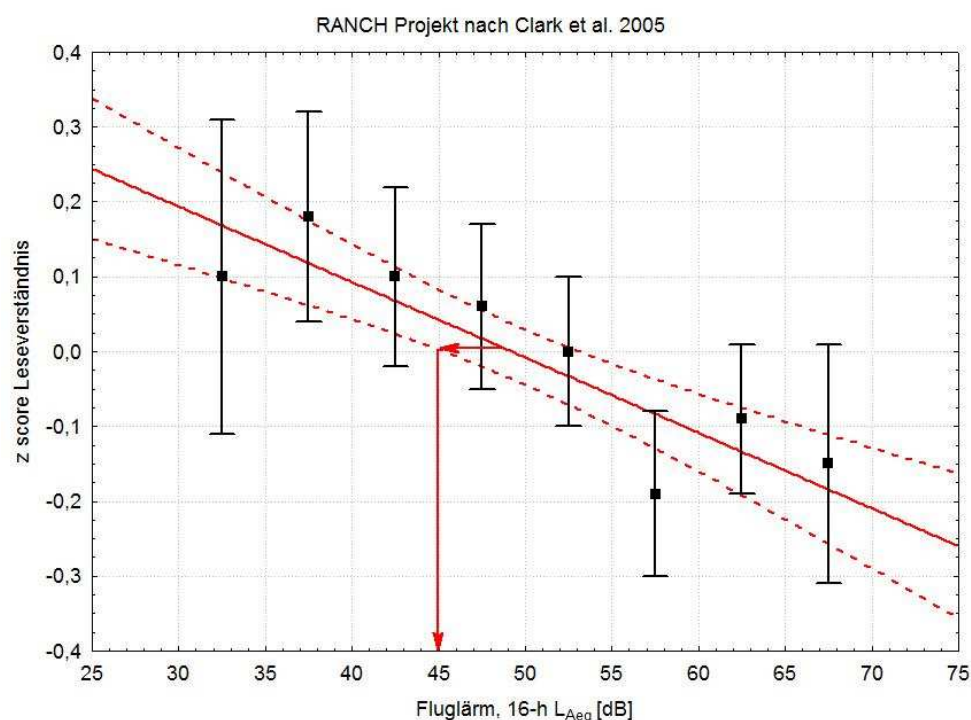


Abb. 7: Ermittlung der Immissionsschwelle für den äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{\text{day}}$  (7.00 bis 23.00 Uhr) außen auf Basis der Beziehung zum Leseverständnis (Quelle: Clark et al. 2005)

### 5.1.5 Auslösung akuter vegetativer Reaktionen und chronischer Störungen

Bei den vegetativen Reaktionen sind die des Herz-Kreislaufsystems bzgl. Fluglärms am ehesten als konsistent anzusehen. Methodische Unterschiede zwischen den Untersuchungen machen einen Vergleich schwierig. Von besonderer Bedeutung ist, dass diese Reaktionen nicht oder kaum habituieren, obwohl eine Habituation auf der Ebene der bewussten Belästigungsreaktionen möglich ist und auch tatsächlich auftritt. Das legt nahe, dass die Funktion des Gehörs als Alarmsinn durch das Wissen um die Natur der wahrgenommenen Geräusche zumindest während des Schlafs nicht unterdrückt werden

kann. Damit ergibt sich aus den akuten Reaktionen auch eine Basis für die pathophysiologischen Überlegungen zu einem Mechanismus für chronische Störungen. Die Erholungsfunktion des Schlafes für das Herz-Kreislaufsystems hängt davon ab, dass dessen Aktivität ein regelmäßiges Minimum erreicht. So sinken Pulsfrequenz, Auswurfvolumen und Blutdruck während der Nacht ab und erreichen zwischen 2.00 und 4.00 Uhr das Minimum. Durch regelmäßige Aktivierung des Kreislaufsystems während der Nacht könnte diese Erholungsfunktion beeinträchtigt werden und dadurch das Ausmaß, in dem andere Belastungen kompensiert werden können, reduziert und damit Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems gefördert werden. Es stellen also akute vegetative Reaktionen während des Schlafes möglicherweise Gesundheitsgefährdungen dar. In einer großen Querschnittsuntersuchung (HYENA-Studie) und einer prospektiven Kohortenstudie (Eriksson et al. 2008) wurden Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung und Hypertonie gefunden, die nahelegen, dass den akuten vegetativen Reaktionen, die im Feld und experimentell beobachtet wurden, tatsächlich eine pathogenetische Bedeutung zukommt.

Von den bisher vorgelegten Untersuchungen zu akuten vegetativen Reaktionen kommt der HYENA-Studie wegen des multizentrischen Ansatzes (vier große Flughäfen) und der Kontrolle anderer als Fluglärmereignisse eine besondere Bedeutung zu und wurde für die Ermittlung einer Immissionsschwelle herangezogen.

Im Felduntersuchungsteil der HYENA-Studie (Haralabidis et al. 2008) wurde pro Fluggeräusch während der Nacht ein Blutdruckanstieg von durchschnittlich 6,2 mmHg systolisch und 7,4 mmHg diastolisch ermittelt. Dabei konnte gezeigt werden, dass es insbesondere der Maximalpegel ist, der diese Reaktion determiniert. Es ist dabei gleichgültig, welche Art von Schallereignis einwirkt. Fluglärm ist daher wegen seines charakteristischen Pegelverlaufes und den kurzzeitig relativ hohen Pegeln im Vergleich zu durchschnittlich gleich hohen aber weniger zeitlich schwankenden Einwirkungen so wirksam, vegetative Reaktionen auszulösen. Für den  $L_{A,max}$  des Fluggeräusches ergab sich ein Anstieg des systolischen BD um ca. 0,7 mmHg pro 5 dB Anstiegs des  $L_{A,max}$  (>35 dB), für den diastolischen waren es ca. 0,6 mmHg. Legt man die statistische Schwankungsbreite dieser Befunde zugrunde und definiert den Cut-off für eine unzumutbare Reaktionsstärke bei einem Anstieg des systolischen BD um 5 mmHg, dann ergibt sich als Immissionsschwelle für den nächtlichen  $L_{A,max}$  innen ein Wert von 60,5 dB(A).

Für die Ableitung von Immissionsschwellen für chronische Effekte wurden die Querschnittsuntersuchung im Rahmen des HYENA-Projektes (Jarup et al. 2008) und die Längsschnittuntersuchung von Eriksson et al. (2008) herangezogen. Beide Untersuchungen erfüllen hohe Qualitätsstandards, wobei die HYENA-Studie durch ihren multizentrischen

Charakter und die Studie von Eriksson et al. wegen der zum ersten Mal ermöglichten Abschätzung des Inzidenzanstiegs der Hypertonie durch Fluglärm bedeutsam sind.

In beiden Studien wurden Störvariablen berücksichtigt. Trotz der relativ geringen Teilnehmerate legen Analysen der Nicht-Teilnehmer nahe, dass die Teilnahme nicht mit der Exposition korrelierte und daher kein Selektionsbias auftrat.

Als Cut-off für den Anstieg der Inzidenz bzw. der Odds-Ratio wurde konform dem Benchmark-Dosis-Verfahren ein Wert von 5% zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der statistischen Schwankungsbreite ergibt sich eine Immissionsschwelle für den  $L_{\text{night}}$  aus der HYENA-Studie von 34 dB(A) für Fluglärm. Aus der Arbeit von Eriksson et al. (2008) errechnet sich eine Immissionsschwelle für den Ereignispegel  $L_{\text{AS,eq}}$  von 51 dB und für den Maximalpegel  $L_{\text{A,max}}$  von 71 dB.

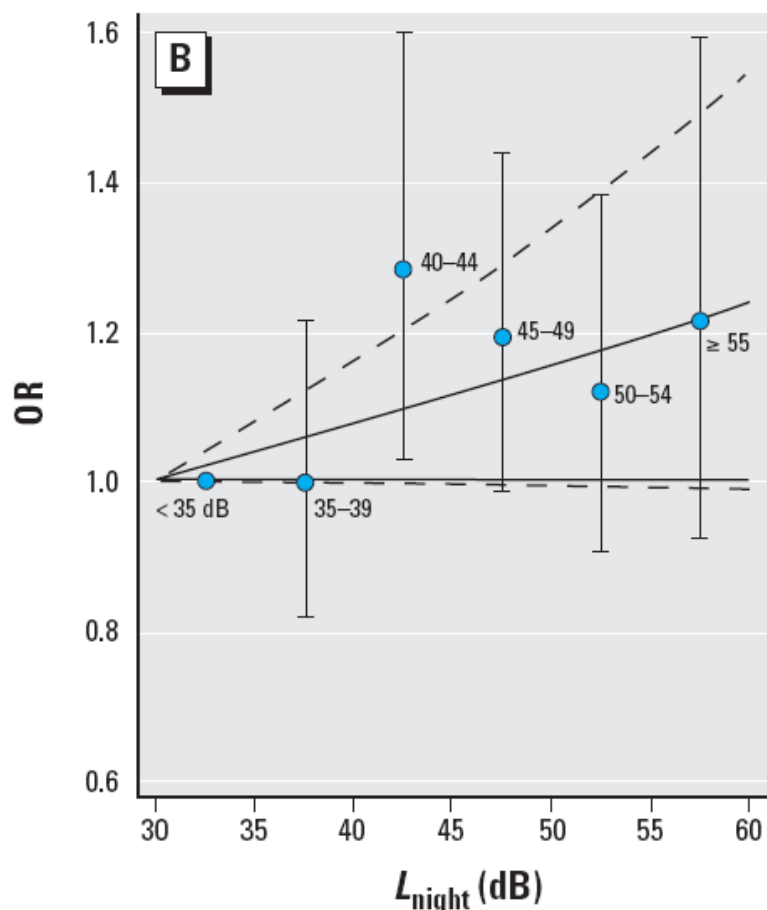


Abb. 8: Risikoanstieg für Hypertonie in Abhängigkeit vom nächtlichen Fluglärmpegel  $L_{\text{night}}$  für das kontinuierliche Modell und das diskrete Modell mit 5 dB Klassen (aus HYENA Studie, Jarup et al. 2008)

### 5.1.6 Störung des Nachtschlafs

Zweifellos gehört die Störung des Nachtschlafs durch Lärm und insbesondere durch Fluglärm zu den bekanntesten Problemen und dennoch sind viele Fragen ungeklärt. Es ist z.B. nicht rein wissenschaftlich begründbar, wie viele Aufwachreaktionen zusätzlich pro Nacht eine gesundheitliche Gefährdung oder eine unzumutbare Belästigung darstellen.

Die WHO hat in den „Night Noise Guidelines for Europe“ (WHO 2007) auf Basis der vorliegenden Evidenz eine deskriptive Zusammenschau des Zusammenhangs zwischen nächtlicher Lärmbelastung und Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden erstellt (Tabelle 7), die im Prinzip als Basis für Berechnungen zu Fluglärm-induzierten Lärmstörungen dienen kann.

