

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 44 823 55 11  
F +41 44 823 47 93  
www.empa.ch



Materials Science & Technology

Amt für Verkehr des Kantons Zürich  
Walchenplatz 1  
Postfach  
8090 Zürich

## Zürcher Fluglärmindex ZFI

### Berechnungsvorschrift

<b>Auftrags-Nr.:</b>	<b>441'255</b>	<b>int. 513.2298</b>
Bericht-Nr.:	441'255-4	
Auftraggeber:	Amt für Verkehr des Kantons Zürich	
Anzahl Seiten:	35	
Die Verfasser:	P. Huber G. Thomann	

Status: genehmigter Bericht

be\_441255-4\_ZFI\_V2\_L.doc

---

Dübendorf, 28.11.2006  
Projektleiter:

Abteilung Akustik  
Abteilungsleiter:

Georg Thomann

Kurt Eggenschwiler

## Zusammenfassung

Im Jahre 2005 wurde die Volksinitiative „Für eine realistische Flughafenpolitik“ eingereicht. Sie verlangt, dass die jährliche Zahl von Flugbewegungen des Flughafens Zürich 250'000 nicht überschreitet und die Nachtflugsperrzeit nicht weniger als neun Stunden beträgt. Die Regierung des Kantons Zürich lehnt diese Initiative ab. Sie unterbreitete Anfang Januar 2006 einen Gegenvorschlag. An Stelle der Flugbewegungen soll die Anzahl der vom Fluglärm stark beeinträchtigten Personen durch Festlegung eines Richtwerts begrenzt werden. Der Richtwert soll sich dabei an den Flugbewegungen des Jahres 2000 orientieren.

Am 6. März 2006 präsentierte Robert Hofmann vor einem eingeladenen Expertengremium die im Auftrage der Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich (VD) erstellte Machbarkeitsstudie zum Zürcher Fluglärmindex *ZFI*. Unter dem Kürzel *ZFI* ist eine Einzahlgrösse zu verstehen, welche die Beeinträchtigung der Bevölkerung durch Fluglärm beschreibt. Sie setzt sich gemäss Vorschlag von Robert Hofmann aus zwei additiven Grössen zusammen: Anzahl durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigte Personen (Highly Annoyed *HA*) und Anzahl durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörte Personen (Highly Sleep Disturbed *HSD*).

Die Empa, Abteilung Akustik setzte die in der Machbarkeitsstudie vorgeschlagenen Berechnungsalgorithmen und weitere Vorschläge des Expertengremiums um. Anhand dieser Daten entschied sich die Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich für die definitiven Berechnungsalgorithmen des *ZFI*.

Die Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (Highly Annoyed *HA*) werden anhand einer Dosis-Wirkungsbeziehung von Henk M.E. Miedema ermittelt. Als Belastungsmass wird ein 16-Stunden-Mittelungspegel verwendet, bei dem die Belastung der ersten (06 bis 07 Uhr) und letzten Tagesstunde (21 bis 22 Uhr) mit einem Malus von 5 dB versehen wird.

Die Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (Highly Sleep Disturbed *HSD*) wird über die Anzahl durch den Fluglärm induzierten zusätzlichen Aufwachreaktionen (*AWR*) ermittelt. Diese werden nach einer Formel berechnet, welche aus einer Studie des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Nachtfluglärmwirkung stammt. Die Formel liefert anhand der Maximalpegel am Ohr der schlafenden Person, die Wahrscheinlichkeit einer durch Fluglärm induzierten zusätzlichen Aufwachreaktion. Die Unterteilung in Tag und Nacht wird aus der Lärmschutzverordnung LSV übernommen. Der Tag dauert somit von 06 bis 22 Uhr und die Nacht von 22 bis 06 Uhr.

Im vorliegenden Bericht werden die Berechnungsalgorithmen des *ZFI* dokumentiert und für die Jahre 1998 bis 2004 die *HA*, *HSD* und der *ZFI* berechnet. Zu Vergleichszwecken werden die *HA*, *HSD* und der *ZFI* der Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten der LSV gegenübergestellt.

Zur Berechnung der *HA* und *HSD* wurden keine Neusimulationen gemacht, sondern bestehende Belastungsrechnungen benutzt. Die Maximalpegelhäufigkeiten zur Ermittlung der Anzahl Aufwachreaktionen wurden aus bestehenden Datensätzen berechnet.

# Inhalt

1.	Orientierung.....	4
1.1.	Ausgangslage.....	4
1.2.	Auftrag.....	5
2.	Umfang und Inhalt der Untersuchungen .....	6
2.1.	Überblick.....	6
2.2.	Inhaltliche Systemabgrenzung .....	6
2.3.	Zeitliche Systemabgrenzung .....	7
2.4.	Räumliche Systemabgrenzung .....	8
2.5.	Gliederung des Berichts .....	8
3.	Grundlagen und Methodik .....	9
3.1.	Berechnungsvorschrift für die Ermittlung des ZFI .....	9
3.2.	Die Anzahl vom Fluglärm betroffenen Personen (AbP) .....	13
3.3.	Technische Umsetzung .....	14
4.	Eingabedaten für die Belastungsrechnungen .....	21
5.	Untersuchungsergebnisse.....	22
5.1.	Quantifizierungen .....	22
6.	Unsicherheit der Berechnungen.....	25
6.1.	Vorbemerkung.....	25
6.2.	Übersicht .....	25
6.3.	Massgebende Werte .....	25
7.	Glossar .....	26
7.1.	Verwendete Begriffe und Abkürzungen .....	26
7.2.	Abbildungsverzeichnis.....	28
7.3.	Tabellenverzeichnis.....	28
8.	Bibliografie.....	29
9.	Anhang .....	31
A1	Jährliche Flugbewegungszahlen der Grossflugzeuge .....	32
A2	Pistenbelegung am Tag und in der Nacht.....	33
A3	Zahlen zu den Abbildungen des Berichts in tabellarischer Form.....	35

# 1. Orientierung

## 1.1. Ausgangslage

Die Volksinitiative „Für eine realistische Flughafenpolitik“ verlangt, dass die jährliche Zahl von Flugbewegungen des Flughafens Zürich 250'000 nicht überschreitet und die Nachtflugsperrzeit nicht weniger als neun Stunden betrage. Die Regierung des Kantons Zürich lehnt diese Initiative ab und unterbreitete Anfang Januar 2006 einen Gegenvorschlag, welcher an Stelle der Flugbewegungen die Anzahl der vom Fluglärm stark gestörten Personen (*AsgP*) durch Festlegung eines Richtwerts begrenzt. Der Richtwert soll sich dabei an den Flugbewegungen des Jahres 2000 orientieren (Art. 3, Abs. 3 (neu) Flughafengesetz). [19]

Der Gegenvorschlag geht auf einen Regierungsratsbeschluss (RRB) aus dem Jahre 2004 zurück. Darin wird festgehalten: „Der Kanton Zürich strebt einen bestmöglichen Schutz der Wohnbevölkerung vor den Lärmauswirkungen des Betriebs des Flughafens Zürich an. Die Anzahl der von schädlichem oder lästigem Fluglärm betroffenen Einwohner ist zu begrenzen und zu verringern. Der Regierungsrat sucht daher nach Möglichkeiten, einen verbindlichen Richtwert für die vertretbaren Gesamtlärmimmissionen des Flughafens Zürich zu definieren.“ [20]

Die Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich (VD) wurde noch im September 2004 vom Regierungsrat beauftragt, nach geeigneten Richtwerten zu suchen. Das Amt für Verkehr des Kantons Zürich (AFV) wandte sich mit derselben Anfrage an Robert Hofmann. Ende Juni 2005 präsentierte er vor dem Gesamtregierungsrat einen möglichen Lösungsansatz. Daraufhin beschloss die Volkswirtschaftsdirektorin, den gemachten Vorschlag zu konkretisieren und auf die praktische Realisierbarkeit zu überprüfen. Robert Hofmann übernahm somit den Auftrag, eine einzige Zahlengrösse zu suchen, welche die "Anzahl der von schädlichem oder lästigem Lärm betroffenen Bevölkerung" so getreu wie möglich abbildet, resp. zu untersuchen, ob es eine solche Zahlengrösse überhaupt gibt.

Am 6. März 2006 präsentierte Robert Hofmann vor einem eingeladenen Expertengremium die im Auftrag der Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich (VD) erstellte Machbarkeitsstudie zum Zürcher Fluglärmindex *ZFI* [14]. Unter dem Kürzel *ZFI* ist eine Einzahlgrösse zu verstehen, welche die Beeinträchtigung der Bevölkerung durch Fluglärm beschreibt. Sie setzt sich gemäss Vorschlag von Robert Hofmann aus zwei additiven Grössen zusammen: Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (*Highly Annoyed HA*) und Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (*Highly Sleep Disturbed HSD*). Die Studie beschreibt getrennt für den Tag (06 bis 22 Uhr) und die Nacht (22 bis 06 Uhr) jeweils drei resp. fünf so genannte Dosis-Wirkungsbeziehungen (*DW*) zur Berechnung der *HA* und *HSD*. Zudem wird ein Malus für die erste Tagesstunde (06 bis 07 Uhr) von 5 bis 10 dB vorgeschlagen.

Um eine Referenzgrösse für die Festlegung des Richtwertes zu erhalten wurden vom Amt für Verkehr zwei Referenzzustände definiert, für welche die Empa, den *ZFI* nach den zu diesem Zeitpunkt noch zur Diskussion stehenden Methoden ermittelte.

Anhand des erarbeiteten Datenmaterials legte die Volkswirtschaftsdirektion die definitiven Berechnungsalgorithmen für den *ZFI* fest.

## 1.2. Auftrag

Das Amt für Verkehr des Kantons Zürich (AFV) beauftragt die Empa, Abteilung Akustik, die definitiven Berechnungsalgorithmen des *ZFI* zu dokumentieren und für die Jahre 1998 bis 2004 den *ZFI* zu berechnen. Sämtliche dafür relevanten Basisgrössen (Pegel, Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen, *HA*, *HSD*, Wohnbevölkerung) müssen im Hektarraster verfügbar sein.

Die Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (*HA*), die Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (*HSD*) und der *ZFI* soll mit den Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten für Fluglärm (LSV, Anhang 5 [16]) verglichen werden. Zur Quantifizierung müssen aktuelle Bevölkerungsdaten sowohl von der Schweiz wie auch von Süddeutschland verwendet werden (Volkszählung 2000). Die Resultate sind in einem technischen Bericht zu Händen des Auftraggebers zu dokumentieren.

## 2. Umfang und Inhalt der Untersuchungen

### 2.1. Überblick

Der *ZFI* ist eine Einzelgrösse, die sich aus der Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (*HA*) und der Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (*HSD*) zusammensetzt. Die *HA* werden mittels einer Dosis-Wirkungsbeziehung von Henk M.E. Miedema [18], die *HSD* werden über die Anzahl durch Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen *AWR* ermittelt [1],[2].

Für die Berechnung des *ZFI* der Jahre 1998 bis 2004 werden bestehende Belastungsrechnungen benutzt, die im Rahmen des jährlichen Fluglärmnachweises für den Flughafen Zürich im Auftrag von Unique durch die Empa, Abteilung Akustik durchgeführt wurden [4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11]. Es wurden keine neuen Fluglärmrechnungen gemacht.

### 2.2. Inhaltliche Systemabgrenzung

Bei der Berechnung des *ZFI* wird strikte nach Tag und Nacht unterschieden. Dabei kommen die in der LSV gemachten Abgrenzungen zur Anwendung (vgl. Kapitel 2.3). Für den Tag (06 bis 22 Uhr) werden somit nur die durch den Fluglärm im Wachzustand stark belästigten Personen bestimmt, in der Nacht (22 bis 06 Uhr) die durch den Fluglärm stark im Schlaf gestörten Personen. Eine allfällige Schlafstörung in der Zeit von 06 bis 22 Uhr, resp. eine starke Belästigung im Wachzustand von 22 bis 06 Uhr bleibt unberücksichtigt. Schlafstörung und Belästigung im Wachzustand werden mittels folgender Indizes beschrieben:

**HA**        **Highly Annoyed:** Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen. Der Index *HA* wird nur für den Tag von 06 bis 22 Uhr berechnet. *HA* wird vorliegend synonym für *AsgP* (Anzahl durch den Fluglärm stark gestörte Personen) verwendet, welche in den letzten zehn Jahren als Kennzahl zur Beurteilung von Fluglärmbelastungen verwendet wurde.