Tabelle 7: Zusammenhang zwischen nächtlicher Lärmbelastung und Auswirkungen auf die Gesundheit (nach „Night Noise Guidelines for Europe“ WHO 2007)

Nächtliche Lärmbelastung (außen) $L_{\text{night}}$	Effekte auf die Gesundheit
<30 dB	Obwohl individuelle Empfindlichkeit und Umstände variieren, hat es den Anschein, als würden keine ausgeprägten biologischen Effekte bis zu diesem Niveau beobachtet werden
30-40 dB	Bei einigen Effekten wird ein Anstieg beobachtet: Körperbewegungen, Aufwachereignisse, berichtete Schlafstörungen, Aktivierungsreaktionen. Die Stärke der Effekte hängt von der Quelle und der Anzahl Ereignisse ab, aber sie sind im schlimmsten Fall mäßig. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass empfindliche Personengruppen (z.B. Kinder, chronisch Kranke, ältere Menschen) bis zu einem gewissen Grad betroffen sind.
40-55 dB	Es tritt ein steiler Anstieg bei Schädwirkungen auf, und viele in der betroffenen Population müssen ihr Leben darauf einstellen, um die Lärmsituation zu bewältigen.
>55 dB	Die Lage wird für eine zunehmende Gefahr für die öffentliche Gesundheit gehalten. Gesundheitliche Schädwirkungen treten häufig auf, ein hoher Anteil der Population ist stark belästigt und es gibt begrenzte Evidenz, dass das Herz-Kreislauf System unter Stress gerät.

Man kann zunächst versuchen auf Basis der Studien zum Zusammenhang zwischen Fluglärmereignissen und Aufwachreaktionen eine Zuordnung derart vorzunehmen, dass eine Relation zwischen den Ereignissen und dem  $L_{\text{night}}$  (außen) hergestellt wird. Danach kann man anhand des  $L_{\text{night}}$  eine Immissionsgrenze definieren, die gemäß den in Kapitel 3 dargestellten Grundlagen innerhalb des Bereichs von 30-40 dB anzusiedeln wäre. Abweichungen können sich anhand der Diskussion des jeweiligen Endpunkts und Lärmparameters ergeben. Diese Vorgangsweise wurde im Prinzip von Basner et al. (2009)

eingeschlagen. Auf Grundlage der umfangreichen Daten der DLR-Studie wurden Modellrechnungen und Simulationen vorgenommen, bei denen Ereignispegel und Anzahl Flugereignisse variiert wurden und daraus die Anzahl zusätzlicher EEG-Aufwachreaktionen pro Jahr errechnet. Der  $L_{\text{night}}$  (außen) wurde auf Basis der gleichzeitigen Messungen innen und außen in der DLR-Studie und Annahmen über die Fensterstellung errechnet. Da dies bisher die umfangreichste Modellrechnung auf Basis eines Datensatzes darstellt, der unter Vermeidung verschiedener methodischer Probleme, die die Nutzung früherer Daten erschweren, gewonnen wurde, ist diese Analyse für die Frage der Ableitung von Immissionsschwellen besonders geeignet.

Wie Abb. 9 zeigt, ist bei gegebenem Außenpegel  $L_{\text{night}}$  der Beitrag der Anzahl Ereignisse umso größer, je höher der Ereignispegel (und damit der durchschnittliche Außenpegel) ist.

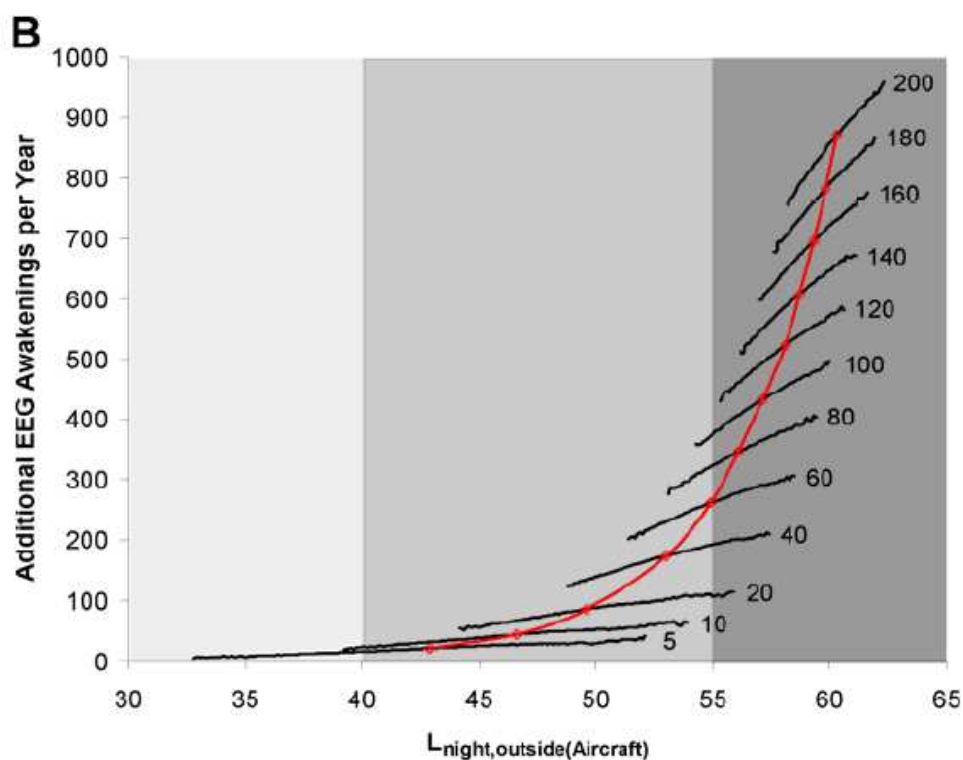


Abb. 9: Anzahl zusätzliche EEG-Aufwachreaktionen pro Jahr in Abhängigkeit vom  $L_{\text{night}}$  und der Anzahl Flugereignisse (aus Basner et al. 2009). Ergebnis von Simulationsrechnungen auf Basis der Daten der DLR-Studie.

Von den Feldstudien, die quantitative Bewertungen hinsichtlich akuter Reaktionen auf Fluglärmereignisse (EEG-Aufwachreaktionen, Aufwachreaktionen mit der Drückermethode, Aktimetrie) ermöglichen, sind die DLR-Studie (Basner et al. 2007) und die Amsterdam-Studie (Passchier-Vermeer 2002, 2003) aufgrund der großen Anzahl der Probandennächte und der kontrollierten Bedingungen zur Zeit die aussagekräftigsten. Beide zeigen, trotz verschiedener Wirkungsparameter, praktisch die gleiche Schwelle für den  $L_{\text{AS,max}}$  in einem

Bereich von etwa 30-35 dB. Die Dosis-Wirkungskurve der DLR-Studie ist aber steiler und erlaubt damit Abschätzungen auf der sicheren Seite für den Schutz der Anrainer.

Aus der DLR-Feldstudie wurde ein wirkungsorientiertes Nachtschutzkonzept erstellt. Es wurden die gerade noch zulässigen Anzahlen von Reaktionen (zusätzliche EEG-Aufwachreaktionen) vorgegeben und akustische Belastungen errechnet, die mit diesem Wert kompatibel sind. Für eine Zumutbarkeitsschwelle wird empfohlen, einen Wert von 0,5 zusätzlichen, Fluglärm-induzierter Aufwachreaktionen vorzugeben. Das bedeutet, dass im Mittel pro Jahr alle zwei Nächte eine zusätzliche, nicht notwendigerweise erinnerbare Aufwachreaktion im Vergleich zu 48 spontanen auftritt. Diese Empfehlung wurde auch als sogenannter Frankfurter Nachtindex vorgeschlagen (Schreckenberget al. 2009).

Wie in allen solchen Fällen ist, wie mehrfach erwähnt, die Schwelle der Unzumutbarkeit willkürlich. Es gibt keine Evidenz, die es erlaubt, eine solche Festlegung empirisch zu rechtfertigen. Eine solche Rechtfertigung würde aber das Problem auch nur verschieben. Könnte man beispielsweise einen Zusammenhang zwischen der Fragmentation des Schlafs und chronischen Gesundheitsstörungen herstellen, dann wäre auch in diesem Fall zu entscheiden, welcher Steigerung der Inzidenz solcher Gesundheitsstörungen tolerabel ist.

Als präventiver Zielwert, bei dem keine ausgeprägten biologischen Effekte beobachtet wurden (siehe Tabelle 7), werden 30 dB für einen äquivalenten Dauerschallpegel in der Nacht ( $L_{\text{night}}$  außen), als Interim Target I (IT-I) 55 dB und als Interim Target II (IT-II) 40 dB angegeben.

Legt man 183 zusätzliche EEG-Aufwachreaktionen als Zumutbarkeitsgrenze fest, dann ergibt sich aus den Berechnungen von Basner et al. (2009) ein durchschnittlicher Immissionsschwellenwert  $L_{\text{night}}$  (außen) von 52 dB(A), wobei der untere 5%-Wert der Verteilung der Lagen der Dosis-Wirkungskurve herangezogen wurde.

Bei dieser Ableitung sind besonders empfindliche Populationssegmente nicht berücksichtigt. Die spärlichen Daten, die es zur lärmbedingten Aufwachwahrscheinlichkeit von Kindern gibt, legen nahe, dass sie eine eher höhere Weckschwelle besitzen, daher kann man davon ausgehen, dass eine Regelung, die Erwachsene bis zu einem gewissen Grad schützt, auch für Kinder Schutz bietet. Personen, die krankheitsbedingt (z.B. aufgrund neurodegenerativer Erkrankungen) eine geringere Schlaftiefe besitzen, und ältere Personen haben eine niedrigere Weckschwelle. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich – bezogen auf spontane Aufwachreaktionen – der Anteil der fluglärmbedingten bei dem angegebenen Wert nicht wesentlich erhöht. Es besteht aber hier akuter Forschungsbedarf, weil es sich dabei teilweise um Personen handelt, bei denen zusätzliche Schlafstörungen den Erkrankungsverlauf negativ beeinflussen könnten.

### 5.1.7 Zusammenfassung der Immissionsschwellenwerte

Die folgende Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Immissionsschwellenwerte, die auf Basis der unterschiedlichen Endpunkte abgeleitet wurden. Für alle Ableitungen wurde das Konzept der Benchmark-Dosis verwendet. Dabei werden statistische Unsicherheiten in der Ermittlung der Dosis-Wirkungskurve berücksichtigt. Zusätzliche Unsicherheiten hinsichtlich der Frage, ob empfindliche Untergruppen berücksichtigt wurden etc. gingen in die Berechnung nicht ein.

Tabelle 8: Synopsis der abgeleiteten Immissionsschwellenwerte

Endpunkt	Datenbasis	Kriterium	Schwellenwert	
			Parameter	Wert
<b>Belästigung</b>	Miedema & Oudshoorn 2001	25% über dem Durchschnitt Belästigter	L <sub>dn</sub> [dB(A)]	50
			L <sub>den</sub> [dB(A)]	51
	Quehl & Basner 2006		L <sub>AS,eq</sub> innen [dB(A)]	29
			Anz. Ereignisse	51
<b>Beeinträchtigung kognitiver Funktionen</b>	Clark et al. 2005	keine unterdurchschn. Leistung Leseverständn. (Kinder)	L <sub>day</sub> außen [dB(A)]	45
<b>Akute vegetative Reaktionen &amp; chron. Störungen</b>	Haralabidis et al. 2008	5 mmHg Anstieg syst. BD	L <sub>AS,max</sub> innen [dB(A)]	60
	Jarup et al. 2008	5% Anstieg Risiko d. Hypertonie	L <sub>night</sub> [dB(A)]	34
	Eriksson et al. 2008	5% Anstieg Inzidenz d. Hypertonie (Männer)	L <sub>AS,eq</sub> außen [dB(A)]	51
L <sub>AS,max</sub> außen [dB(A)]			71	
<b>Störungen des Nachtschlafs</b>	Basner et al. 2009 Schreckenberg et al. 2009	0,5 zusätzliche EEG- Aufwachreaktionen pro Tag	L <sub>night</sub> außen [dB(A)]	52

Um eine einheitliche Empfehlung hinsichtlich der Immissionsschwellenwerte abgeben zu können, müssen die unterschiedlichen Parameter der Schallsituation, die in den einzelnen Untersuchungen zugrunde gelegt und die in den Schwellenwertberechnungen herangezogen wurden, berücksichtigt werden.