**HSD**        **Highly Sleep Disturbed:** Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen. Der Index *HSD* wird nur für die Nacht (22 bis 06 Uhr) berechnet.

**ZFI**        **Zürcher Fluglärmindex:** Anzahl der durch Fluglärm des Flughafens Zürich stark beeinträchtigten Personen resp. Anzahl Personen, die sich durch Fluglärm stark belästigt und/oder durch Fluglärm stark im Schlaf gestört fühlen. Der *ZFI* berechnet sich aus der Summe der Teilindizes *HA* und *HSD*.

Durch Einsetzen der Fluglärmbelastungen in die Dosis-Wirkungsbeziehungen ergeben sich die prozentualen Anteile für starke Belästigung resp. starke Schlafstörung. Werden diese Anteile mit der Wohnbevölkerung  $N_{pop}$  multipliziert, so erhält man die *HA* resp. *HSD*.  $N_{pop}$  ist nicht zu verwechseln mit den *AbP*, welche die Anzahl vom Fluglärm betroffenen Personen über den Belastungsgrenzwerten angibt. Es müssen somit folgende zusätzliche Grössen quantifiziert und ausgewiesen werden:

**$N_{pop}$**         Population.  $N_{pop}$  steht in einer Auflösung von 100x100 Metern (Hektarraster) zur Verfügung. Es werden die Daten der Volkszählung 2000 verwendet. Für Süddeutschland stehen keine Hektardaten zur Verfügung, sondern nur die Anzahl Einwohner pro Gemeinde. Diese werden gleichmässig auf die Hektarpunkte der Siedlungsgebiete der entsprechenden Gemeinde verteilt. Es werden ebenfalls die Einwohnerzahlen des Jahres 2000 verwendet.

**AbP** Anzahl vom Fluglärm betroffene Personen. Sie entspricht der Summe aller Personen ( $N_{pop}$ ) innerhalb eines vorgegebenen, jedoch frei wählbaren Perimeters. Der Begriff wird im Zusammenhang mit der Bestimmung der Anzahl Personen über den Belastungsgrenzwerten für Fluglärm benutzt ( $AbP_{>PW}$ ;  $AbP_{>IGW}$ ;  $AbP_{>AW}$ ). In der vorliegenden Untersuchung werden nur die AbP über den Immissionsgrenzwerten ( $AbP_{>IGW}$ ) ausgewiesen und mit den *HA* und *HSD* verglichen.

**AWR** Anzahl durch Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen. Die *AWR* werden für die gesamte Nacht (22 bis 06 Uhr) berechnet.

Bei der Berechnung des *ZFI* für die Jahre 1998 bis 2004 werden nur die Bewegungen der Grossflugzeuge berücksichtigt. Als Grossflugzeuge gelten nach Lärmschutzverordnung LSV Anhang 5 [16] Luftfahrzeuge mit einem höchstzulässigen Abfluggewicht von mehr als 8'618 kg. Die Kleinluftfahrzeuge werden bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, da sie einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Gesamtbelastung beim Flughafen Zürich und damit auf die Ermittlung des *ZFI* haben.

Bei den Fluglärmbelastungen sowie bei den auf der Basis der Belastungen ermittelten *HA*, *HSD* und *ZFI* handelt es sich um Jahresmittelwerte.

### 2.3. Zeitliche Systemabgrenzung

In der vorliegenden Untersuchung werden die *HA*, *HSD* und der *ZFI* sowie sämtliche relevanten Basisgrössen (Pegel, Aufwachreaktionen etc.) für die Jahre 1998 bis 2004 ermittelt und ausgewiesen.

Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die diversen Zeitperioden, die für die vorliegende Untersuchung massgebend sind.

**Tabelle 2-1 Zeitperioden**

Bezeichnung	Abkürzung	Zeitperiode	Beurteilungszeit
Tag	T	06 bis 22 Uhr	16 h
Nacht	N	22 bis 06 Uhr	8 h
1. Nachtstunde	N1	22 bis 23 Uhr	1 h
2. Nachtstunde	N2	23 bis 05 Uhr	1 h
Letzte Nachtstunde	N3	05 bis 06 Uhr	1 h
1. Tagesstunde	T1	06 bis 07 Uhr	1 h
Letzte Tagesstunde	T16	21 bis 22 Uhr	1 h

## 2.4. Räumliche Systemabgrenzung

Bei den Belastungsrechnungen der letzten Jahre wurden wegen unterschiedlicher Anforderungen verschiedene Berechnungsausschnitte verwendet [4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11]. Tabelle 2-2 gibt einen Überblick.

**Tabelle 2-2 Berechnungsausschnitte für die Jahre 1998 bis 2004**

Jahr	Bezeichnung	Ecke unten links [in CH-Landeskoordinaten]	Ecke oben rechts [in CH-Landeskoordinaten]	Ausdehnung	Fläche
1998	ZRH98	655'000 / 235'000	712'000 / 282'000	O - W: 57 km N - S: 47 km	2'679 km <sup>2</sup>
1999	ZRH99				
2000	ZRH00				
2001	ZRH01	655'000 / 230'000	723'000 / 282'000	O - W: 68 km N - S: 52 km	3'536 km <sup>2</sup>
2002	ZRH02				
2003	ZRH03				
2004	ZRH04	650'000 / 230'000	723'000 / 282'000	O - W: 73 km N - S: 52 km	3'796 km <sup>2</sup>

Die Maschenweite des Bodengitters, auf dem die einzelnen Belastungswerte berechnet werden, beträgt im gesamten Berechnungsausschnitt 250 Meter. Um die Werte im Hektarraster zu erhalten, wird zwischen den Gitterpunkten linear interpoliert.

Die *HA*, *HSD* und der *ZFI* werden nicht im gesamten Berechnungsausschnitt ausgewiesen, sondern nur innerhalb des Untersuchungsperimeters. Der Untersuchungsperimeter wird durch ein Abbruchkriterium bei der Ermittlung der *HA* und *HSD* bestimmt. Bei den *HA* wird das Abbruchkriterium bei einer Tagesbelastung von 47 dB festgelegt, bei den *HSD* bei einer Nachtbelastung von 37 dB (siehe Kapitel 3.1). Die Festlegung von Abbruchkriterien ist notwendig, damit der *ZFI* nicht zu träge auf Veränderungen reagiert.

Zur besseren Verständlichkeit ein kleines Beispiel dazu: Ist an einem Hektarpunkt *i* innerhalb des Berechnungsausschnitts die massgebliche Tagesbelastung zur Ermittlung der *HA* in einem Jahr unter 47 dB, so liegt der entsprechende Hektarpunkt für die Berechnung der *HA* des entsprechenden Jahres ausserhalb des *HA*-Untersuchungsperimeters, und die *HA* werden an diesem Hektarpunkt null gesetzt. Ist die Nachtbelastung im entsprechenden Jahr grösser als 37 dB, so liegt der Hektarpunkt innerhalb des *HSD*-Untersuchungsperimeters des entsprechenden Jahres, und die *HSD* werden an diesem Hektarpunkt für dieses Jahr ermittelt und fliessen in die Berechnung des *ZFI* ein. Somit gibt es für jedes Jahr, für welches der *ZFI* ermittelt werden soll, unterschiedliche *HA*- und *HSD*-Untersuchungsperimeter, innerhalb derer die entsprechenden Werte ausgewiesen werden.

## 2.5. Gliederung des Berichts

Der vorliegende Bericht enthält in den ersten beiden Kapiteln die Beschreibung sowie Analyse des Auftrags. Im nachfolgenden Kapitel 3 werden die Grundlagen sowie die angewendete Methodik zur Berechnung der *HA*, *HSD* und des *ZFI* beschrieben. Kapitel 4 enthält die Eingabedaten für die Fluglärm-berechnung, welche sich auf eine Zusammenstellung der pro Jahr und Zeitperiode massgeblichen Flugbewegungen beschränkt. In Kapitel 5 werden die Resultate der Untersuchung präsentiert. Im Anschluss dazu werden einige Angaben zur Berechnungsunsicherheit gemacht (Kapitel 6). Der Bericht wird durch einen Anhang ergänzt, welcher zusätzliche Daten und Tabellen enthält.

### 3. Grundlagen und Methodik

#### 3.1. Berechnungsvorschrift für die Ermittlung des ZFI

Der Zürcher Fluglärmindex *ZFI* berechnet sich durch Addition der Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen *HA* und der Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen *HSD*.

**Formel 3-1**  $ZFI = HA + HSD$

##### 3.1.1. Bestimmung der *HA*-Komponente

Die Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen *HA* ergibt sich durch Überlagerung eines Belastungszustandes mit der Wohnbevölkerung unter Verwendung einer vorgegebenen Dosis-Wirkungsbeziehung nach folgendem Prinzip: In den Gitterpunkten eines vorgegebenen Bodenrasters werden die akustischen Variablen sowie die Anzahl Personen bestimmt. Durch Einsetzen der akustischen Grössen in die Funktionsgleichung der Dosis-Wirkungsbeziehung ergibt sich je Gitterpunkt der Prozentsatz (oder die Wahrscheinlichkeit) für starke Belästigung  $\%HA_i$ . Wird dieser Prozentsatz mit der Anzahl Personen je Gitterpunkt  $N_{pop,i}$  multipliziert, so erhält man direkt die räumliche Verteilung der *HA*, bezogen auf einen vorgegebenen Belastungszustand und eine vorgegebene Wohnbevölkerung. Werden alle Gitterpunktwerte aufaddiert, ergibt sich daraus die Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen *HA*.

**Formel 3-2** 
$$HA = \sum_i N_{pop,i} \cdot \frac{\%HA_i}{100}$$

*HA* Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen.

$N_{pop,i}$  Einwohnerzahl der Hektare *i*.

$\%HA_i$  Prozentsatz der durch Fluglärm stark belästigten Personen am Hektarpunkt *i*.

Zur Bestimmung des Prozentsatzes für starke Belästigung  $\%HA$  wird eine Dosis-Wirkungsbeziehung von Miedema verwendet [18] (siehe Abbildung 3-1). Henk M.E. Miedema hat aus einer Vielzahl von Studien je eine Standardkurve für die Dosis-Wirkungsbeziehung von Strassen-, Bahn- und Fluglärm formuliert [17],[18]. Neben einem geschlossenen Integral gibt Miedema beim Fluglärm eine Approximation in Form eines Polynoms dritten Grades an. Als Belastungsmass verwendet er den  $L_{DN}$  [18]. Vergleichsrechnungen der Empa zeigen, dass im Falle von Zürich der  $L_{DN}$  im Mittel praktisch mit dem  $Leq_{16}$  übereinstimmt (vgl. Kapitel 3.3.1).