Gemäß der Direktive 2002/49/EC (DEC) sollen vorzugsweise L<sub>night</sub> Pegel zum Schutz vor Störungen des Nachtschlafs angegeben werden, wobei die Zeit zwischen 23.00 und 7.00 empfohlen wird, aber ausdrücklich auch andere Randzeiten gewählt werden können. Die Randzeiten bestimmen in erheblichem Ausmaß die Organisation des Flugverkehrs. Um die Nachteile eines hohen Nachtflugaufkommens zu vermeiden, verlegen Flughäfen die Starts und Landungen wenn möglich über die Grenze der Nachtzeit. Deshalb gehören diese Randzeiten oft zu den Phasen mit einer besonders hohen Zahl von Fluglärmereignissen. Hinzu kommt, dass diese Zeiten auch durch Ereignisse anderer Lärmquellen (Straße, Bahn etc.), die an die Flugpläne gekoppelt sind, belastet sind. Aus diesen Gründen erscheint die Wahl der Defaultwerte 23.00 bis 7.00 Uhr als die günstigste Variante, weil ab 7.00 Uhr ohnedies durch den Berufsverkehr und den üblichen Schulbeginn um 8.00 ein höherer Lärmpegel entsteht und die meisten Personen bereits wach sind. Zum Schutz der Einschlafphase ist ein späterer Beginn der Nachtzeit als 23.00 nicht empfehlenswert.



Aufgrund der für andere Verkehrsträger und in anderen Zusammenhängen (z.B. Arbeitszeitgesetz) in Österreich festgelegten Nachtzeit als der Zeit zwischen 22.00 und 06.00 wird diese Definition hier übernommen.

Ein  $L_{\text{night}}$  (außen) von 50 bis 52 dB(A) lässt sich auf Basis der Ergebnisse zur Beeinträchtigung des Nachtschlafs begründen. Belästigungsreaktionen sind bereits ab einem  $L_{\text{night}}$  von 40 dB(A) zu erwarten und bei der Frage des Hypertonierisikos zeigt sich, dass bereits ab einem nächtlichen Dauerschallpegel von 34 dB(A) eine relevante Zunahme existiert. Allerdings ist dieser Befund unsicher und stimmt nicht mit der Längsschnittuntersuchung von Eriksson et al. (2008) und den Daten zu akuten vegetativen Wirkungen überein. Diese Untersuchungen ergeben maximale Ereignispegel von 60 dB(A) innen und 71 dB(A) außen. Nimmt man einen Dämmwert des geschlossenen Fensters von 21 dB an und berücksichtigt, dass nicht alle Probanden die Fenster geschlossen, sondern es manche offen und manche gekippt hielten, dann stimmen diese beiden Schwellenwerte bemerkenswert gut überein. Da die DEC anregt, zusätzlich zum  $L_{\text{night}}$  auch maximale Ereignispegel zu limitieren, wird empfohlen, den  $L_{\text{AS,max}}$  außen bei 71 dB(A) zu begrenzen.

Für eine Empfehlung zum  $L_{\text{day}}$  lassen sich die Schwellenwerte zu den Belästigungsreaktionen heranziehen. Grundsätzlich kann wegen des Pegelzuschlags für die Nachtzeit der  $L_{\text{day}}$  maximal um 1,76 dB höher sein als der  $L_{\text{dn}}$ . Daher ergibt sich zur Vermeidung von Belästigungsreaktionen ein  $L_{\text{day}}$  von 52 dB(A). Es ergibt sich also aus den verwendeten Belästigungsdaten kein zum Nachtpegel unterschiedlicher Wert. Man kann jedoch auf Basis des Nachtpegels mit dem gebräuchlichen Ansatz eines Unterschieds zwischen Tag- und Nachtzeit von 10 dB einen Schwellenwert für  $L_{\text{day}}$  von 60 bis 62 dB(A) definieren, der auch durch Untersuchungen zu andern Verkehrsträgern gestützt wird (Babisch 2006).

Es wird also empfohlen:

- Für die Nachtzeit (22.00 bis 06.00) ein äquivalenter Dauerschallpegel von 50 bis 52 dB(A) und zusätzlich eine Begrenzung der maximalen Ereignispegel (außen) von 71 dB(A) entsprechend einem maximalen Ereignispegel innen von 50 dB(A)
- Für die Tagzeit (06.00 bis 22.00) ein äquivalenter Dauerschallpegel von 60 bis 62 dB(A)

## **5.2 Darstellung eines wissenschaftlich fundierten Irrelevanzwertes (Untergrenze für die Relevanz einer Pegeländerung)**

Es wird gelegentlich behauptet, dass Pegelunterschiede und Pegeländerungen von 3 dB oder weniger irrelevant wären, weil derartige Unterschiede nicht wahrnehmbar wären. Diese Auffassung widerspricht den Erkenntnissen der Psychophysik und beruht offenbar auf einem Missverständnis. Die Unterschiedsempfindlichkeit für akustische Reize hängt von vielen Faktoren ab: der Intensität, der Dauer, der Frequenz, dem zeitlichen Abstand der Vergleichsreize usw. Deshalb kann ein einzelner Wert für den Pegelunterschied, der eben noch wahrnehmbar ist, nicht angegeben werden. Man hat als Richtschnur aus diesen Gründen einen Wert von 3 dB manchmal als ‚kaum wahrnehmbar‘ bezeichnet. Aber auch diese Angabe ist irreführend, weil unter normalen Umständen ein Pegelunterschied von 3 dB gut hörbar ist (wie auch in den Grundlagen zum technischen Lärmschutz, etwa bei Müller 1986, ausgeführt wird). Die Unterschiedsschwelle liegt je nach Pegel für Frequenzen im Bereich des Sprachfeldes zwischen 0,2 und 2 dB. Dabei nimmt die Unterschiedsschwelle mit zunehmendem Pegel ab (Ozimek & Zwislocki 1996). Beispielsweise konnten Anstiege in Überflugpegeln von 1 dB diskriminiert werden und führten zu unterschiedlichen Lautheitseinstufungen (Namba & Kuwano 1991).

Besonders im Rahmen von Lärmschutzmaßnahmen stellt sich die Frage, welche Pegelunterschiede von den Betroffenen als relevant wahrgenommen werden. Wenn man berücksichtigt, dass für eine Reduktion des Schallpegels um 3 dB die Schallstärke halbiert werden muss, dann wären die enormen Anstrengungen, die technisch erforderlich sein können, um die Hälfte der Schallenergie daran zu hindern, am Immissionsort einzuwirken, vergebens, wäre ein solcher Unterschied nicht wahrnehmbar. Hier geht es also nicht darum, die Unterschiedsschwelle unter (idealen) Laborbedingungen zu bestimmen, sondern darum, ob sich die Aversität einer Situation in der Wahrnehmung der betroffenen Bevölkerung bedeutsam ändert, wenn die durchschnittlichen Pegel reduziert werden oder ansteigen. Es liegen leider zu dieser Frage keine systematischen Untersuchungen vor. Ortscheid und Wende (2004) haben einige Befunde, die in realen Projekten erhoben wurden, zusammengetragen. Aus diesen Studien zu verschiedenen Projekten der Lärmreduktion ergibt sich, dass Pegelminderungen um 1 bis 3 dB zu deutlichen Reduktionen der Belästigung der Anrainer führten. Einschränkend muss aber erwähnt werden, dass allein die Tatsache, dass man etwas gegen die Lärmeinwirkung getan hat, schon belästigungsmindernd wirken kann. Solche Hawthorne-artigen Verzerrungen sind bei diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt worden. Allerdings zeigen die Befunde einer vom Ausgangspegel abhängigen Reduktion des Belästigungsgrades, dass zumindest teilweise akustische Faktoren eine Rolle spielten.

Für Fluglärm lässt sich aus den Kurven zum Anteil belastigter Anrainer (Miedema & Oudshoorn 2001) eine Ableitung eines Relevanzkriteriums vornehmen. Die 95% Konfidenzgrenze für einen Unterschied im Anteil belastigter Anrainer beträgt ca. 4,2%. Der lineare Anteil des Anstiegs der Belästigung beträgt bei Fluglärm 1,912 %/dB. Daraus ergibt sich, dass eine Pegeländerung um 2,2 dB zu einer signifikanten Zu- oder Abnahme des Anteils belastigter Anrainer führt. Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit den vorher erwähnten Befunden und kann daher - mangels direkter wissenschaftlicher Befunde – als ausreichend gesichertes Kriterium angesehen werden. Demnach sind Pegeländerungen unter 1 dB sehr wahrscheinlich irrelevant, Pegeländerungen zwischen 1 und 2 dB werden unter günstigen Umständen wahrgenommen und Pegeländerungen über 2 dB haben auf Wahrnehmung und Belästigungserleben signifikante Auswirkungen.

### **5.3 Darlegung der möglichen Auswirkungen einer Überschreitung der Schwellenwerte auf die Gesundheit der Nachbarn und mögliche vorbeugende Gegenmaßnahmen (z.B. bestimmte wirksame Lärmschutzmaßnahmen wie insbesondere Lärmschutzfenster in Schlafräumen)**

Schwellenwerte, wie wir sie in diesem Gutachten abgeleitet haben, sind nicht als scharfe Grenzen anzusehen. Aus der Art der Ableitung ergibt sich, dass zwar das Ziel darin besteht, Schwellen zu definieren, bei deren Einhaltung auch bei langfristiger Exposition mit keinen nachteiligen Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden gerechnet werden muss, aber wegen des besonderen Umstands, dass Schalleinwirkungen biologisch und psychologisch bedeutsam sind und deshalb keine absolute Wirkungsschwelle oberhalb der Hörschwelle existiert, bestehen hinsichtlich des Schutzzieles erhebliche Unsicherheiten. Eine emotional negative Reaktion im Sinne eines Belästigungserlebens kann von einer Einwirkung ausgelöst werden, die gerade noch hörbar ist. Obwohl auch Belästigungsreaktionen langfristig gesundheitlich negative Folgen haben können, legt die Zusammenschau der bisher vorliegenden Evidenz nahe, dass unter 30 dB(A) in der Nacht (WHO 2007) mit keinen nachteiligen Auswirkungen – selbst bei empfindlichen Personen – gerechnet werden muss. Zwischen 30 und 40 dB nächtlichem Dauerschallpegel kann nicht ausgeschlossen werden, dass empfindliche Personen Beeinträchtigungen der Gesundheit und des Wohlbefindens erleiden. Was Fluglärm anlangt, so besteht die Problematik, dass über diesen Bereich in der Regel keine fundierte Aussage hinsichtlich Auswirkungen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden gemacht werden kann, weil in diesen Bereich der Exposition die Referenzgruppen gelegt wurden und daher – im Falle einer Risikoerhöhung bereits in diesem Bereich – eine das beobachtbare Risiko verringernde Fehlklassifikation vorläge. Allerdings zeigen die Untersuchungen zu Schlafstörungen, dass in diesem Bereich von 30 bis 40 dB nur sehr wenige zusätzliche Aufwachreaktion auftreten und anscheinend auch nur dann, wenn die Zahl der Ereignisse hoch ist.

Auf Basis des vorsorgeorientierten Konzeptes, das wir bei der Ableitung der Richtwerte anwandten, können zwar nicht alle adversen Effekte sicher verhütet werden, aber es besteht hinsichtlich des Ausmaßes induzierter Schlafstörungen und bedeutsamer vegetativer Reaktionen ein hohes Schutzniveau. Belästigungsreaktionen werden auch bei Einhaltung der angegebenen Richtwerte hinsichtlich Stärke und Häufigkeit nicht auf ein Maß reduziert werden können, wie es wünschenswert wäre. Dazu müssten die Dauerschallpegel um weitere etwa 10 dB abgesenkt werden. Zur Verhütung von negativen Auswirkungen auf die kognitiven Funktionen von Kindern wären bei Tag um etwa 15 dB niedrigere Werte anzustreben.

Überschreitungen der angegebenen Schwellenwerte haben in erster Linie eine Erhöhung der Aufwachhäufigkeit zur Folge. Weiters nimmt die Zahl der vegetativen Reaktionen zu, und zwar insbesondere dann, wenn die Schwelle für maximale Ereignispegel überschritten wird. Obwohl in der Frage der Folgewirkungen solcher Reaktionen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, gibt es starke Hinweise darauf, dass sich eine behandlungsbedürftige Hypertonie entwickeln kann. Hypertonie ist wesentlich an der Entstehung von Arteriosklerose und koronarer Herzkrankheit, zerebralen Durchblutungsstörungen, Niereninsuffizienz etc. beteiligt. Jeder Faktor, der das Risiko einer Hypertonie erhöht, ist nicht nur für den Betroffenen, sondern auch für das Gesundheitssystem ein Problem, denn diese Patienten benötigen langdauernde Medikation und ärztliche Kontrolle.

Mit chronischer Belästigung, aber auch ständigen Schlafstörungen gehen auch psychische Veränderungen einher, die wesentlich mit der Unkontrollierbarkeit der Lärmsituation verbunden sind. Obwohl bzgl. der Frage der psychischen Gesundheit von Flughafenanrainern vorliegende Befunde keine dramatischen Abweichungen erkennen lassen, so ist doch davon auszugehen, dass sich bei einer Überschreitung der Schwellenwerte bei einer dzt. nicht bezifferbaren Zahl von Anrainern aus dem chronischen Kontrollverlust depressive Reaktionslagen entwickeln, die zu einem erhöhten Medikamentenkonsum und letztlich zu Behandlungsbedürftigkeit führen.

Überschreitungen der Schwellenwerte können auch bei Tage, wegen der Interferenz mit intendierten Handlungen, zu Nervosität und Konzentrationsproblemen führen oder vorhandene Tendenzen dazu verstärken.

Die Störung der Erholung z.B. von beruflichen Belastungen der Wohnbevölkerung durch Schwellenwertüberschreitungen soll nicht unerwähnt bleiben. Diese Störung der Erholung kann berufsbezogene Risiken verstärken und dadurch zu manifesten Erkrankungen führen,

die zwar nicht direkt lärminduziert sind, aber durch die Störung der Regeneration und Kompensation Lärm als Mitursache haben können.

Es ist daher notwendig, dass Maßnahmen getroffen werden, die nachteilige Auswirkungen von Schwellenüberschreitungen verhindern oder reduzieren. In erster Linie ist dabei an sekundäre und tertiäre Schallschutzmaßnahmen zu denken.

Diese Schallschutzmaßnahmen sind – geordnet nach zunehmendem, insbesondere nächtlichem Schallpegel, vor dem sie schützen sollen:

- Einbau von Schalldämmlüftern bei Beibehaltung einer gewöhnlichen Fensterkonstruktion
- Austausch von Fenstern (und ev. Türen) gegen Schallschutzfenster und –türen
- Schallschutzfenster plus Schalldämmlüfter
- Kastenfenster mit Vorsatzschalen und zusätzlicher Verglasung
- Schalltechnische Verbesserung der Außenbauteile (insbesondere Dächer)

Schalltechnisch lässt sich fast immer eine geeignete Lösung für ein Immissionsproblem für Gebäude finden, allerdings muss betont werden, dass jede solche Maßnahme die freie Verfügung über das Objekt behindern. Für Tages- und Abendzeiten ist auch die Nutzung des schalltechnisch weniger leicht oder gar nicht zu schützenden Außenraumes (Terrasse, Garten etc.) eingeschränkt und daher bei der Abwägung objektseitiger Maßnahmen gegenüber Absiedlung zu berücksichtigen.

#### **5.4 Darstellung des Pegelunterschiedes zwischen innen und außen (Dämmwert des gekippten Fensters)**

Um von den am Ohr des Schlafers zugelassenen Pegeln zu im Außenbereich zulässigen Werten zu kommen, sind Angaben über die Dämpfungswirkung von Fenstern, insbesondere von gekippten Fenstern erforderlich. Diese Dämpfungswirkung - angegeben als bewertetes Schalldämmmaß - von gekippten Fenstern hängt von zahlreichen Faktoren ab, unter anderem:

- Art des Fensters und der Verglasung
- Winkel der Kippstellung
- Lage des Fensters in der Leibung (außenbündig, in der Mitte, ...)
- Schallabsorptionsvermögen der Leibungsverkleidung
- Winkel der Beschallung in Abhängigkeit vom gekippten Flügel und der Leibung.

Insgesamt sind daher vor allem die Fensterbauart und die objektspezifische Geometrie mitverantwortlich für das Schalldämmmaß des gekippten Fensters.

Bisher sind nur wenige Messdaten zur Schalldämmung gekippter Fenster ermittelt worden. Die in Tabelle 9 dargestellten Werte wurden im Zusammenhang mit der Untersuchung von Vorsatzfenstern und deren schalltechnischer Wirkung gemessen.

Dabei zeigt sich, dass der Schalldämmwert des gekippten einfachen Kunststofffensters mit Isolierverglasung (gasgefüllt) bei etwa 9 dB anzusetzen ist. Abhängig von den Zusatzmaßnahmen kann eine deutliche Verbesserung erreicht werden. Für diese Verbesserungen können jedoch keine allgemeingültigen Werte angegeben werden, da die objektspezifischen Randbedingungen maßgebend werden können.

Bei kastenfensterartigen Konstruktionen, bei denen beide Ebenen gekippt sind, können bis zu 23 dB erreicht werden. (Für den Fall „geschlossene Fensterläden mit Lamellenfüllung bei gekipptem Fenster“ existieren keine Werte.)

Tabelle 9: Messwerte als bewertetes Schalldämm-Maß (in dB) zu gekippten Fenstern (im Vergleich zum geschlossenen Fenster), Angaben z.T. laut MA 22

<b>Fensterbauart</b>	<b>bewertetes Schalldämmmaß (dB)</b>
Kunststofffenster mit Isolierglas-Scheiben 2 x 4 mm; 18 mm Zwischenraum, gasgefüllt	32 - 33
Fenster gekippt	8 - 9
Zusätzlich außen Vorsatzfenster mit 6 mm Glasscheibe	> 55
Fenster und Vorsatzfenster (mit 30 cm Abstand) gekippt	21
Fenster und Vorsatzfenster (mit 15 cm Abstand) gekippt	18
Zusätzlich außen Vorsatzfenster mit 6 mm Glasscheibe mit Lüftungskasten im Rahmen	
Leibung im 50 cm breiten Zwischenraum schallabsorbierend verkleidet	48
Fenster offen, Vorsatzfenster geschlossen*	22
Fenster gekippt, Vorsatzfenster geschlossen*	27
Fenster gekippt, Vorsatzfenster gekippt	23

\* Zuluft über Lüftungskasten im Rahmen

Dabei bezeichnet das bewertete Schalldämmmaß die gewichtete Summe der Pegeldifferenzen mit und ohne den schalldämmenden Bauteil über 16 Terzbänder zwischen 100 und 3150 Hz.

Da der „Dämmwert des gekippten Fensters“ mit der technischen Ausführung des Fensters und den übrigen genannten Größen variiert, ist es nicht verwunderlich, dass international unterschiedliche Dämpfungswirkungen in der gutachterlichen Praxis zur Anwendung kommen. Während z.B. in Österreich für gekippte Fenster zumeist eine Dämpfungswirkung

von 12 bis 15 dB angenommen wird (z.B. Mediationsverfahren Flughafen Wien: 15 dB), geht man in den Niederlanden von 22 dB Dämpfungswirkung eines gekippten Fensters aus. Im Mediationsverfahren rund um den Ausbau des Flughafens Frankfurt/Main wurde der Wert von ca. 16 dB als Schalldämmung durch gekippte Fenster als zulässiger Durchschnittswert angenommen. Da die Dämmwirkung bei Messreihen oft anhand neuer Fenster ermittelt wird, diese Wirkung aber nicht nur vom Glas, sondern auch vom Kasten und den Dichtungen abhängt, kann das Schalldämmmaß bei älteren Fenstern niedriger sein, als die technischen Angaben scheinen lassen.

Deshalb wird empfohlen, als Dämmmaß des gekippten Fensters für einfache Schallschutzfenster 15 dB anzusetzen, für Schallschutzfenster mit zusätzlichen schallabsorbierenden Leibungen und Vorsatzfenster sind 22 dB als Dämmmaß des gekippten Fensters anzuwenden.

### **5.5 Auseinandersetzung mit den gängigen Kritikpunkten an den vorhandenen zusammenfassenden Analysen und Empfehlungen**

#### **5.5.1 „Fluglärmsynopse“ von Griefahn, Jansen, Scheuch und Spreng**

Die häufig zitierte, aber auch viel kritisierte „Synopse“ wurde im Auftrag des Flughafens Frankfurt (Fraport) von Barbara Griefahn, Gerd Jansen, Klaus Scheuch und Manfred Spreng erstellt und 2002 veröffentlicht. Es geht aus den Unterlagen nicht sicher hervor, ob sie einzeln oder als Konsortium beauftragt wurden. Wahrscheinlich ist erstere Variante, da in der Zusammenfassung zu von „ausführlichen Einzelgutachten der Autoren“ die Rede ist. Jedenfalls einigten sich die Autor/innen im Jahr 2001 auf gemeinsame Beurteilungskriterien von Fluglärm und legten diese in einem gemeinsamen Aufsatz dar, der im Internet abrufbar ist und als „Synopse“ betitelt ist Griefahn et al. (2001). In der Publikation (Griefahn et al. 2002) wird auf 932 Literaturstellen verwiesen, die „in den Gutachten verarbeitet“ worden seien. Eine ausführliche Diskussion würde jedoch den Rahmen der Publikation sprengen; die Literaturliste könne bei den Autoren angefordert werden. Hier heißt es auch, „Synopse beinhaltet Einigung nach bestimmten Kriterien“. Erst später scheint sich das Missverständnis verbreitet zu haben, die wenige Seiten lange Arbeit stelle eine Synopse (im Sinne einer umfassenden Zusammenschau) der Literatur zum Thema dar.

Die Autoren betonen ausdrücklich, dass ihre Vorschläge nicht nur auf der veröffentlichten Literatur und auf unveröffentlichten Forschungsberichten beruhen, sondern auch auf ihren persönlichen Erfahrungen und Überzeugungen. Weiters stellen sie wörtlich fest (1): „Die Ergebnisse der internationalen wissenschaftlichen Lärmwirkungsforschung lassen eine allgemeine dB-exakte Ableitung von Grenzen nicht zu.“ Vielmehr mussten sie sich erst auf

(wissenschaftsexterne) Kriterien für die Erstellung der Synopse einigen, unter denen sie auch die „Vermeidung unrealistischer Ziele“ aufzählen, „die zur Schaffung artifizierter Risiken führen können“.