Zur Berechnung des *ZFI* wird bei der Ermittlung des 16h-Mittelungspegels die erste (06 bis 07 Uhr) und die letzte Tagesstunde (21 bis 22 Uhr) je mit einem Malus von 5 dB versehen ( $Leq_{16}^*$ ). Das Abbruchkriterium, bei dem der Prozentsatz der *HA* auf Null gesetzt wird, wird bei 47 dB  $Leq_{16}^*$  festgelegt. Somit ergibt sich folgende Funktionsgleichung zur Berechnung der  $\%HA$  am Gitterpunkt *i*:

$$\text{Formel 3-3} \quad \%HA_i = -1.395 \cdot 10^{-4} \cdot (Leq_{16,i}^* - 42)^3 + 4.081 \cdot 10^{-2} \cdot (Leq_{16,i}^* - 42)^2 + 0.342 \cdot (Leq_{16,i}^* - 42)$$

für  $Leq_{16,i}^* \geq 47 \text{ dB}$ 

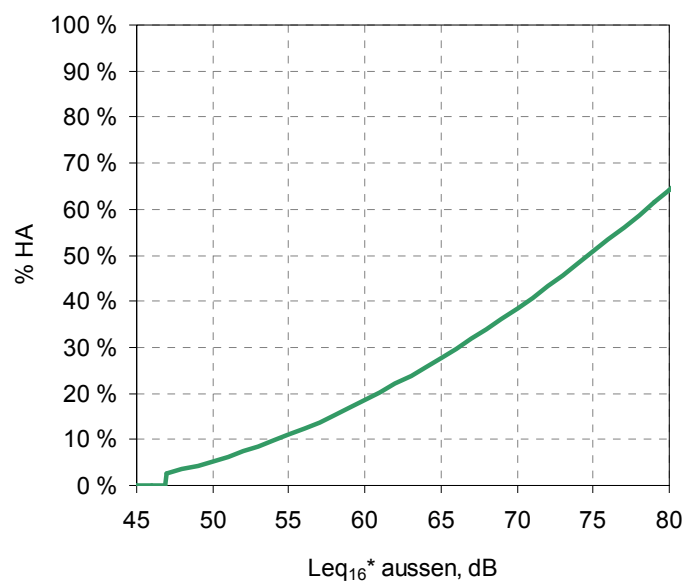
$$\%HA_i = 0$$

für  $Leq_{16,i}^* < 47 \text{ dB}$ 

$\%HA_i$  Prozentsatz der durch Fluglärm stark belästigten Personen am Hektarpunkt i.

$Leq_{16,i}^*$  16h-Mittelungspegel mit einem Malus von je 5 dB für die erste (T1) und letzte Tagesstunde (T16) am Hektarpunkt i.

Die Berechnung des tagesrandstundengewichteten 16h-Mittelungspegel  $Leq_{16}^*$  wird in Kapitel 3.3.1 erläutert.



**Abbildung 3-1 Dosis-Wirkungsbeziehung zur Bestimmung des Prozentsatzes für starke Belästigung %HA (Formel 3-3).**

### 3.1.2. Bestimmung der HSD-Komponente

Die Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen  $HSD$  wird analog zu den  $HA$  durch Multiplikation des Prozentsatzes für starke Schlafstörung  $\%HSD$  mit der Anzahl Personen je Gitterpunkt  $N_{pop,i}$  berechnet.

$$\text{Formel 3-4} \quad HSD = \sum_i N_{pop,i} \cdot \frac{\%HSD_i}{100}$$

$HSD$  Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen.

$N_{pop,i}$  Einwohnerzahl der Hektare i.

$\%HSD_i$  Prozentsatz der durch Fluglärm im Schlaf stark gestörte Personen am Hektarpunkt i.

Der Prozentsatz der durch den Fluglärm im Schlaf stark gestörten Personen wird mittels der Anzahl durch den Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen  $AWR$  ermittelt. Eine Aufwachreaktion ist dabei eine Schlafstufenänderung, welche anhand der Hirnströme (EEG) festgestellt wird. Sie führt nur selten

zum bewussten Erwachen. Pro Nacht treten ohne Lärmeinwirkung ca. 24 spontane Aufwachreaktionen auf. Zur Umrechnung der *AWR* in den Prozentsatz der durch den Fluglärm im Schlaf stark gestörten Personen (*%HSD*) wird ein Gewichtungsfaktor für starke Schlafstörung (*GsS*) eingesetzt [14].

Das Abbruchkriterium, bei dem der Prozentsatz der *HSD* auf Null gesetzt wird, wird durch den 8h-Mittelungspegel der Nacht definiert und wird bei 37 dB festgelegt.

$$\text{Formel 3-5} \quad \%HSD_i = GsS \cdot AWR_i \quad \text{für } Leq_{8,i} \geq 37 \text{ dB}$$

$$\%HSD_i = 0 \quad \text{für } Leq_{8,i} < 37 \text{ dB}$$

*%HSD<sub>i</sub>*    Prozentsatz der durch den Fluglärm in ihrem Schlaf stark gestörten Personen am Hektarpunkt *i*.

*GsS*        Gewichtungsfaktor für starke Schlafstörung.

*AWR<sub>i</sub>*     Anzahl durch den Fluglärm induzierten zusätzlichen Aufwachreaktionen am Hektarpunkt *i*.

*Leq<sub>8,i</sub>*    8h-Mittelungspegel der Nacht von 22 bis 06 Uhr am Hektarpunkt *i*.

$$\text{Formel 3-6} \quad GsS = 100 \cdot \frac{C}{A \cdot B} = 100 \cdot \frac{0.25}{0.04 \cdot 24} = 26$$

*C*        Anteil der exponierten Bevölkerung, die sich im Schlaf als stark gestört bezeichnet.

*A*        Anteil der spontanen Reaktionen, welche als kritisch zu werten sind.

*B*        Durchschnittliche Anzahl spontane Aufwachreaktionen, die ohne Lärmeinfluss auftreten.

Der Anteil der spontanen Reaktionen, welche als kritisch zu werten sind, wird nach Beschluss der Experten zu 0.04 angenommen (Faktor *A* in Formel 3-6). Dies entspricht in etwa einer zusätzlichen Aufwachreaktion pro Nacht. Die durchschnittliche Anzahl spontaner Aufwachreaktionen (Faktor *B* in Formel 3-6), die ohne Lärmeinfluss auftreten, beträgt 24 [1]. Der Anteil der exponierten Bevölkerung, die sich bei einer zusätzlichen Aufwachreaktion pro Nacht als in ihrem Schlaf stark gestört bezeichnet, wird bei 25% festgelegt (Faktor *C* in Formel 3-6). Diese Annahmen ergeben einen Gewichtungsfaktor für starke Schlafstörung von 26. Somit kann Formel 3-5 wie folgt umgeschrieben werden:

$$\text{Formel 3-7} \quad \%HSD_i = GsS \cdot AWR_i = 26 \cdot AWR_i \quad \text{für } Leq_{8,i} \geq 37 \text{ dB}$$

$$\%HSD_i = 0 \quad \text{für } Leq_{8,i} < 37 \text{ dB}$$

Die Anzahl durch den Fluglärm induzierten zusätzlichen Aufwachreaktionen *AWR* wird nach einer Formel aus der DLR-Schlafstudie bestimmt [1]. Das Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) führte zwischen 1999 und 2004 umfangreiche Studien zur Wirkung von nächtlichem Fluglärm auf Schlaf, Leistung und Befinden des Menschen durch. Im Jahr 2004 wurden die ersten Ergebnisse publiziert [1]. Dort wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Wahrscheinlichkeit des Aufwachens<sup>1</sup> und dem maximalem Schallpegel am Ohr des Schlafers postuliert. Dieser Zusammenhang wurde sowohl im Labor (112 Versuchspersonen, 25'408 Fluggeräusche) als auch im Felde (61 Versuchspersonen, 10'658 Fluggeräusche) ermittelt.

Für die Ermittlung des *ZFI* wird die Formel aus der Feldstudie verwendet. Die vom DLR publizierten Funktionen gelten für Maximalpegelwerte am Ohr des Schlafers. In der Simulation werden jedoch die Aussenpegel berechnet. Der Übergang von aussen nach innen wird mit einer Einfügungsdämpfung *D* von -15 dB berücksichtigt [2].

<sup>1</sup> Der Wechsel vom Schlaf- zum Wachzustand sowie der Wechsel von den Schlafstadien 4, 3 und 2 ins Schlafstadium 1 wird als Aufwachen interpretiert.

**Formel 3-8**

$$AWR_i = \sum_j AWR_{ij} = \sum_j n_j \cdot \int H_{ij}(L_{AS,max} + D) \cdot P_{AWR,ij}(L_{AS,max} + D) dL_{AS,max}$$

$AWR_i$  Anzahl durch den Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen am Hektarpunkt i.

$j$  Index für den Flugzeugtyp.

$n_j$  Anzahl Bewegungen des Flugzeugtyps j.

$H_{ij}$  Häufigkeitsverteilung der Maximalpegel des Flugzeugtyps j am Hektarpunkt i.

$L_{AS,max,ij}$  A-bewerteter Maximalpegel des Flugzeugtyps j am Hektarpunkt i.

$D$  Einfügungsdämpfung für den Übergang vom Aussen- zum Innenpegel. Für gekipptes Fenster rund -15 dB

$P_{AWR,ij}$  Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen Aufwachreaktion durch ein Fluggeräusch des Flugzeugtyps j am Immissionsort i

**Formel 3-9**

$$P_{AWR,ij}(L_{AS,max} + D) = 1.894 \cdot 10^{-5} \cdot (L_{AS,max,ij} + D)^2 + 4.008 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{AS,max,ij} + D) - 3.3243 \cdot 10^{-2}$$

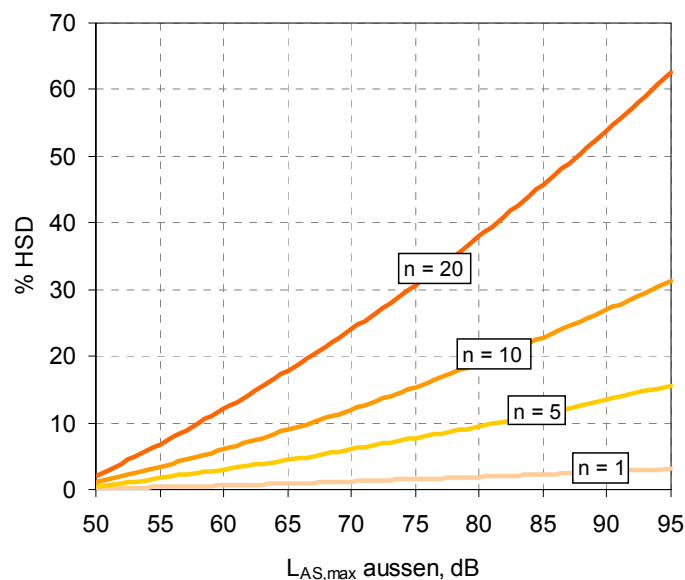
$P_{AWR,ij}$  Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen Aufwachreaktion durch ein Fluggeräusch des Flugzeugtyps j am Immissionsort i

$L_{AS,max,ij}$  A-bewerteter Maximalpegel des Flugzeugtyps j am Hektarpunkt i.

$D$  Einfügungsdämpfung für den Übergang vom Aussen- zum Innenpegel. Für gekipptes Fenster rund -15 dB

Im Gegensatz zur Bestimmung der  $HA$ , wo direkt mit dem 16h-Mittelungspegel in Formel 3-3 der Prozentsatz der vom Fluglärm stark belästigten Personen berechnet werden kann, muss bei der Ermittlung der  $HSD$  zuerst die Einzelwirkung<sup>2</sup> bestimmt werden (Formel 3-8), bevor die Gesamtwirkung resp. die Wahrscheinlichkeit für starke Schlafstörung ermittelt werden kann (Formel 3-7).

Abbildung 3-2 zeigt die Dosis-Wirkungsbeziehung zur Bestimmung des Prozentsatzes der Personen die sich durch den Fluglärm in ihrem Schlaf stark gestört fühlen für einen, fünf, zehn und zwanzig Überflüge.



**Abbildung 3-2 Dosis-Wirkungsbeziehung zur Bestimmung des %HSD für einen, fünf, zehn und zwanzig Überflüge.**

<sup>2</sup> Wie hoch ist die Anzahl von (fluglärminduzierten, zusätzlichen) Aufwachreaktionen  $AWR$  bei einem Maximalpegel von beispielsweise 50 dB? Wie hoch ist sie, wenn dieser Pegel pro Nacht fünfmal auftritt resp. wenn zusätzlich zwei Ereignisse mit einem Pegel von 70 dB und zehn Ereignisse mit einem Pegel von 40 dB auftreten? Um diese Fragen zu beantworten müssen zuerst die Einzelwirkungen ( $AWR$  für  $n = 5$  und  $L_{A,max} = 50$  dB) resp.  $AWR$  (2; 70dB),  $AWR$  (10; 40dB)) ermittelt werden; addiert ergibt sich dann die Gesamtwirkung.