Bereits in der Einleitung geben die Autoren zu bedenken, dass neue Erkenntnisse über psychophysiologische Zusammenhänge von Adaptation und Risiko es notwendig machen, keine isolierte Lärmwirkungsbetrachtung vorzunehmen, um nicht dadurch selbst ein Risiko zu erzeugen. Es scheint dies ein wesentlicher Beweggrund für das oben genannte Kriterium („Vermeidung unrealistischer Ziele“) zu sein. Welches Ziel (der Expositionsminderung) jedoch realistisch ist, kann nur im Einzelfall beurteilt und nicht in einer einzelnen Arbeit für alle zukünftigen Gutachten und Situationen vorhergesehen werden. Somit ist klar, dass die „Synopse“ mit den in ihr genannten Werten nicht als unumstößliche Richtlinie für alle zukünftigen Gutachten zum Fluglärm gedacht war. Allenfalls waren die Autoren der Meinung, dass die in der Arbeit beschriebenen Kriterien und Prinzipien verallgemeinerungsfähig sind. So betonen die Autoren auch ausdrücklich am Ende ihrer Arbeit, dass ihre Vorschläge nicht die lärmmedizinische Begutachtung ersetzen und „stets neue wissenschaftliche Erkenntnisse ... einzubeziehen, Kombinationswirkungen ... einer umweltmedizinischen Betrachtung und Abwägung zu unterziehen (und) Einzelbetrachtungen ... vorzunehmen“ sind. Kurz gesagt, die vorgeschlagenen Beurteilungswerte seien nicht als (unabänderliche) Grenzwerte misszuverstehen.

Im weiteren Verlauf fanden die in der Synopse genannten Werte aber dennoch Eingang in die gängige Gutachtenspraxis, wo sie zunehmend unkritisch gleichsam als wissenschaftlich abgesicherte Grenzen gesundheitlicher Unbedenklichkeit überinterpretiert wurden (Giemulla & Schorcht 2004a,b). Dieser Missbrauch wurde eventuell durch spätere Publikationen der Autoren gefördert (Scheuch et al. 2007a,b), in welchen die Werte der Synopse als dem Stand der Wissenschaft entsprechend dargestellt wurden. Dieses Vorgehen regte allerdings auch zu massivem Widerspruch an (Beckers 2003; Wildanger 2003; Guski 2003; Hoffmann 2003; Maschke et al. 2004; Greiser 2007; Guski & Schümer 2007), auf den später noch eingegangen werden soll.

Die Synopse beschreibt sieben Schutzziele:

1. Vermeidung von Hörschäden
2. Vermeidung von extraauralen Gesundheitsschäden und Krankheiten
3. Vermeidung von erheblicher Belästigung
4. Vermeidung von Störungen der Kommunikation
5. Vermeidung der Störung von Erholung/Rekreation (außen)



6. Vermeidung von Störungen des Schlafs (innen)

7. Schutzziel: Besonders schutzbedürftige Bereiche (Kindergärten, Schulen, Krankenhäuser, Altenheime)

und schlägt für diese zumeist drei Schutzniveaus vor:

1. Kritischer Toleranzwert

2. Präventiver Richtwert

3. Schwellenwert

Beim kritischen Toleranzwert seien Gesundheitsgefährdungen bzw. -beeinträchtigungen nicht mehr auszuschließen. Dieser Wert ist zu unterschreiten (Handlungszwang).

Der präventive Richtwert ist als Vorsorgewert gedacht, bei dessen Einhaltung Gesundheitsgefährdungen weitgehend ausgeschlossen sind. Insbesondere bei sensiblen Gruppen könnten aber dennoch Beeinträchtigungen und Störungen auftreten. Er sollte „prinzipiell“ nicht überschritten werden (Handlungsbedarf).

Schwellenwerte sollten - unter dem Minimierungsgebot - langfristig angestrebt werden. Schallimmissionen in diesem Bereich führen nachweislich zu deutlichen physiologischen und psychologischen Veränderungen, die Anpassungs- und Bewältigungsprozesse auslösten. Langzeiteffekte seien allerdings nicht anzunehmen. Wenn auch bei Erreichen dieser Werte kein unmittelbarer Handlungsbedarf bestünde, so seien dennoch langfristig weitere Emissions- und Immissionsminderungen anzustreben.

Diese drei (leicht gekürzt wiedergegebenen) Definitionen der Schutzniveaus sind aus mehreren Gründen problematisch. Die Unterscheidung zwischen Handlungszwang und Handlungsbedarf mag zwar semantisch möglich sein, wie dies allerdings operationalisiert werden kann, bleibt fraglich. Eine Vorschrift, die dem Verursacher keinen Handlungszwang auferlegt, sondern lediglich den Wunsch beinhaltet, dass gehandelt werde, ist von vorneherein – wenn das Handeln mit Mühe und Kosten verbunden ist – als illusorisch zu betrachten. Bei der Definition der „Schwellenwerte“ fällt auf, dass die Autoren den „deutlichen physiologischen und psychologischen Veränderungen“ im Bereich der Schwellenwerte – gerade auf längere Sicht gesehen - keinen Krankheitswert zuschreiben. Offensichtlich sind sie der Auffassung, dass die ausgelösten „Anpassungs- und Bewältigungsprozesse“ nicht erschöpft werden könnten und somit auch keine Langzeiteffekte auftreten können.

Der Bezug der drei Schutzniveaus zu den sieben Schutzzielen ist unklar und wäre nur durch Einsicht in die Einzelgutachten der Autoren u.U. nachvollziehbar.

Die sieben Schutzziele heben sich teilweise gegenseitig auf: Die Vermeidung erheblicher Belästigung sollte beispielsweise auch die Vermeidung von Hörschäden hinreichend sicherstellen. Für die Schutzziele werden jedoch teilweise unterschiedliche Expositionsmaße herangezogen, und zwar Maximalpegel (zum Teil zusammen mit Ereignishäufigkeit), Dauerschallpegel über 24 Stunden sowie für den Tag (6 bis 22 Uhr) und für die Nacht (22 bis 6 Uhr). Tagrandzeiten bzw. Abschnitte der Nacht werden hingegen fast nur qualitativ diskutiert.

Als kritischer Toleranzwert für Hörschäden wird ein 24-Stunden-Mittelwert von 80 dB(A) genannt. Dies entspräche einem Dauerschallpegel von 86 dB(A) über 8 Stunden. Somit gewährt der Toleranzwert der Synopse weniger Schutz als der Grenzwert am Arbeitsplatz, wenn der Pegel, was mit Sicherheit angenommen werden kann, Schwankungen unterliegt und Pegel erreicht werden, die zu einer Hörschwellenverschiebung führen. In der textlichen Diskussion zu Hörschäden führen die Autoren aus: „Hörschäden sind durch zivilen Flugverkehr bedingten Umweltlärm nicht zu erwarten. Sie sind möglicherweise zu beachten, wenn die notwendigen Erholungszeiten für das Gehör nicht eingehalten werden können.“ Diese Ausführungen legen nahe, dass die Autoren zwar der Hoffnung Ausdruck geben wollen (die ja nicht unrealistisch ist), dass Lärmpegel, die langfristig zu Hörschäden führen, in der Umgebung von Flughäfen nicht erreicht werden, aber dass sie auch Zweifel hegen, dass die angegebenen Werte dem Schutzziel der Vermeidung von Hörschäden gerecht werden. Bei einer täglichen Belastung über 8 Stunden gegenüber 80 bis 85 dB(A) lassen sich in epidemiologischen Studien bei einem Teil der Exponierten über die Jahre eine beschleunigte Abnahme des Hörvermögens beobachten. Wenn es nicht möglich ist, diese Belastung (in der Regel am Arbeitsplatz) durch Ruhe in der Freizeit zu kompensieren, wird die Schädigung wahrscheinlicher. Dass hier Umweltlärmpegel als zulässig erachtet werden, die im Bereich der Grenzen der Lärmarbeit liegen, muss daher als fahrlässig angesehen werden. Für die Verzögerung der Hörerholung reichen nämlich bereits weit niedrigere Pegel aus, als zur Vertäubung notwendig sind. Bereits Pegel von etwa 65 dB(A) führen zu einer Verzögerung der Hörerholung. Dadurch kann es bei einer am Arbeitsplatz lärmexponierten Person dazu kommen, dass die Arbeitsplatzexposition einsetzt, ohne dass eine vollständige Hörerholung stattgefunden hat. Dies ist mit einem erhöhten Risiko für die Entwicklung einer Lärmschwerhörigkeit verbunden.

Extraaurale Gesundheitsschäden werden laut Synopse vermieden (kritischer Toleranzwert), wenn Maximalpegel nicht häufiger als 19 mal pro Tag 99 dB(A) erreichen. Diese Forderung wird noch einmal extra als Fußnote zur Tabelle wiederholt („Pegelhäufigkeiten dürfen nicht überschritten werden“). Die gleiche bestätigende Forderung erheben die Autoren für die Pegelhäufigkeiten zur Vermeidung von Schlafstörungen bei Zweiteilung der Nacht (Tabelle

6), während sie bei Tabelle 7 (Vermeidung von Schlafstörungen, Gesamtnacht) die Notwendigkeit sehen, die Unantastbarkeit des Maximalpegels für den kritischen Toleranzwert nochmals zu betonen. Soll das im Umkehrschluss heißen, dass die in Tabellen 2 und 6 genannten Maximalpegel entgegen der Definition des kritischen Toleranzwertes überschritten werden dürfen, solange die Überschreitungen nicht öfter als angegeben erfolgen? Oder sind entsprechend Tabelle 7 auch deutlich häufigere laute Lärmereignisse je Nacht zulässig, so lange sie nur (gering) unterhalb der angegebenen Maximalpegel liegen?

Abgesehen von diesen Unklarheiten ist festzuhalten, dass in Tabelle 2 ein Schutzziel „Vermeidung extraauraler Gesundheitsschäden“ festgelegt wird, ohne dass im Text erklärt wird, was unter „Gesundheitsschäden“ zu verstehen ist.

Zum Schutz vor extraauralen Gesundheitsschäden legen die Autoren weiters einen Dauerschallpegel für die Tagzeit (6 bis 22 Uhr) fest. Sie begründen dies damit, dass eine gemeinsame Betrachtung mit dem Nachtgrenzwert beim gegenwärtigen Wissensstand nicht möglich sei, wie auch insgesamt gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse (noch) nicht in ausreichender Weise vorlägen. Offenbar beziehen sie sich dabei auf epidemiologische Studien zu Bluthochdruck und/oder Herzinfarkttrisiko, die sich zum größten Teil mit Straßenverkehrslärm und nicht Fluglärm befassten und die nicht durchwegs konsistente Ergebnisse lieferten. Insgesamt scheinen die vorhandenen Studien aber darauf hinzuweisen, dass (a) das jeweilige Setting (urbane / ländliche Wohnstruktur) einen effektmodifizierenden Einfluss hat und (b) nächtliche Belastungen wahrscheinlich bedeutender sind als jene am Tage.

Wie die Autoren für den Tag zu 16-Stunden-Dauerschallpegeln von 70 (kritischer Toleranzwert) und 65 dB(A) (präventiver Richtwert) gelangen (auf die Angabe von Schwellenwerten wird hier verzichtet), ist unter Berücksichtigung der Studienlage nicht nachvollziehbar. Die Werte sind höher als gemeinhin für die Raumplanung bzw. als Grenzwerte für den Straßenverkehr empfohlen wird. Angesichts des stärker ausgeprägten Belästigungserlebens bei Flugverkehr und den aus der Charakteristik der Flugereignisse folgenden starken vegetativen Reaktionen ist diese Vorgangsweise nicht nachvollziehbar. Der kritische Toleranzpegel geht lediglich auf die obsoleete „19 mal 99“-Regel von Jansen zurück. Bereits Maschke et al. (2001a) belegten, dass diese Regel u.a. auf einer fehlerhaften Umrechnung auf A-bewertete Pegel beruht (korrekt gerechnet müsste man von einer „19 mal 90“ Regel sprechen). Darüber hinaus ist es generell fragwürdig, eine so weitreichende Schlussfolgerung wie eine Grenzwertempfehlung auf eine einzige Studie an einer beschränkten Teilnehmerzahl zu stützen, in der ein einziger Endpunkt (Fingerpuls) herausgehoben und willkürlich definiert wurde, ab welchem Ausmaß des Effektes dieser als „advers“ zu klassifizieren sei.

Tabelle 3 der „Synopsis“ soll Schwellen definieren, die geeignet seien, vor „erheblicher“ Belästigung schützen, ohne dass ausgeführt ist, ab wann eine Belästigung als „erheblich“ einzustufen ist bzw. ab welchem Ausmaß Belästigung zumutbar sei. Gerade diese Frage kann eigentlich nicht vom wissenschaftlichen Gutachter beantwortet werden. Der Gutachter sollte (unter anderem) darlegen, welcher Anteil (stark) Belästigter bei einer gegebenen Belastung zu erwarten ist. Die entsprechenden Dosis-Wirkungs-Kurven sind dabei kritisch zu würdigen (siehe dazu z.B. Guski & Schuemer 2007). Das Urteil, ob dieser (ungefähre) Anteil im Einzelfall und in Abwägung unterschiedlicher Interessen vertretbar ist, obliegt der Gesamtbeurteilung im jeweiligen Verfahren und nicht dem Fachgutachter. Die angegebenen Pegel (kritischer Toleranzwert 65 dB(A), präventiver Richtwert 62 dB(A) und Schwellenwert 55 dB(A)) sind jedenfalls so hoch, dass von einer nicht unerheblichen Anzahl Belästigter ausgegangen werden muss. Dies bestätigen die Autoren, indem sie ausführen: „Auch unter präventiven Gesichtspunkten muss ein bestimmter Anteil erheblich Belästigter ... akzeptiert werden. Eine Null-Belästigung gibt es nicht. (...) Der präventive Richtwert geht von 25% erheblich Belästigten aus (...)“. Es ist zu betonen, dass - wie wir dargelegt haben – weder eine Intensität der Belästigung noch der Anteil Belästigter wissenschaftlich und schon gar nicht vom Präventionsgedanken her begründet werden kann. Wir gehen bei unserer Ableitung ebenfalls von einem Anteil von 25% Belästigter aus, nicht, weil wir das für ein präventives Vorgehen halten, sondern weil dieser Anteil in konkreten Fällen benutzt und daher in der gesellschaftspolitischen Diskussion steht. Die Aussage es gäbe keine Null-Belästigung ist falsch, es ist vielmehr so, dass es kein niedrigstes Niveau zwischen Hörschwelle und Basispegel gibt, bei dem nicht Belästigung auftreten könnte. Abgesehen davon ist bei einem Schallpegel von 65 dB laut neueren Studien mit mehr als 25% Belästigten zu rechnen (Guski & Schuemer 2007).

Auch die Richtwerte zum Schutz des Nachtschlafes wurden kritisiert, speziell der „kritische Toleranzwert“ von 6 x 60 dB(A). Ein kurzer Überblick über die sich aus Griefahn (1990), Maschke et al. (2001b) und der DLR-Studie ergebenden Kurven für die Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel findet sich in Jansen und Ising (2004). Aus der vorliegenden Evidenz kann ein solches Kriterium nicht begründet werden. Die seinerzeit von Griefahn et al. (1976) durchgeführte Zusammenschau der damals vorliegenden Schlafuntersuchungen und die daraus abgeleitete Beziehung zwischen Schallpegel und Aufwachhäufigkeit war zwar verdienstvoll und hat der Beschäftigung mit der Frage der Schlafstörung durch Lärm neue Impulse gegeben, ist aber methodisch vollkommen falsch und der damals ermittelte Schwellenwert von 60 dB(A) für die Aufwachhäufigkeit daher nicht belastbar. Im Gegenteil: wird eine korrekte Auswertung vorgenommen, dann kann unter Zugrundelegung der gleichen Evidenz, je nach Modell, ein

Schwellenwert von 40 bis 50 dB(A) oder, wenn man die Unsicherheit der Regression mit einbezieht, sogar ein noch niedriger Wert abgeleitet werden. Damit ist dem kritischen Toleranzkriterium der Boden entzogen und kann daher nur als willkürliche Festlegung angesehen werden.

In der Tabelle 8 der „Synopsis“ werden die „Eckwerte“ als die beurteilungsrelevanten Richtwerte zusammengefasst. Hier werden nur noch kritische Toleranzwerte und präventive Richtwerte ohne Bezug auf einzelne Schutzziele bzw. -niveaus genannt. Es besteht die Gefahr, dass solche Vereinfachungen von den Entscheidungsträgern aus dem Kontext gelöst betrachtet werden, ohne dass klar wird, auf welchen Schutzzielen die Ergebnisse beruhen und welche Auswirkungen toleriert werden müssen.

Generell war es nach Erscheinen der „Synopsis“ sehr schwierig, sich kritisch damit auseinanderzusetzen, da es den meisten Wissenschaftlern nicht gelang, Zugang zu der Langfassung bzw. den ausführlichen Einzelgutachten zu erhalten.

Greiser (2007) greift in seiner Kritik auf die Originalgutachten zum Frankfurter Flughafen zurück, welche der „Synopsis“ zugrunde liegen. Beim Nachprüfen der in ihr zitierten Literatur in Bezug auf die Begründung der Maximalpegel traten bei dieser Prüfung Ungereimtheiten zutage, denn die Literaturangaben wären zum Teil falsch, bei anderen fanden sich in der zitierten Literatur niedrigere Maximalpegel als von den Autoren angegeben. Zwei Publikationen enthielten laut Greiser weder die von den Autoren zitierten Werte noch überhaupt die zitierten Parameter, in anderen Studien fanden sich lediglich Regressionsfunktionen und Daten zu Mittelungspegeln. Mangels direkten Zuganges zu den Gutachten kann diese Kritik hier nicht überprüft werden.

Auch Guski (2003) setzt sich in seinem Beitrag mit den einzelnen Gutachten (Scheuch & Jansen 2001; Spreng 2001; Griefahn et al. 2001) auseinander. Im Gegensatz zu Greiser (2007), der auf einige Details eingeht, unterzieht er die Gutachten und deren Literaturstellen einer statistischen Auswertung. Folgendes Zitat aus seiner Arbeit soll dies beispielhaft belegen:

*Das Gutachten von Scheuch und Jansen (2001) trägt den Titel „Gutachterliche Stellungnahme zu den gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnissen der Lärmwirkungsforschung und den daraus abzuleitenden Schlussfolgerungen für die Bewertung von Lärmimmissionen in der Nähe von Flughäfen“. Es umfasst 175 Seiten, von denen sich 45 mit „Grenz- und Orientierungswerten“ beschäftigen, 30 mit „Schlaf und Lärm“, 27 mit „Mechanismen der Belastungsbewältigung“, 21 mit „krankmachenden Wirkungen“, 15 mit „Belästigung“, 8 mit „Schutzzielen“ und 0 (Null) mit „wesentlichen Änderungen oder*

*Neuanlagen von Flughäfen“. Die Literaturliste enthält 265 Titel, davon beschäftigt sich einer (0,38 %) mit Belastungs-Änderungen.*

Guskis Hauptkritik geht dahin, dass das in der Überschrift der Synopse angekündigte Versprechen („Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen“) nicht eingelöst wurde: Kaum eine Arbeit der zitierten Literatur untersuche Belastungsänderungen. Vielmehr würden zumeist Lärmwirkungen unter stationären oder unter Laborbedingungen untersucht. Hinsichtlich Belästigung und Stresswirkungen sei das Ausmaß der Änderung jedoch sehr bedeutsam. Dieses Argument haben die Autoren der „Synopse“ bereits mit einer Nebenbemerkung zum Schutzziel „Vermeidung erheblicher Belästigung“ versucht zu entkräften: „Eine Überschussreaktion, eine bei Änderung der Lärmsituation erwartete, zunächst überproportional stärkere Belästigungsreaktion, ist wissenschaftlich nicht ausreichend fundiert, um bei Bewertungsgrenzen berücksichtigt zu werden.“ Dem gegenüber weist Guski (2003) darauf hin, dass im Einzelgutachten von Griefahn et al. (2001) diese Überschussreaktion sehr wohl ausführlich diskutiert werde. Im Folgenden führt er aus, dass eine solche Überschussreaktion sehr wohl existiert, wenn auch deren Quantifizierung schwierig ist und das Ausmaß von vielen verschiedenen Variablen (wie stark ist die Änderung der Belastung, in welchem Zeitraum entwickelt sie sich, usw.) abhängt. Abgesehen von der Überschussreaktion bei wesentlichen Änderungen der Belastung weist Guski auch darauf hin, dass selbst bei (quasi-)stationären Bedingungen über die Jahre eine Zunahme der Belästigten bzw. stark Belästigten zu verzeichnen ist (Guski & Schuemer 2007). Ältere Studien zum Belästigungsausmaß würden daher das tatsächlich zu erwartende Belästigungsausmaß unterschätzen.

### **5.5.2 WHO Night Noise Guidelines**

Im Jahr 2007 erschienen die Night Noise Guidelines for Europe, die eine umfassende Zusammenschau der Evidenz zur Wirkung nächtlicher Lärmexposition enthält. Sie wurden durch einen Grant der EU ermöglicht. Wir haben in Kapitel 5.1.6 die Zusammenfassung der Erkenntnisse dargestellt. Da für dieses Jahr, 2009, eine Neufassung der Night Noise Guidelines geplant ist, werden wir gegebenenfalls nach deren Erscheinen eine zusammenfassende Darstellung verfassen.