### 3.2. Die Anzahl vom Fluglärm betroffenen Personen (AbP)

Die *AbP* dienen einerseits zur groben Abschätzung, wie viele Personen sich über einem bestimmten Belastungsniveau befinden. Deshalb werden die *AbP* auch immer mit einer Angabe zum Bezugsniveau versehen (beispielsweise  $AbP_{>54dB}$ ). Andererseits werden sie benutzt um diejenigen Personen zu bestimmen, an deren Wohnort beispielsweise die Immissionsgrenzwerte der LSV überschritten sind. Diese Grösse ist im Zusammenhang mit der Erstellung eines Lärmbelastungskatasters oder im Zusammenhang mit der Beurteilung der Umweltauswirkungen relevant. Art. 37, Abs. 2, Zif. g der Lärmschutzverordnung verlangt die Ermittlung der Anzahl Personen, die von über den massgebenden Belastungsgrenzwerten liegenden Lärmimmissionen betroffen sind [16].

Die im gesetzlichen Sinne „Betroffenen“ können nur bedingt mit der Gruppe der „Belästigten“ oder mit der Gruppe der „Starkbelästigten“ gleich gesetzt werden. Bei den *AbP* über den Immissionsgrenzwerten ( $AbP_{>IGW}$ ) besteht immerhin ein schwacher Zusammenhang, indem der IGW bei einem Prozentsatz Highly Annoyed HA von 25% festgelegt wurde [3]. Da in der LSV die Belastungsgrenzwerte nach Empfindlichkeit der Nutzung abgestuft sind (Wohnnutzung ist empfindlicher und hat einen tieferen Grenzwert als industrielle Nutzung), wird diese Grenzziehung erheblich komplexer, was generell die Bestimmung „der Anzahl von einer Grenzwertüberschreitung betroffenen Personen“ erschwert.

Die *AbP* müssen mittels der Enveloppen<sup>3</sup> der massgeblichen Grenzbelastungskurven bestimmt werden. Ein Beispiel soll dies erläutern: Der Immissionsgrenzwert der Empfindlichkeitsstufe II (ES II) beträgt für die Tagesbelastung von 06 bis 22 Uhr 60 dB, für die Belastung von 22 bis 23 Uhr 55 dB und für die Belastungen von 23 bis 05 resp. von 05 bis 06 Uhr je 50 dB. Die  $AbP_{>IGW(ES II)}$  ergeben sich, indem die Personen innerhalb der Enveloppen dieser vier Belastungsniveaus gezählt werden. Dabei gilt zu beachten, dass sich die Zählung nur auf die Gebiete mit der entsprechenden Empfindlichkeitsstufe beziehen darf. Anschliessend wird mit den Gebieten der restlichen Empfindlichkeitsstufen gleich verfahren (Grenzbelastungskurven → Enveloppen → Zählung in Gebieten der entsprechenden ES). Die *AbP* sämtlicher Empfindlichkeitsstufen aufsummiert ergeben dann die  $AbP_{>IGW}$ . Analog werden die Personen bestimmt, an deren Wohnort die Alarmwerte ( $AbP_{>AW}$ ) resp. Planungswerte ( $AbP_{>PW}$ ) überschritten sind.

Anhand der *AbP* lassen sich beispielsweise verschiedene Belastungszustände miteinander vergleichen, das Konfliktpotenzial zu den umweltrechtlichen Vorschriften oder aber die Kosten für Schallschutz abschätzen. Das Konzept der *AbP* lässt allerdings offen, wie man starke, mittlere und schwache Belastungen zu einem sinnvollen Gesamtmass vereinigt. Es stellt sich beispielsweise die Frage, wie 1'000 Personen in der Lärmklasse 60 dB mit 500 Personen in der Klasse 65 dB zu vergleichen sind. Dieses Problem kann durch Anwendung einer Dosis-Wirkungsbeziehung gelöst werden. Ein weiterer Nachteil der *AbP* ist, dass die Personen nur einmal gezählt werden, egal ob am Wohnort die Immissionsgrenzwerte des Tages und zusätzlich diejenigen der Nacht überschritten sind.

Der *ZFI* lässt bewusst Doppelzählungen zu, indem sich die *HA* auf den Tag und die *HSD* auf die Nacht gemäss Definition LSV beziehen. Zu Vergleichszwecken mit den *HA* und *HSD* werden die Grenzwertüberschreitungen am Tag und diejenigen in der Nacht separat bestimmt. Zur Ermittlung der *AbP* über den Immissionsgrenzwerten der Nacht wird die Enveloppe der Grenzbelastungskurven der drei einzelnen Nachtstunden verwendet.

---

<sup>3</sup> Enveloppe = umhüllende Kurve einer gegebenen Kurvenschar

### 3.3. Technische Umsetzung

#### 3.3.1. Berechnen der Mittelungspegel

Der tagesrandstundengewichtete 16h-Mittelungspegel  $Leq_{16}^*$  wird wie folgt aus den sechzehn 1h-Mittelungspegel des Tages (06 bis 22 Uhr) berechnet:

$$\text{Formel 3-10} \quad Leq_{16}^* = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{16} \cdot \left( 10^{0.1(Leq_{T1}+5)} + \sum_{i=T2}^{T15} 10^{0.1Leq_i} + 10^{0.1(Leq_{T16}+5)} \right) \right)$$

$Leq_{16}^*$	16h-Mittelungspegel mit einem Malus von je 5 dB für die erste (T1) und letzte Tagesstunde (T16).
$Leq_{T1}$	1h-Mittelungspegel der ersten Tagesstunde von 06 bis 07 Uhr.
$Leq_i$	1h-Mittelungspegel der Tagesstunde i.
T2	Tagesstunde von 07 bis 08 Uhr.
T15	Tagesstunde von 20 bis 21 Uhr.
$Leq_{T16}$	1h-Mittelungspegel der letzten Tagesstunde von 21 bis 22 Uhr.

Für die Jahre 1998 bis 2004 liegen die 1h-Mittelungspegel der 16 Tagesstunden bereits aus einer früher durchgeführten Untersuchung [12] vor.

Zur Ermittlung des 8h-Mittelungspegel für die Nacht von 22 bis 06 Uhr werden die drei 1h-Mittelungspegel der Nacht  $Leq_{N1}$ ,  $Leq_{N2}$  und  $Leq_{N3}$  energetisch addiert und über acht Stunden gemittelt:

$$\text{Formel 3-11} \quad Leq_N \equiv Leq_8 = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{8} \cdot \left( \sum_{i=N1}^{N3} 10^{0.1Leq_i} \right) \right)$$

N1	1. Nachtstunde von 22 bis 23 Uhr.
N2	2. Nachtstunde von 23 bis 24 Uhr.
N3	letzte Nachtstunde von 05 bis 06 Uhr.

Die drei 1h-Mittelungspegel  $Leq_{N1}$ ,  $Leq_{N2}$  und  $Leq_{N3}$  sind im Rahmen des jährlichen Fluglärmnachweises für den Flughafen Zürich bereits zu einem früheren Zeitpunkt berechnet worden [4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11].

In Formel 3-3 wird statt des Day-Night-Level  $L_{DN}$  der 16h-Mittelungspegel  $Leq_{16}$  als akustische Grösse eingesetzt. Zur Ermittlung des  $L_{DN}$  gilt folgende Rechenvorschrift:

$$\text{Formel 3-12} \quad L_{DN} = 10 \cdot \lg \left( \frac{15}{24} \cdot 10^{0.1L_{day}} + \frac{9}{24} \cdot 10^{0.1(L_{night}+10)} \right)$$

$L_{DN}$	Day-Night-Level.
$L_{day}$	A-bewerteter 15h-Mittelungspegel während der Tageszeit (07 bis 22 Uhr).
$L_{night}$	A-bewerteter 9h-Mittelungspegel während der Nachtzeit (22 bis 07 Uhr).

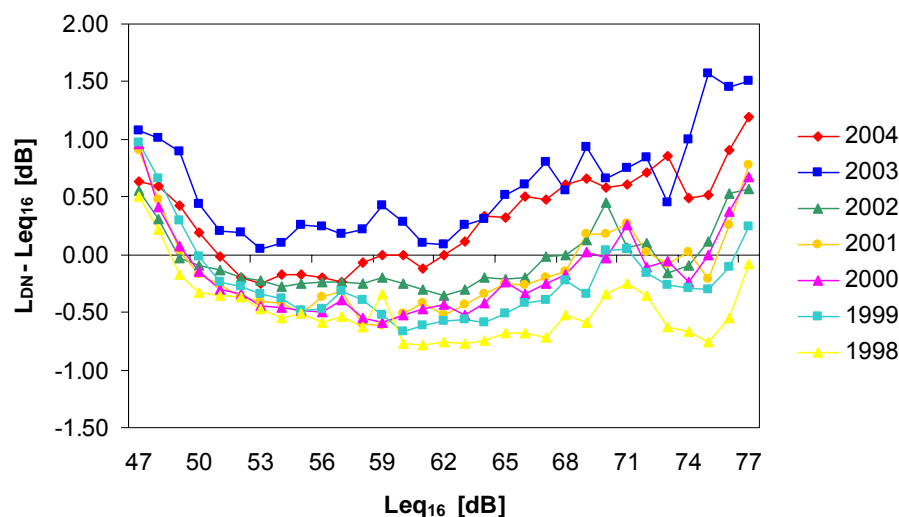
Beim  $L_{DN}$  dauert der Tag von 07 bis 22 Uhr und die Nacht von 22 bis 07 Uhr. Je höher der Nachtanteil, desto grösser wird der Unterschied zwischen  $L_{DN}$  und  $L_{day}$  ( $=Leq_{15}$ ). Umgekehrt wird sich der  $L_{DN}$  bei zunehmender Ausweitung der Nachtflugsperrung dem  $Leq_{15}$  angleichen.

Da in der Regel zwischen Tages- und Nachtzeit Flugregime (Pisten- und Routenbelegung) und Flottenzusammensetzung unterschiedlich sind, kann kein fixer Wert für die Differenz zwischen dem Day-Night-Level  $L_{DN}$  und dem 16h-Mittelungspegel  $Leq_{16}$  angegeben werden. Zudem ändert sich die Differenz zwischen dem  $L_{DN}$  und dem  $Leq_{16}$  von Jahr zu Jahr, je nachdem wie bedeutend der nächtliche Flugbetrieb ist und wie stark sich Tag- und Nachtbetrieb räumlich unterscheiden. Die Beziehung zwischen  $L_{DN}$  und  $Leq_{16}$  lässt sich jedoch anhand der Pegeldifferenzen an den Gitterpunkten des Simulationsrasters statistisch auswerten. Nachfolgende Zusammenstellung (Tabelle 3-1 und Abbildung 3-3) zeigt die Resultate dieser von der Empa durchgeführten Auswertungen für die Jahre 1998 bis 2004.