## 6 Verwendete Literatur

- Ancoli-Israel S, Cole R, Alessi C, Chambers M, Moorcroft W, Pollak CP (2003): The role of actigraphy in the study of sleep and circadian rhythms. *Sleep* 26:342-392.
- Babisch W (2006): Transportation noise and cardiovascular risk. Umweltbundesamt, WaBoLu Heft 01/2006.
- Babisch W, Houthuijs D, Pershagen G, Cadum E, Velonakis M, Katsouyanni K, Jarup L (2007): Associations between road traffic noise, aircraft noise and noise annoyance. Preliminary results of the Hyena study. ICA 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2-7 September 2007.
- Basner M, Buess H, Elmenhorst D, Gerlich A, Luks N, Maaß H, Mawet L, Müller EW, Müller U, Plath G, Quehl J, Samel A, Schulze M, Vejvoda M, Wenzel J (2004) Nachtfluglärmwirkungen. Forschungsbericht 2004-07/D. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln.
- Basner M, Isermann U, Samel A (2005): Die Umsetzung der DLR-Studie in eine lärmmedizinische Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. *Z Lärmbekämpfung* 52:109-123.
- Basner M, Isermann U, Samel A (2006a): Aircraft noise effects on sleep: Application of the results of a large polysomnographic field study. *J.Acoust.Soc.Am.* 119:2772-2784.
- Basner M, Siebert (2006b): Markov-Prozesse zur Vorhersage fluglärmbedingter Schlafstörungen. *Somnologie* 10:176-191.
- Basner M, Elmenhorst D, Maaß H, Müller U, Quehl J, Vejvoda M und Samel A (2007a): Vergleichende Untersuchung zu Verkehrslärmwirkungen auf den Schlaf. DLR-Projekt „Leiser Flugverkehr II“. Abschlussveranstaltung 17.09.2007 im DLR School Lab Göttingen.
- Basner M, Griefahn B, Müller U, Plath G, Samel A (2007b): An ECG based algorithm for the automatic identification of autonomic activations associated with cortical arousal. *Sleep* 30: 1349-61.
- Basner M, Müller U, Elmenhorst EV, Kluge G, Griefahn B (2008): Aircraft noise effects on sleep: a systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations. *Physiol Meas* 29:1089-1103.
- Basner M, Müller U, Griefahn B (2009): Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep. Inter-Noise 2009; Ottawa, Canada

- Beckers JH (2003): Anmerkungen zu den Vorschlägen von Prof. Dr. Barbara Griefahn, Prof. Dr. Dr. Gerd Jansen, Prof. Dr. Klaus Scheuch und Prof. Dr. Manfred Spreng: „Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen“ in der Zeitschrift für Lärmbekämpfung 49(5):171-175. Z Lärmbekämpfung 50:26-29.
- Berglund B, Stansfeld S, Kim R (2008): Overview of the World Health Organization Workshop on Aircraft Noise and Health. Proceedings ICBEN 2008:757-764.
- Bonnet MH, Doghramji K, Roehrs T, Stepanski EJ, Sheldon SH, Walters AS, Wise M, Chesson AL (2007): The scoring of arousal in sleep: reliability, validity, and alternatives. J Clin Sleep Med 3:133-145.
- Borbely AA (1982): A two process model of sleep regulation. Hum Neurobiol 1:195-204.
- Breugelmans O, Houthuijs D, van Kamp I, Stellato R, Wiechen C, Doornbos G (2007): Longitudinal effects of a sudden change in aircraft noise exposure on annoyance and sleep disturbance around Amsterdam airport. ICA 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2-7 September 2007.
- Brink M, Schierz C, Basner M, Samel A, Spreng M, Scheuch K, Stahel W, Bögli H (2006): Bericht zum Workshop „Aufwachwahrscheinlichkeit“. Bestimmung lärminduzierter Aufwachwahrscheinlichkeiten in der Nachtlärmwirkungsforschung und Anwendung entsprechender Wirkungsmodelle für Prognosezwecke. ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften.
- Bullinger M, Hygge S, Evans GW, Meis M, von Mackensen S (1999): The psychological cost of aircraft noise for children. Zentralbl Hyg Umweltmed 202:127-38.
- Clark C, Martin R, van Kempen E, Alfred T, Head J, Davies HW, Haines MM, Lopez Barrio I, Matheson M, Stansfeld SA (2006): Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension: the RANCH project. Am J Epidemiol 163:27-37.
- EC (European Communities 2002): Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. EU future noise policy, WG2-Dose/Effect. Luxemburg.
- Ehrenstein W, Schuster M, Müller-Limroth W (1982): Felduntersuchungen über Wirkungen von Lärm auf den schlafenden Menschen. Abschlußbericht des Umweltbundesamtes 1-101, Dessau, Deutschland.
- Eriksson C, Rosenlund M, Pershagen G, Hilding A, Östenson CG, Bluhm G (2007). Aircraft noise and incidence of hypertension. Epidemiology 18:716-721.



- Evans GW, Bullinger M, Hygge S (1998): Chronic noise exposure and physiological response: a prospective Study of children living under environmental stress. *Psychol Science* 9:75-77.
- Evans GW, Hygge,S, Bullinger,M (1995): Chronic noise and psychological stress. *Psychological Science* 6:333-338.
- FICAN (Federal interagency committee on aviation noise) (1997): Effects of aviation noise on awakenings from sleep. 1-7.
- Fidell S, Silvati L (1991): An assessment of the effect of residential acoustic insulation on prevalence of annoyance in an airport community. *J Acoust Soc Am* 89:244-247.
- Fidell S, Pearsons K, Tabachnick B, Howe R (2000): Effects on sleep disturbance of changes in aircraft noise near three airports. *J Acoust Soc Am* 107:2535-2547.
- Finegold LS, Elias B (2002): A predictive model of noise induced awakenings from transportation noise sources. Proceedings of the 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Dearborn.
- Giemulla E, Schorcht H (2004a): Juristische Bewertung von Fluglärm (Fluglärmsynopse), Teil I. *Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht* 53:386-394.
- Giemulla E, Schorcht H (2004b): Juristische Bewertung von Fluglärm (Fluglärmsynopse), Teil II. *Zeitschrift für Luft- und Weltraumrecht* 53:493-531.
- Greiser E, Greiser C, Jansen 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* 15:327-337.
- Greiser E (2007): Wie verallgemeinerungsfähig sind die Empfehlungen der sogenannten Fluglärm-Syopse und der DLR-Studie zum Nachtfluglärm? - Eine epidemiologische Bewertung. In: Oldiges M. (Hrsg.): *Der Schutz vor nächtlichem Fluglärm*. Nomos. Leipzig ISBN 978-3-8329-2573-4.
- Griefahn B (1990): Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 37:7-14.
- Griefahn B, Felscher-Suhr U, Höger R, Jedrusik P, Müller JI, Schreckenber D (2001): Erarbeitung von Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept. Dortmund: Manuskript.
- Griefahn B, Jansen G, Scheuch K, Spreng M (2002): Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen. *Z Lärmbekämpfung* 49:171-175.
- Griefahn B, Jansen G, Scheuch K, Spreng M: Synopse. Im Auftrag der Fraport AG (ohne Datum). <http://www.dflid.de/-Fraport>.

- Griefahn B, Marks A, Robens S (2006): Noise emitted from road, rail and air traffic and their effects on sleep. *J Sound Vib* 295:129-140.
- Griefahn B, Broede P, Marks A, Basner M (2008): Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. *Sleep* 31:569-577.
- Guski R, Wichmann U, Rohrman B, Finke H (1978): Konstruktion und Anwendung eines Fragebogens zur sozialwissenschaftlichen Untersuchung der Auswirkungen von Umweltlärm. *Zeitschrift für Sozialpsychologie* 9:50-65.
- Guski R, Felscher-Suhr U (1999): The concept of noise annoyance: How international experts see it. *J Sound Vibr* 223:513-527.
- Guski R (2003): Neuer Fluglärm gleich alter Fluglärm? Kritische Anmerkungen zu einer Expertenmeinung und ein Vorschlag zur Prognoseberechnung der erheblichen Belästigung bei wesentlich geänderter Fluglärmbelastung. *Z Lärmbekämpfung* 50:14-25.
- Guski R (2004): How to forecast community annoyance in planning noisy facilities. *Noise and Health* 6:59-64.
- Guski R, Schümer R (2007): Fraport-Synopse weiter fraglich. *Lärmbekämpfung* 2:236-239.
- Haider M, Möse JR, Eder J, Strauß G, Neuberger M (1984): Empfehlungen für die Verwendung medizinischer Begriffe im Rahmen umwelthygienischer Beurteilungsverfahren. *Mittlg Österr San Verw* 85:277-279.
- Haines MM, Stansfeld SA, Job RF, Berglund B, Head J (2001a): Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. *Psychol Med* 31:265-77.
- Haines MM, Stansfeld SA, Job RF, Berglund B, Head J (2001b): A follow-up study of effects of chronic aircraft noise exposure on child stress responses and cognition. *Int J Epidemiol* 30:839-45.
- Haines MM, Stansfeld SA, Brentnall S, Head J, Berry B, Jiggins M, Hygge S (2001c): The West London Schools Study: the effects of chronic aircraft noise exposure on child health. *Psychol Med* 31:1385-96.
- Haines MM, Stansfeld SA, Head J, Job RF (2002). Multilevel modelling of aircraft noise on performance tests in schools around Heathrow Airport London. *J Epidemiol Community Health* 56:139-44.
- Hatfield J, Job RFS, Hede AJ, Carter NL, Peplow P, Taylor R, Morrel S (2002): Human response to environmental noise: The role of perceived control. *Int J Behav Med* 9:341-359.

- Hatfield J, Job RFS, Hede AJ, Peploe P, Carter NL, Taylor R, Morrel S (2007): The effect of changes in noise exposure on perceived control over noise and its relationship with mood and reaction: a longitudinal survey. ICA 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2-7 September 2007.
- Haralabidis AS, Dimakopoulou K, Vigna-Taglianti F, Giampaolo M, Borgini A, Dudley ML, Pershagen G, Bluhm G, Houthuijs D, Babisch W, Velonakis M, Katsouyanni K, Jarup L for the HYENA Consortium (2008): Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *European Heart Journal* 29:658-664.
- Harder J (1999): Längsschnittstudie zum Verlauf von Stressreaktionen unter Einfluss von nächtlichem Fluglärm. *Wa-Bo-Lu* 4/99, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des UBA.
- Henry JP (1992): Biological basis of the stress response. *Integr Physiol Behav Sci* 27:66-83.
- Hoffmann W (2003): Leserbrief zum Leserbrief von Manfred Spreng in *ZfL* 50 (2003) Nr. 3 und zu „Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept...“ in *Z Lärmbekämpfung* 49 (2002) Nr. 5:171-175. *Z Lärmbekämpfung* 50:162.
- Houthuijs DJM, van Wiechen CMAG (2006): Monitoring van gezondheid en beleving rondom de luchthaven Schiphol. RIVM rapport 630100003/2006. Bilthoven.
- Hume K, Van F, Watson A (2003): Effects of aircraft noise on sleep: EEG based measurements. Manchester Metropolitan University, Manchester, UK.
- Hygge S, Evans GW, Bullinger M (2002): A prospective study of some effects of aircraft noise on cognitive performance in schoolchildren. *Psychol Science* 13:469-74.
- Iber C, Ancoli-Israel S, Chesson A, Quan SF (2007): *The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications 1<sup>st</sup> edn* (Westchester, IL: American Academy of Sleep Medicine).
- Ising H, Scheuch K, Spreng M: Kapitel 10 – Erkrankungen. In: *Fluglärm 2004. Stellungnahme des Interdisziplinären Arbeitskreises für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt. Berlin, September 2004.*
- Jarup L, Babisch W, Houthuijs D, Pershagen G, Katsouyanni K, Cadum E, Dudley ML, Savigny P, Seiffert I, Swart W, Breugelmans O, Bluhm G, Selander J, Haralabidis A, Dimakopoulou K, Sourtzi P, Velonakis M, Vigna-Taglianti F on behalf of the HYENA study team (2008): Hypertension and exposure to noise near airports-the HYENA study. *Environ Health Persp* 116:329-333.
- Jansen G, Ising H (2004): Kapitel 8 - Schlaf. In: *Fluglärm 2004. Stellungnahme des Interdisziplinären Arbeitskreises für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt. Berlin, September 2004.*