**Tabelle 3-1 Differenz zwischen  $L_{DN}$  und  $Leq_{16}$  ( $L_{DN} - Leq_{16}$ ) im Bereich von 47 bis 77 dB des 16h-Mittelungspegels**

Jahr	Mittelwert	Standardabweichung	Anzahl Werte
1998	- 0.3 dB	1.8 dB	54'798
1999	0.0 dB	2.2 dB	53'813
2000	- 0.1 dB	2.3 dB	53'843
2001	- 0.1 dB	2.3 dB	48'508
2002	- 0.1 dB	1.9 dB	43'287
2003	0.5 dB	2.4 dB	38'192
2004	0.2 dB	2.2 dB	36'185

Aus Tabelle 3-1 wird ersichtlich, dass im Bereich von 47 bis 77 dB die Differenzen zwischen dem  $L_{DN}$  und dem 16h-Mittelungspegel  $Leq_{16}$  im Mittel praktisch null sind. Dabei bewegen sich die Pegeldifferenzen der Jahre 1998 bis 2002 eher im negativen Bereich, die der Jahre 2003 und 2004 eher im positiven Bereich (siehe Abbildung 3-3). Somit kann für die Berechnung der HA in Formel 3-12 der  $L_{DN}$  durch den 16h-Mittelungspegel  $Leq_{16}$  ersetzt werden.



**Abbildung 3-3 Differenz zwischen  $L_{DN}$  und  $Leq_{16}$  im Bereich von 47 bis 77 dB des 16 Stunden Mittelungspegels; die Punkte in der Grafik zeigen die Mittelwerte der Pegeldifferenzen je dB-Klasse.**

### 3.3.2. Berechnen der Maximalpegelhäufigkeiten

In der Simulation mit FLULA2 wird standardmässig jeweils an vorgegebenen Gitterpunkten des Berechnungsausschnitts (Maschenweite in der Regel 250 Meter) der energetisch gemittelte Maximalpegel pro Flugzeugtyp und Flugroute bestimmt. Dieser lässt sich als Erwartungswert einer Normalverteilung interpretieren. Das Sigma (oder die Standardabweichung) der Verteilung kann in FLULA2 entweder typenspezifisch variiert oder fix vorgegeben werden. Auf diese Weise erhält man für jeden Gitterpunkt eine Vielzahl von (theoretischen) Häufigkeitsverteilungen  $h_{ij}$ :

**Formel 3-13** 
$$h_{ijx}(L_{\max}) = n_{jx} \cdot p_{ijx}(L_{\max})$$

$h_{ijx}(L_{\max})$  Häufigkeitsverteilung eines bestimmten Maximalpegels  $L_{\max}$  des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

$n_{jx}$  Flugbewegungszahl (Anzahl Flüge pro Tag im Jahresmittel) des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$ .

$p_{ijx}$  Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines bestimmten Maximalpegels  $L_{\max}$  des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

mit 
$$p_{ijx}(L_{\max}) = \frac{1}{\sigma_{ijx} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(L_{\max} - LEN_{ijx})^2}{2 \cdot \sigma_{ijx}^2}\right] \quad \text{wobei } \sigma_{ijx} = \text{konst} = 2 \text{ dB}$$

$p_{ijx}$  Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines bestimmten Maximalpegels  $L_{\max}$  des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

$\sigma_{ijx}$  Standardabweichung des Maximalpegels des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

$L_{\max}$  Maximalpegel

$LEN_{ijx}$  energetisch gemittelter Maximalpegel des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

und 
$$LEN_{ijx} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1}{n_{jx,sf}} \sum_{n_{jx,sf}} 10^{0,1 \cdot L_{\max,ijx,sf}}\right)$$

$LEN_{ijx}$  energetisch gemittelter Maximalpegel des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

$n_{jx,sf}$  Anzahl Einzelflüge (single flight sf) des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  die in der Simulation berücksichtigt werden (typischerweise rund 100 Flüge).

$L_{\max,ijx,sf}$  Maximalpegel jedes einzelnen Fluges des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

Mit FLULA2 wird eine statistische Auswahl von Einzelflügen (single flights sf) – typischerweise 100 Flüge pro Flugzeugtyp und Flugroute – simuliert und gemittelt. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen  $p$  sind keine Neusimulationen nötig. Jedoch musste eine bestehende Programmprozedur zur Superposition von Gitterpunktwerten angepasst werden. Die Flugbewegungszahl  $n_{jx}$  ergibt sich aus den Bewegungslisten des Flughafens. Werden sämtliche routen- und typenspezifischen Häufigkeitsverteilungen  $h_{ijx}$  gemäss Formel 3-13 über sämtliche Flugzeugtypen  $j$  und sämtliche Routen  $x$  aufsummiert, so erhält man die vollständige Maximalpegelhäufigkeitsverteilung  $H$  am  $i$ -ten Gitterpunkt:

**Formel 3-14** 
$$H_i(L_{\max}) = \sum_j \sum_x h_{ijx}(L_{\max})$$

Das Verfahren wird in Abbildung 3-4 illustriert. Abbildung 3-5 vergleicht eine reale mit einer aus Normalverteilungen angenäherte Maximalpegelverteilung.

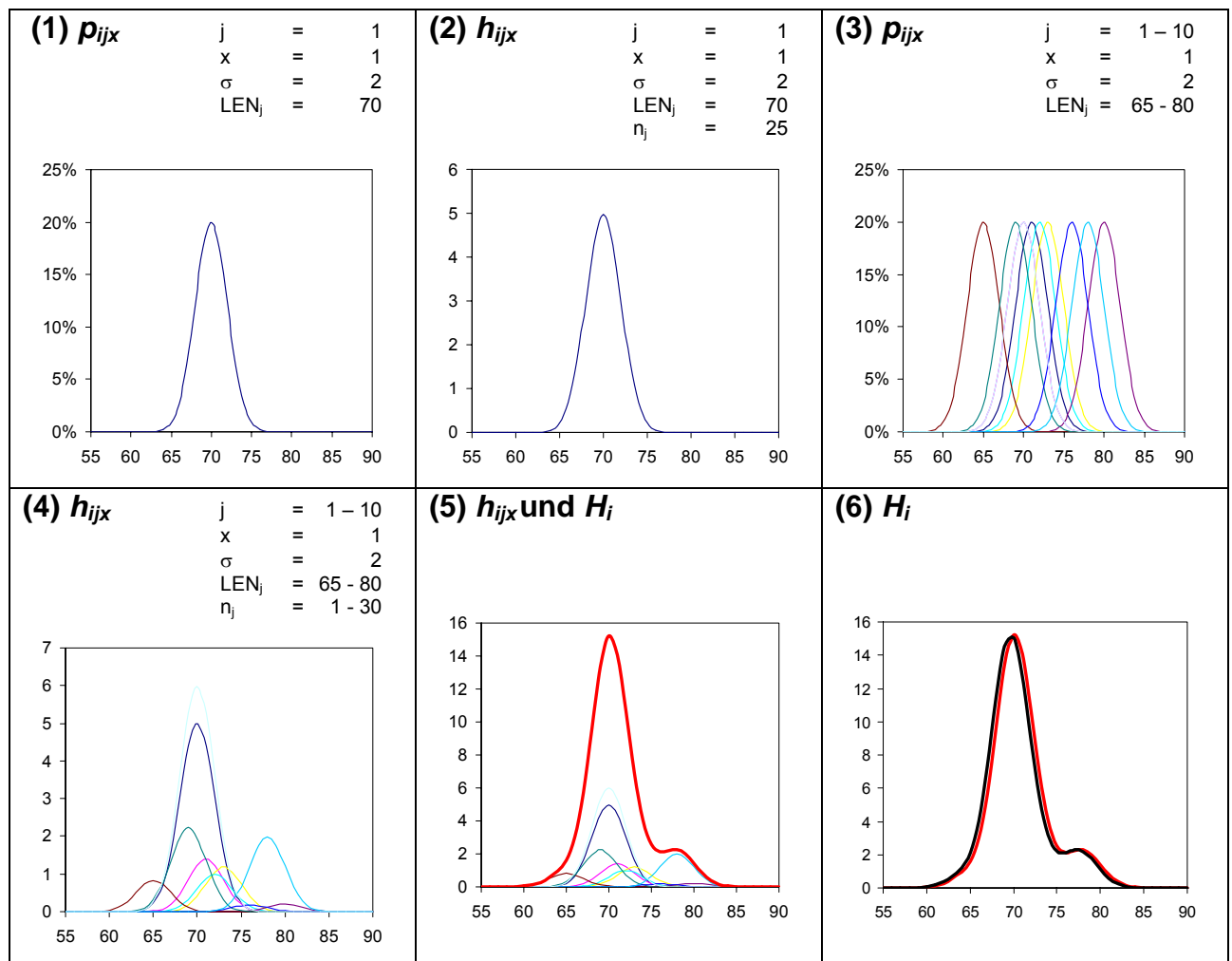
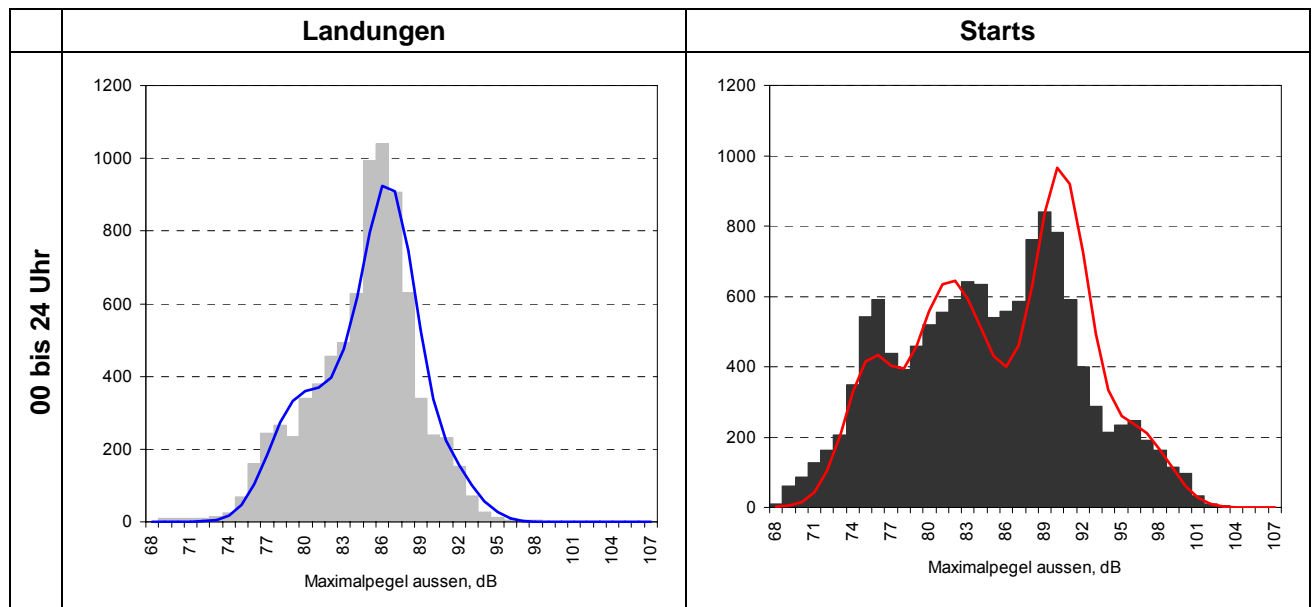


Abbildung 3-4 Vorgehen bei der Ermittlung der Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen

**Legende zu Abbildung 3-4:**

- (1) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den Flugzeugtyp 1 auf der Route 1 mit einem energetisch gemittelten Maximalpegel von 70 dB.
- (2) Häufigkeitsverteilung für den Flugzeugtyp 1 auf der Route 1.
- (3) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für 10 Flugzeugtypen auf der Route 1 mit mittleren Pegeln von 65 bis 80 dB
- (4) Häufigkeitsverteilungen für die 10 Flugzeugtypen auf der Route 1.
- (5) wie (4) inkl. aufsummierter Teilhäufigkeiten (rote Kurve).
- (6) Aufsummierte Teilhäufigkeiten mit energetisch gemittelten Maximalpegeln als Erwartungswert (rote Kurve) und mit arithmetisch gemittelten Maximalpegeln als Erwartungswert (schwarze Kurve).



**Abbildung 3-5 Vergleich realer (graue Säulen) mit aus typenspezifischen Normalverteilungen ( $LEN_j$ ,  $\sigma = 2$  dB) generierten Maximalpegelverteilungen am Beispiel der Messstelle Nr. 6 des Flughafens Zürich im Jahr 2004.**

### 3.3.3. Berechnen der Anzahl Aufwachreaktionen

Die Anzahl Aufwachreaktionen  $AWR$  wird berechnet, indem pro Gitterpunkt des Simulationsrasters (Maschenweite 250 Meter) die Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen ermittelt und unter Anwendung von Formel 3-8 die  $AWR$  bestimmt werden. Bei der Berechnung der Gesamtsituation aus den einzelnen Teilresultaten (Superposition) werden keine vollständigen Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen  $H_i$  verwendet (wie in Kapitel 3.3.2 angegeben). Statt dessen wird für sämtliche routen- und typenspezifische Häufigkeitsverteilungen  $h_{ijx}$  direkt die Aufwachreaktionen berechnet und diese werden dann zu einer Gesamtzahl aufsummiert. Formel 3-8 wird wie folgt in FLULA2 implementiert:

**Formel 3-15**

$$AWR_i = \sum_j \sum_x AWR_{ijx} = \sum_j \sum_x \left( n_{jx} \cdot \int_{L_1}^{L_2} h_{ijx}(L_{AS,max} + D) \cdot P_{AWR,ijx}(L_{AS,max} + D) \cdot dL \right)$$

$$= \sum_j \sum_x \left( n_{jx} \cdot \int_{L_1}^{L_2} n_{jx} \cdot p_{ijx}(L_{AS,max} + D) \cdot P_{AWR,ijx}(L_{AS,max} + D) \cdot dL \right)$$

$AWR_i$  Anzahl durch den Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen am Hektarpunkt  $i$ .

$j$  Index für den Flugzeugtyp.

$x$  Index für die Flugroute.

$n_{jx}$  Anzahl Bewegungen des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$ .

$h_{ijx}$  Häufigkeitsverteilung der Maximalpegel des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

$L_{AS,max}$  A-bewerteter Maximalpegel.

$D$  Einfügungsdämpfung für den Übergang vom Aussen- zum Innenpegel. Für gekipptes Fenster rund -15 dB.

$P_{AWR,ijx}$  Wahrscheinlichkeit einer zusätzlichen Aufwachreaktion durch ein Fluggeräusch des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

$p_{ijx}$  Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines bestimmten Maximalpegels  $L_{max}$  des Flugzeugtyps  $j$  auf der Route  $x$  am Hektarpunkt  $i$ .

Zur Bestimmung der Aufwachreaktionen müssen sinnvolle Integrationsgrenzen gewählt werden. Die untere Integrationsgrenze L1 wird bei 32.6 dB, die obere L2 bei 110.0 dB festgelegt. Anschliessend müssen die AWR ins Hektarraster umgerechnet werden. Dies geschieht, indem Werte, welche zwischen den Stützstellen des Simulationsrasters liegen, linear interpoliert werden. Das neue AWR-Gitterfile wird in die „Störungsdatenbank“ (MS-ACCESS-Datenbank) eingelesen und mit den Bevölkerungsdaten verknüpft (vergleiche Kapitel 3.1.2). Erst in der Datenbank erfolgt die Umrechnung der AWR in den Prozentsatz der Highly Sleep Disturbed sowie die Berechnung der ZFI-Teilkomponente HSD.

### 3.3.4. Hektardaten der Wohnbevölkerung

Um die Anzahl Personen  $N_{pop,i}$  je Hektare berechnen zu können, werden Informationen über die Bevölkerungsstruktur rund um den Flughafen benötigt. Diese Informationen liegen für die gesamte Schweiz vor. Sie stammen aus der Eidgenössischen Volkszählung des Jahres 2000 (VZ2000). Die entsprechenden Daten liegen im Hektarraster vor und können beim Bundesamt für Statistik (GEOSTAT) bestellt werden. Für die im vorliegenden Bericht durchgeführten Berechnungen wird ein von Unique (FLUGIS) aufbereiteter Datensatz verwendet [22]. Der Originaldatensatz von GEOSTAT wurde wie folgt von Unique modifiziert:

- Verschieben des Referenzpunktes der einzelnen Hektaren von der unteren linken Ecke in den Hektarmittelpunkt (X + 50 m / Y + 50 m).
- Bestimmen der Gemeindezugehörigkeit anhand der Gemeindegrenzen von swisstopo (gg25.shp) in ArcGIS.
- Zuordnen der Empfindlichkeitsstufen (ES) anhand der Nutzungszonenpläne der einzelnen Kantone.

Einer statistisch gesehen kleinen Anzahl von Personen (188'120 oder 2.6% der gesamten Schweiz), konnte während der Aufarbeitung der Volkszählung weder Wohnung noch Gebäude zugewiesen werden. Es handelt sich entweder um Personen, die keine feste Wohnadresse haben, oder um Personen, welche keiner Wohnung zugeteilt werden konnten. Diese Personen wurden von GEOSTAT gemeindeweise einer Sammelhektare zugewiesen, die in der Regel im Zentrum der Gemeinde liegt. Die dadurch teilweise erheblichen Bestände auf den Sammelhektaren könnten unerwünschte Einflüsse auf kleinräumige Analysen haben oder die Ergebnisse massgeblich verfälschen. Um dies zu vermeiden, werden die Personen der Sammelhektaren durch Unique auf die bewohnten Hektaren der entsprechenden Gemeinde (statistisch gewichtet) verteilt.

Für Süddeutschland stehen keine Hektardaten zur Verfügung, sondern nur die Anzahl Einwohner pro Gemeinde. Diese Angaben sind im Internet auf der Seite des Statistischen Landesamt Baden-Württemberg verfügbar [21]. Diese Anzahl Einwohner pro Gemeinde werden durch Unique (FLUGIS) gleichmässig auf die Hektarpunkte der Siedlungsgebiete der entsprechenden Gemeinde verteilt. Die Siedlungsgebiete werden anhand der Pixelkarte 1:25'000 (PK25) der swisstopo in ArcGIS digitalisiert. Für die Einwohner pro Gemeinde werden analog zu den Schweizer Hektardaten die Daten des Jahres 2000 verwendet.

### **3.3.5. Datenbank**

Sämtliche Daten (Belastungen, Bevölkerung, Aufwachreaktionen, *HA*, *HSD* und *ZFI*) werden in einer ACCESS- Datenbank verwaltet. Die Daten liegen im Hektarraster mit knapp 400'000 Gitterpunkten vor. Die *HA*, *HSD* und der *ZFI* werden direkt in ACCESS berechnet unter Anwendung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Verfahren. Die Auswertung und Darstellung der Resultate erfolgt in EXCEL mit Hilfe von Pivottabellenabfragen. Die *HA*, *HSD* und der *ZFI* lassen sich dort in tabellarischer Form zusammenfassen oder in Diagrammen grafisch darstellen.

## 4. Eingabedaten für die Belastungsrechnungen

Es werden bestehende Belastungsrechnungen verwendet. Sämtliche Berechnungen wurden mit dem an der Empa entwickelten Berechnungsverfahren FLULA2 [13] durchgeführt. Die Belastungsrechnungen erfolgten nach dem Prinzip der Einzelflugsimulation unter Verwendung von Radaraten. Es wurde der Quelldatensatz RC2001\_01 der Empa verwendet. Bezüglich der Details zu den Eingabedaten (Pisten- und Routenbelegung, Flugzeugflotte) sei auf die entsprechenden Untersuchungsberichte verwiesen [4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11].

Zur Orientierung zeigt die nachfolgende Abbildung 4-1 die jährlichen Flugbewegungszahlen der Jahre 1998 bis 2004 getrennt für den Tag und die Nacht. Die zugehörigen Daten sind in einer Tabelle im Anhang 1 zusammengestellt. Im Anhang 2 befinden sich Grafiken zu den Routenbelegungen am Tag (06 bis 22 Uhr) und in der Nacht (22 bis 06 Uhr) für sämtliche Jahre (1998 bis 2004).

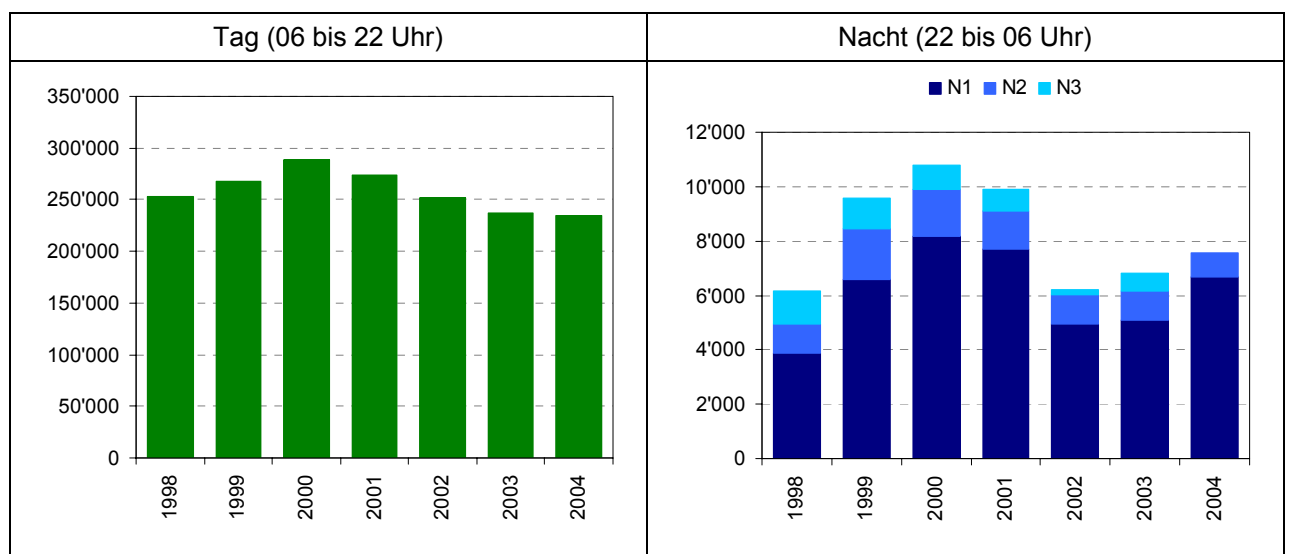


Abbildung 4-1 Jährliche Flugbewegungszahlen der Jahre 1998 bis 2004

## 5. Untersuchungsergebnisse

Die *HA*, *HSD* und der *ZFI* werden in einer ACCESS-Datenbank gitterpunktspezifisch berechnet und verwaltet. Die zusammengefassten Daten dagegen befinden sich in einer EXCEL-Datei.

### 5.1. Quantifizierungen

#### 5.1.1. Personen innerhalb der Untersuchungsperimeter

Nachfolgende Abbildung zeigt die Einwohnerzahl innerhalb der massgeblichen Untersuchungsperimeter getrennt für den Tag und die Nacht. Die Definition der Perimeter wird in Kapitel 2.4. gegeben.