- Job RFS (1988): Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *J Acoust Soc Am* 83: 991-1001.
- Job RFS, Hatfield J, Hede AJ, Peplow P, Carter NL, Taylor R, Morrell S (2007): The role of attitudes and sensitivity in reactions to changing noise. ICA 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2-7 September 2007.
- Jones K, Harrison Y (2001): Frontal lobe function, sleep loss and fragmented sleep. *Sleep Medicine Reviews* 5:463-475.
- Kalivoda M, Steiner J (Hrsg.) (1998): Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik. Springer Wien New York.
- Keidel WD, Spreng M (1976): Neuro-elektrophysiologische Lärmbewertung. ReportBMI/UB II 5-520-01, Technische Informations Bibliothek, AC 2890, Hannover.
- Lercher P (1996): Environmental noise and health: an integrated research perspective. *Environment International* 22:119-127.
- Lind EA, Kanfer R, Earley PC (1990): Voice, control and procedural justice; instrumental and noninstrumental concerns in fairness judgements. *J Pers Soc Psychol* 59:952-959.
- Maaß H, Basner M (2006) Nachtfluglärmwirkungen: Stresshormone. Forschungsbericht 2004-09/E. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln.
- Maris E, Stallen PJ, Vermunt R, Steensma H (2007): Noise within the social context: Annoyance reduction through fair procedures. *J Acoust Soc Am* 121:2000-2010.
- Marks A, Griefahn B, Basner M (2008): Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise. *Noise Contr Eng J* 56:52-62.
- Maschke C, Arndt D, Ising H, Laude G, Thierfelder W, Contzen S (1995a): Nachtfluglärmwirkungen auf Anwohner. Stuttgart: Gustav Fischer.
- Maschke C, Arndt D, Ising H, Laude G, Thierfelder W, Contzen S (1995b): Der Einfluss von Nachtfluglärm auf die Stresshormonausscheidung von Flughafenwohnern. *Schriftenr Wasser Boden Lufthyg* 96:1-140,I-XIX.
- Maschke C, Hecht K, Wolf U, Feldmann J (2001a): 19x99 Dezibel(A) - Ein gesicherter Befund der Lärmwirkungsforschung? *Bundesgesundheitsbl* 44:137-148.
- Maschke C, Hecht K, Wolf U (2001b): Nächtliches Erwachen durch Fluglärm. Beginnen Aufwachreaktionen bei Maximalpegeln von 60 Dezibel (A)? *Bundesgesundheitsbl* 44:1001-1010.
- Maschke C, Harder J, Ising H, Hecht K, Thierfelder W (2005). Stress hormone changes in persons exposed to simulated night noise. *Noise Health* 5:35-45.

- Maschke C, Hecht K, Wolf U (2004) Nocturnal awakenings due to aircraft noise. Do wake up reactions begin at sound level 60 dB(A)? *Noise Health* 6:21-33.
- Maschke C, Feldmann J, Hecht K (2004): „Kritische Toleranzwerte“ – lärmmedizinischer Fortschritt oder anachronistische Richtwerte in neuem Gewand? *Z Lärmbekämpfung* 51:59-64.
- Michaud DS, Fidell S, Pearsons K, Campbell KC, Keith SE (2007): Review of field studies of aircraft noise-induced sleep disturbance. *J Acoust Soc Am* 121:32-41.
- Miedema HME, Vos H (1998): Exposure-response relationships for transportation noise. *J Acoust Soc Am* 104:3432-3445.
- Miedema HME, Oudshoorn GM (2001): Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ. Health Perspect* 109:409-416.
- Miedema HME, Passchier-Vermeer W, Vos H (2003): Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance. TNO Inro report 2002-59, Delft, Nederland.
- Miedema HME, Vos H (2004): Self-reported sleep disturbance caused by aircraft noise. TNO Inro report 2004-15, Delft, Nederland.
- Miedema HME, Vos H (2007): Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 Studies. *Behavioral Sleep Medicine* 5:1-20.
- Miyakawa M, Matsui T, Hiramatsu, K (2007). Relationship between psychiatric disorder and disturbances of daily life due to aircraft noise exposure – epidemiological study around Narita International Airport. *Internoise 2007. Proceedings of the 2007 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Istanbul, Turkey: Turkish Acoustical Society.*
- Muzet A (2007): Environmental noise, sleep and health. *Sleep Med Rev* 11:135-42.
- Muzet A, Weber LD, Di Nisi J, Ehrhart J (1985): Comparaison de la réactivité cardiovasculaire au bruit au cours de la veille et du sommeil. Strasbourg: Centre d'étude bioclimatique du CNRS. (Convention No. 82243I).
- Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung (ÖAL) (1986): Die Wirkungen des Lärms auf den Menschen - Beurteilungshilfen für den Arzt. Richtlinie 6/18.
- Oliva C (1998): Belastungen der Bevölkerung durch Flug- und Straßenlärm: Eine Lärmstudie am Beispiel der Flughäfen Genf und Zürich. Berlin: Duncker und Humbolt.

- Ollerhead JB, Jones CJ, Cadoux RE, Woodley A, Atkinson BJ, Horne JA, Pankhurst F, Reyner L, Hume KI, Van F, Watson A, Diamond ID, Egger P, Holmes D, McKean J (1992): Report on a field study of aircraftnoise and sleep disturbance. Department of Transport from the Department of Safety, Environment and Engineering; Civil Aviation Authority, London.
- Ortscheid J, Wende H. (2004): Sind 3 dB wahrnehmbar? Eine Richtigstellung. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 51:80 – 85.
- Ozimek E, Zwislocki JJ (1996): Relationships of intensity discrimination to sensation and loudness levels: dependence on sound frequency. J Acoust Soc Am 100:3304-20.
- Passchier-Vermeer W, Vos H, Steenbekkers J, van der Ploeg F, Groothuis-Oudshoorn K (2002): Sleep disturbance and aircraft noise exposure: Exposure-effect relationships. TNO-Inro report 2002-027, TNO Institute for Traffic and Transport, Delft.
- Passchier-Vermeer W (2003): Night-time noise events and awakening. TNO-Inro report 2003-32, TNO Institute for Traffic and Transport, Delft.
- Quehl J, Samel A, Gerzer R (2005): Nachtfluglärmwirkungen: Psychologische Wirkungen. Forschungsbericht 2004-10/D. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2008): Umweltgutachten 2008 - Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. <http://www.umweltrundschau.de/cms/the-news/200-sachverstaendigenrat-fuer-umweltfragen-sru-gutachten-2008>. Kapitel 9 - Lärmschutz.
- Schapkin SA, Falkenstein M, Marks A, Griefahn B (2006): Executive brain functions after exposure to nocturnal traffic noise: effects of task difficulty and sleep quality. Eur J Appl Physiol 96:693-702.
- Scheuch K, Jansen G (2001): Gutachterliche Stellungnahme zu den gegenwärtigen wissenschaftlichen Erkenntnissen der Lärmwirkungsforschung und den daraus abzuleitenden Schlussfolgerungen für die Bewertung von Lärmimmissionen in der Nähe von Flughäfen. Manuskript: Bannewitz & Essen.
- Scheuch K, Jansen G, Spreng M (2007a): Fluglärmschutzkonzept der sogenannten Synopse auf dem Prüfstand neuerer Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung sowie gesetzlicher Rahmenbedingungen – Teil 1. Lärmbekämpfung 2:135-143.

- Scheuch K, Jansen G, Spreng M (2007b): Fluglärmschutzkonzept der sogenannten Synopse auf dem Prüfstand neuerer Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung sowie gesetzlicher Rahmenbedingungen – Teil 2. *Lärmbekämpfung* 2:187-193.
- Schreckenber D, Meis M (2006): Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Frankfurter Flughafens. Gutachten im Auftrag des Regionalen Dialogforums Flughafen Frankfurt. Endbericht, Bochum, Oldenburg: AG Fluglärmwirkung.
- Schreckenber D, Meis M (2007): Lärmbelästigung und Lebensqualität in der Bevölkerung am Frankfurter Flughafen. *Z Lärmbekämpfung* 2:225-235.
- Schultz TJ (1978): Synthesis of social surveys on noise annoyance. *J Acoust Soc Am* 72:377-405.
- 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: 2442-51.
- Silva GE, Goodwin JL, Sherrill DL, Arnold JL, Bootzin RR, Smith T, Walsleben JA, Baldwin CM, Quan SF (2007): Relationship between reported and measured sleep times: the sleep heart health study (SHHS). *J Clin Sleep Med* 3:622-630.
- Spreng M (2000): Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Schall. Vortrag beim 1. Fach-Symposium zum Ausbau des Frankfurter Flughafens, 13. September 2000. [http://www.rhein-main-institut.de/docs/symposium-1-Vortrag\\_Spreng.html](http://www.rhein-main-institut.de/docs/symposium-1-Vortrag_Spreng.html).
- Spreng M (2001): Psychophysiologische Lärmwirkungen. Periphere und zentrale Aktivierungsprozesse. In: Wichmann HE, Schlipköter HW, Fülgraff G: *Handbuch der Umweltmedizin, VII-1: Lärm*. Ecomed, Landsberg.
- Spreng M (2001): Gutachterliche Physiologisch/Medizinische Ausführungen über Lärmwirkungen. Flughafen Frankfurt/Main. Manuskript: Erlangen.
- Spreng M (2002): Cortical excitations, cortical excretion and estimation of tolerable nightly over-flights. *Noise Health* 4:39-46.
- Spreng M (2004): Noise induced nocturnal cortisol secretion and tolerable overhead flights. *Noise Health* 6:35-47.
- Stallen PJM (1999): A theoretical framework for environmental noise annoyance. *Noise Health* 3:69-79.
- Stansfeld SA, Berglund B, Clark C, Lopez-Barrio I, Fischer P, Ohrstrom E, Haines MM, Head J, Hygge S, van Kamp I, Berry BF; RANCH study team (2005): Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *Lancet* 365:1908-9.
- Tyler TR (2000): Social justice: outcome and procedure. *Int J Psychol* 35:117-125.

- TNO-RIVM (1998): Hinder, slaapverstoring, gezondheids-en belevingsaspecten in de regio Schiphol. RIVM en TNO: Bilthoven en Leiden.
- UBA Berlin (1985): Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen. Die Beeinträchtigung der Kommunikation durch Lärm. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 32:95-99.
- US-EPA (1974): Information on levels of environmental noise requisite to protect public health and welfare with an adequate margin of safety. Washington DC, US Environmental Protection Agency, Report EPA 550/9-74.004.
- Vallet M, Gagneux JM, Simonet F (1980): Effects of aircraft noise on sleep: an in situ experiment. ASHA reports No 10.
- van Kempen E, van Kamp I, Fischer P, Davies H, Houthuijs D, Stellato R, Clark C, Stansfeld S (2006): Noise exposure and children's blood pressure and heart rate: the RANCH project. Occup Environ Med 63:632-639.
- World Health Organization (WHO) (1999): Guidelines for Community Noise. Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (Eds.) Geneva; <http://www.who.int/peh/noise/guidelines2.html>.
- World Health Organisation (WHO) (2007) Night Noise Guidelines (NNGL) for Europe. Bonn, Germany; [http://ec.europa.eu/health/ph\\_projects/2003/action3/docs/2003\\_08\\_frep\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_projects/2003/action3/docs/2003_08_frep_en.pdf).
- Wildanger R (2003): Leserbrief zu den Vorschlägen von Prof. Dr. Barbara Griefahn, Prof. Dr. Dr. Gerd Jansen, Prof. Dr. Klaus Scheuch und Prof. Dr. Manfred Spreng: „Fluglärmkriterien für ein Schutzkonzept bei wesentlichen Änderungen oder Neuanlagen von Flughäfen/Flugplätzen“ in der Zeitschrift für Lärmbekämpfung (2002) 49:171-175. Z Lärmbekämpfung 50:29-30.
- Wirth K, Brink M, Schierz C (2004): Lärmstudie 2000: Fluglärmbelastigung um den Flughafen Zürich-Kloten. Z Lärmbekämpfung 51:48-56.