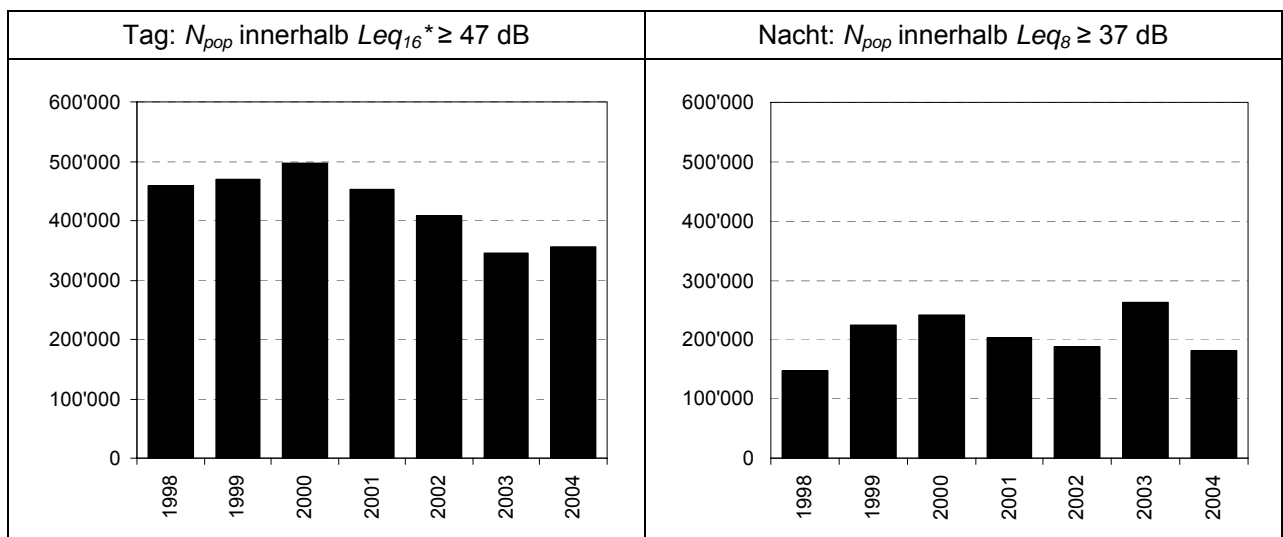
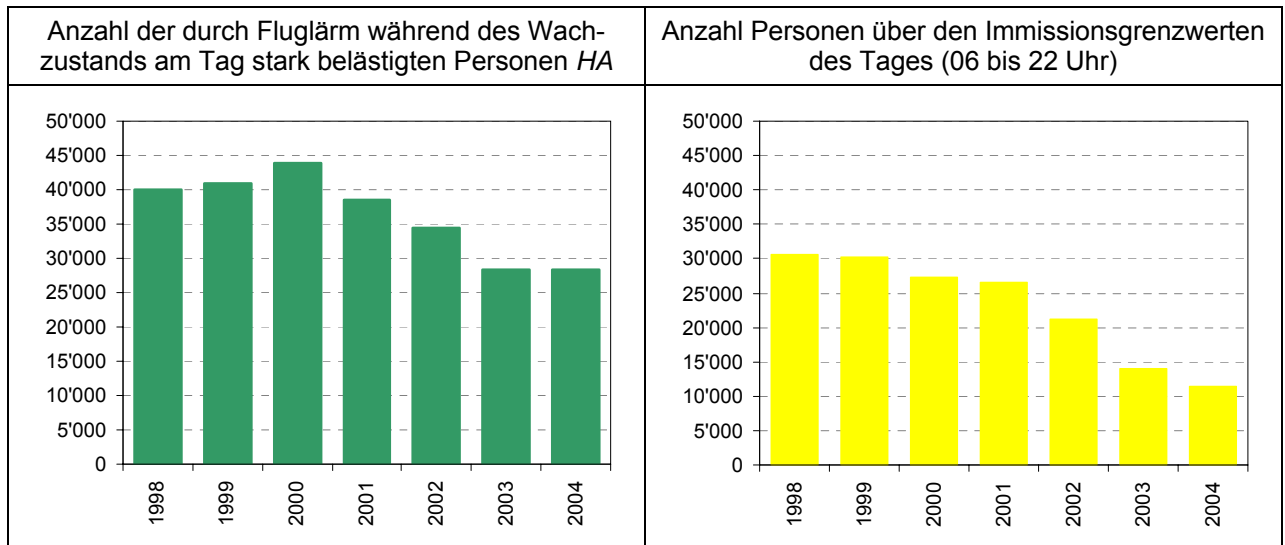


Abbildung 5-1 Personen innerhalb der Untersuchungsperimeter für den Tag und die Nacht; die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3

#### 5.1.2. Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (Highly Annoyed HA)

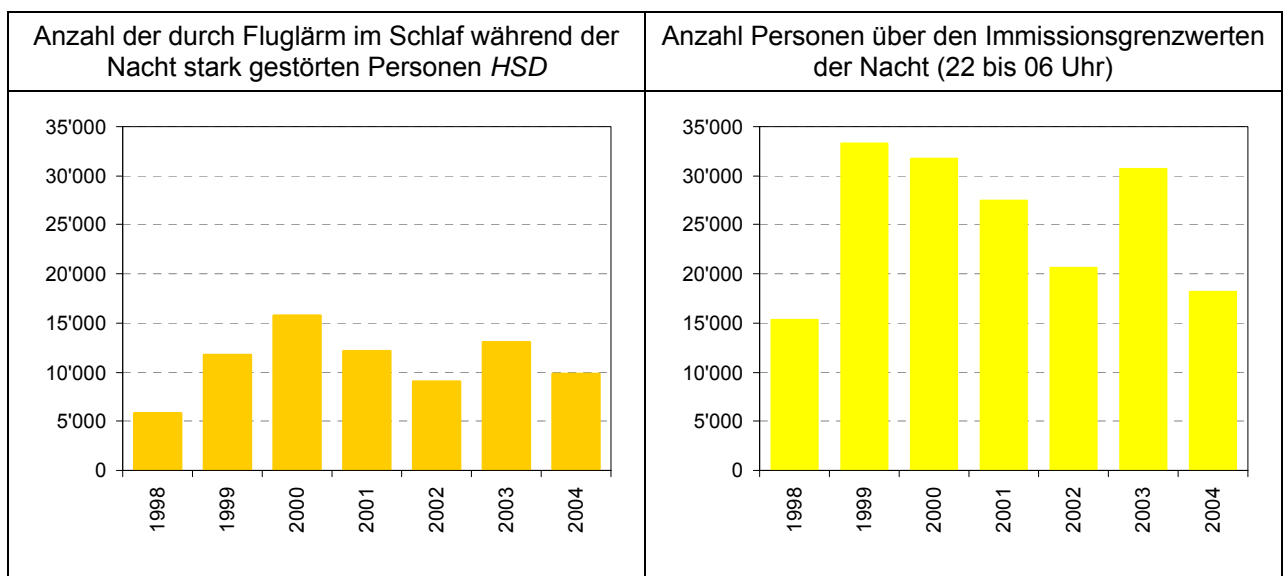
Die Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen *HA* werden nach den Formeln in Kapitel 3.1.1 berechnet. Abbildung 5-2 links zeigt die Summe aller *HA* der Jahre 1998 bis 2004 innerhalb der jeweiligen Untersuchungsperimeter. Zum Vergleich werden in Abbildung 5-2 rechts die Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten des Tages (06 bis 22 Uhr) dargestellt.



**Abbildung 5-2** Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen *HA* (links) und Anzahl betroffenen Personen über den Immissionsgrenzwerten des Tages (rechts); die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.

### 5.1.3. Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (Highly Sleep Disturbed *HSD*)

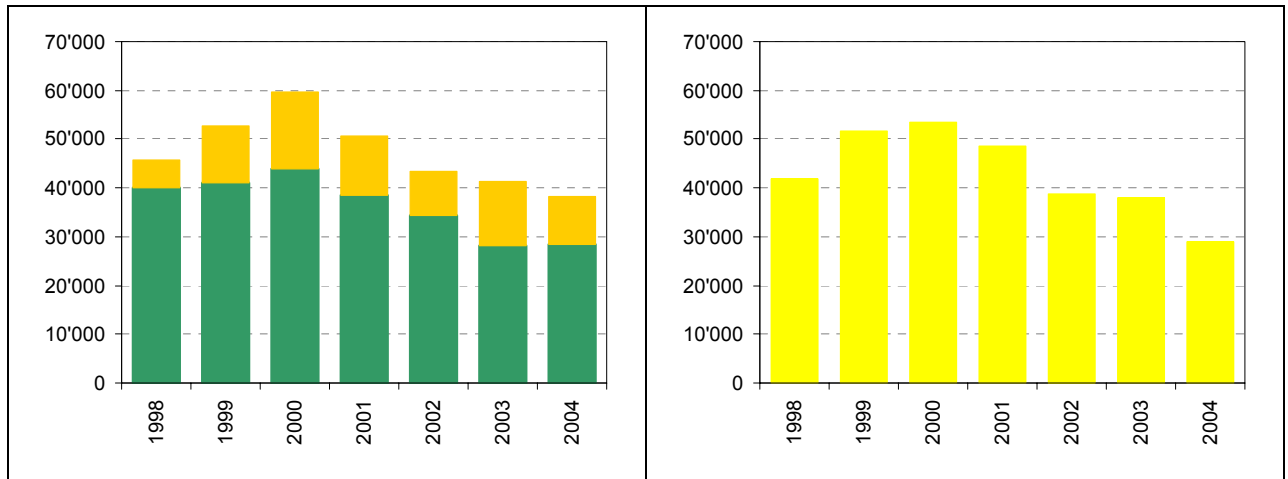
Die Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen *HSD* werden nach den Formeln in Kapitel 3.1.2 berechnet. Abbildung 5-3 links zeigt die Summe aller *HSD* der Jahre 1998 bis 2004 innerhalb der jeweiligen Untersuchungsperimeter. Zum Vergleich werden in Abbildung 5-3 rechts die Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten der Nacht (22 bis 06 Uhr) dargestellt. Zur Bestimmung der Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten der Nacht wird die Enveloppe der Grenzbelastungskurven der drei einzelnen Nachtstunden verwendet (siehe Kapitel 3.2).



**Abbildung 5-3** Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen *HSD* (links) und Anzahl betroffene Personen über den Immissionsgrenzwerten der Nacht (rechts); die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.

#### 5.1.4. Kombination von HA und HSD zum ZFI

Abbildung 5-4 links kombiniert die *HA* und *HSD* zum *ZFI*. Abbildung 5-4 rechts zeigt zum Vergleich die Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten (Umhüllende Tag und Nacht). Bei diesem Vergleich muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Anzahl Personen über den Immissionsgrenzwerten (Umhüllende Tag und Nacht) keine Doppelzählungen enthalten, der *ZFI* jedoch schon.



**Abbildung 5-4** Kombinationen der *HA* (grüne Säulen) und *HSD* (orange Säulen) zum *ZFI* (gesamte Säulen) (links) und Anzahl betroffene Personen über den Immissionsgrenzwerten (Umhüllende Tag und Nacht) (rechts); die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.

## 6. Unsicherheit der Berechnungen

### 6.1. Vorbemerkung

In den vorangegangenen Kapiteln werden Funktionsgleichungen aufgeführt, mit deren Hilfe die Anzahl durch den Fluglärm stark belästigten resp. durch den Fluglärm im Schlaf stark gestörten Personen (*HA* und *HSD*) berechnet werden können. In diesem Kapitel wird versucht, eine Aussage über die Qualität dieser berechneten Werte zu machen. Dabei gilt es zu beachten, dass der wahre Wert der *HA* resp. *HSD* aus verschiedenen Gründen unbestimmbar bleibt. Die (rechnerisch) ermittelten Werte sind deshalb bloss Schätzungen für die wahren *HA* resp. *HSD*. Es gilt, eine Aussage über die Annäherung dieser Schätzungen an die unbekanntenen Werte der *HA* und *HSD*, resp. eine Angabe über die Wahrscheinlichkeit zu machen, dass das Ergebnis der Berechnung mit dem „wahren“ Sachverhalt übereinstimmt. Diese Wahrscheinlichkeit wird vorliegend mittels der (einfachen) Standardunsicherheit beschrieben, was bei einer Normalverteilung einem 68%-Vertrauensintervall entspricht. Die Ermittlung der Standardunsicherheit folgt dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ [15].

### 6.2. Übersicht

Die Unsicherheit der *HA* resp. *HSD* wird durch verschiedene Teilunsicherheiten bestimmt. Es sind dies:

- Unsicherheit in den Belastungsrechnungen resp. Unsicherheit in der Bestimmung der Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen.
- Unsicherheit in den Fitparametern der verschiedenen Funktionsgleichungen zur Berechnung der *HA* und *HSD*.

Die oben aufgeführten Teilunsicherheiten sind in die Ermittlung der Gesamtunsicherheit einzubeziehen. Untersuchungsparameter und Abbruchkriterium wirken sich zwar auf die absolute Höhe der *HA* resp. *HSD* aus, sie haben jedoch keinen (oder einen vernachlässigbaren Einfluss) auf die Unsicherheit ihrer Quantifizierung.

### 6.3. Massgebende Werte

Die Unsicherheiten in den Dosis-Wirkungsbeziehungen und in den Belastungsrechnungen wirken sich auf den *ZFI* aus. Geht man von der Annahme aus, dass die Unsicherheit der *HA*-Komponente von der Unsicherheit der Belastungsrechnung dominiert wird und diese über den gesamten Pegelbereich 1 dB beträgt, so kann man von einer Unsicherheit bei den *HA* von 10 bis 15 Prozent ausgehen. Realistisch sind eher 25 bis 35 Prozent. Berücksichtigt man noch die Unsicherheit in der *HSD*-Komponente von rund 40 Prozent so dürfte die Unsicherheit des *ZFI* zwischen 40 und 50 Prozent liegen.

Da der *ZFI* aber im Endeffekt als Vergleichsgrösse zwischen verschiedenen Betriebsszenarien dienen soll, welche weitgehend mit denselben Methoden ermittelt werden, ist für die Beurteilung der Ergebnisse jedoch nicht die oben gegebene Gesamtunsicherheit massgebend. Verschiedene Einflussfaktoren sind bei den zu vergleichenden Berechnungen identisch und heben sich daher bei einem direkten Vergleich gegenseitig auf (z.B. Unsicherheiten bei der Berechnung der Schallausbreitung in der Atmosphäre, Fluggeometrien, Leistungssetzung der einzelnen Flugzeugtypen, leichte Überbewertung in den *AWR* durch Verwendung der energetischen Maximalpegelmittelwerte, etc.). Dadurch reduziert sich die massgebende Unsicherheit beträchtlich und dürfte (ohne genauere mathematische Herleitung) rund 10 Prozent betragen. Dieser Wert wird dann relevant, wenn es darum geht zu entscheiden, ob zwei Belastungszustände sich im *ZFI* signifikant unterscheiden oder nicht.

## 7. Glossar

### 7.1. Verwendete Begriffe und Abkürzungen

AbP	Anzahl vom Fluglärm betroffene Personen
AsgP	Anzahl der vom Fluglärm stark gestörten Personen; berechnet nach der Neuen Zürcher Formel
AFV	Amt für Verkehr des Kantons Zürich
AW	Alarmwert
AWR	Durch Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen
dB	Dezibel
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DW	Dosis-Wirkungsbeziehung
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ES	Empfindlichkeitsstufe
FLULA	Fluglärmrechnungsprogramm der Empa
GsS	Gewichtsfaktor zur Umrechnung der Aufwachreaktionen in den prozentualen Anteil der starken Schlafstörung (%HSD)
H	Gesamthäufigkeit
h	Teilhäufigkeiten
HA	Highly Annoyed; Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen.
HSD	Highly Sleep Disturbed; Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen.
i	Zähler für Gitterpunkte
IGW	Immissionsgrenzwert
j	Index für Flugzeugtyp
$L_{AS,max}$	A-bewerteter Maximalpegel
$L_{DN}$	Day-Night-Level
LEN	Energetisch gemittelter Maximalpegel
Leq	Mittelungspegel
LSV	Lärmschutzverordnung
Mean	arithmetisches Mittel
n	Flugbewegungszahl
N	Nacht (22 bis 06 Uhr)
N1	1. Nachtstunde nach LSV (22 bis 23 Uhr)
N2	2. Nachtstunde nach LSV (23 bis 05 Uhr)
N3	letzte Nachtstunde nach LSV (05 bis 06 Uhr)
$N_{pop}$	Einwohnerzahl (Population)
p	Wahrscheinlichkeitsfunktion

$P_{AWR}$	Wahrscheinlichkeit einer durch Fluglärm induzierten zusätzlichen Aufwachreaktion
PW	Planungswert
RC	Richtcharakteristik; richtungsabhängige Schallabstrahlung einer Schallquelle, mittels eines mathematischen Modells beschrieben
T	Tag (06 bis 22 Uhr)
T1	1. Tagesstunde (06 bis 07 Uhr)
T16	letzte Tagesstunde (21 bis 22 Uhr)
VD	Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich
VZ2000	Volkszählung 2000
x	Index für Flugroute
ZFI	Zürcher Fluglärmindex
ZRH	Zürich

## 7.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1	Dosis-Wirkungsbeziehung zur Bestimmung des Prozentsatzes für starke Belästigung %HA (Formel 3-3).....	10
Abbildung 3-2	Dosis-Wirkungsbeziehung zur Bestimmung des %HSD für einen, fünf, zehn und zwanzig Überflüge.....	12
Abbildung 3-3	Differenz zwischen $L_{DN}$ und $Leq_{16}$ im Bereich von 47 bis 77 dB des 16 Stunden Mittelungspegels; die Punkte in der Grafik zeigen die Mittelwerte der Pegeldifferenzen je dB-Klasse.....	15
Abbildung 3-4	Vorgehen bei der Ermittlung der Maximalpegelhäufigkeitsverteilungen.....	17
Abbildung 3-5	Vergleich realer (graue Säulen) mit aus typenspezifischen Normalverteilungen ( $LEN_j$ , $\sigma = 2$ dB) generierten Maximalpegelverteilungen am Beispiel der Messstelle Nr. 6 des Flughafens Zürich im Jahr 2004.....	18
Abbildung 4-1	Jährliche Flugbewegungszahlen der Jahre 1998 bis 2004.....	21
Abbildung 5-1	Personen innerhalb der Untersuchungsperimeter für den Tag und die Nacht; Die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.....	22
Abbildung 5-2	Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen HA (links) und Anzahl betroffenen Personen über den Immissionsgrenzwerten des Tages (rechts); Die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.....	23
Abbildung 5-3	Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen HSD (links) und Anzahl betroffene Personen über den Immissionsgrenzwerten der Nacht (rechts); Die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.....	23
Abbildung 5-4	Kombinationen der HA (grüne Säulen) und HSD (orange Säulen) zum ZFI (gesamte Säulen) (links) und Anzahl betroffene Personen über den Immissionsgrenzwerten (Umhüllende Tag und Nacht) (rechts); Die Zahlenwerte befinden sich im Anhang 3.....	24

## 7.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Zeitperioden.....	7
Tabelle 2-2	Berechnungsausschnitte für die Jahre 1998 bis 2004.....	8
Tabelle 3-1	Differenz zwischen $L_{DN}$ und $Leq_{16}$ ( $L_{DN} - Leq_{16}$ ) im Bereich von 47 bis 77 dB des 16h-Mittelungspegels.....	15

## 8. Bibliografie

- [1] Basner, M., et al. (2004): Nachtfluglärmwirkungen (Bd. 1). Zusammenfassung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), FB2004-07/D, Köln.
- [2] Basner, M. et al. (2005): Die Umsetzung der DLR-Studie in einer lärmmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. Zeitschrift für Lärmbekämpfung. Jahrgang 52, Nr. 4, Springer VDI Verlag.
- [3] BUWAL (1998): Belastungsgrenzwerte für den Lärm der Landesflughäfen, 6. Teilbericht der Eidgenössischen Kommission für die Beurteilung von Lärmimmissionsgrenzwerten. Schriftenreihe Umwelt Nr. 296, Bern, 1998.
- [4] Empa, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung (2002): Flughafen Zürich-Kloten, Fluglärmbelastung Grossflugzeuge am Tag und in der Nacht im Jahre 1998, Bericht Nr. 406'333/2, 12. Juli 2002.
- [5] Empa, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung (2002): Flughafen Zürich-Kloten, Fluglärmbelastung Grossflugzeuge am Tag und in der Nacht im Jahre 1999, Bericht Nr. 420'850, 18. November 2002.
- [6] Empa, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung (2002): Flughafen Zürich-Kloten, Fluglärmbelastung des realen und nominellen Flugbetriebs von Grossflugzeugen am Tag und in der Nacht für verschiedene Betriebsphasen im Jahre 2000, Bericht Nr. 419'589-1, 28. Mai 2002.
- [7] Empa, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung (2002): Flughafen Zürich-Kloten, Vergleich gängiger Fluglärmmasse am Beispiel der Fluglärmbelastung von Grossflugzeugen im Jahre 2000 (realer Betrieb), Bericht Nr. 419'589-4, Juni 2002.
- [8] Empa, Abteilung Akustik (2003): Flughafen Zürich-Kloten, Fluglärmbelastung im Jahre 2001, Bericht Nr. 425'592, 16. Dezember 2003.
- [9] Empa, Abteilung Akustik (2004): Flughafen Zürich-Kloten, Fluglärmbelastung im Jahre 2002, Bericht Nr. 432'872, 19. Januar 2004.
- [10] Empa, Abteilung Akustik (2004): Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2003, Bericht Nr. 433'135, 2. April 2004.
- [11] Empa, Abteilung Akustik (2005): Flughafen Zürich Kloten, Fluglärmbelastung im Jahre 2004, Bericht Nr. 437'700, 31. Mai 2005.
- [12] Empa, Abteilung Akustik: Flughafen Zürich, Lärmindikatoren 1987 bis 2003, Auftrags-Nr. 436'564 und 437'702.
- [13] Empa, Abteilung Akustik (2005): Technische Dokumentation FLULA2, Version 2.1 vom April 2005.
- [14] Hofmann, R. (2006): ZFI, ein Zürcher Fluglärmindex?, Machbarkeitsstudie im Auftrag des Amtes für Verkehr des Kt. Zürich, 24. Februar 2006.
- [15] ISO/ENV 13005 (1995): GUM , Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [16] Lärmschutzverordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 5. Oktober 2004).
- [17] Miedema, H.M.E., Vos, H. (1998): Exposure-response relationships for transportation noise. The Journal of the Acoustical Society of America, 104(6), 3432-3445 (December 1998)
- [18] Miedema, H.M.E., Oudshoorn, C.G.M. (2001): Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and Their Confidence Intervals. Environmental Health Perspectives, 109(4), 409-416 (April 2001).
- [19] Regierungsrat des Kantons Zürich (2005): Antrag des Regierungsrats vom 21. Dezember 2005 (4203a) zur Volksinitiative „Für eine realistische Flughafenpolitik“.
- [20] Regierungsrat des Kantons Zürich (2004): Regierungsratsbeschluss RRB Nr. 1407 vom 15. September 2004.

- [21] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2006): Anzahl Einwohner pro Gemeinde, <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/SRDB/home.asp?H=BevoelkGebiet&U=02>
- [22] Unique, FLUGIS (2005): Daten-CD, aufbereitete Hektarraster-Daten VZ2000, 28.12.2005

## **9. Anhang**

- A1 Jährliche Flugbewegungszahlen der Grossflugzeuge
- A2 Pistenbelegung am Tag und in der Nacht
- A3 Zahlen zu den Abbildungen des Berichts in tabellarischer Form

## A1 Jährliche Flugbewegungszahlen der Grossflugzeuge

**Tabelle A2-1 Jährliche Flugbewegungszahlen der Grossflugzeuge**

<b>Jahr</b>	<b>Tag (06 bis 22 Uhr)</b>	<b>1. Nachtstunde (22 bis 23 Uhr)</b>	<b>2. Nachtstunde (23 bis 05 Uhr)</b>	<b>3. Nachtstunde (05 bis 06 Uhr)</b>	<b>Nacht (22 bis 06 Uhr)</b>
1998	253'516	3'871	1'101	1'170	6'142
1999	267'674	6'607	1'859	1'086	9'552
2000	288'809	8'166	1'717	922	10'875
2001	273'267	7'686	1'417	816	9'919
2002	252'172	4'954	1'063	179	6'196
2003	237'192	5'089	1'065	656	6'810
2004	234'991	6'656	885	6	7'547

## A2 Pistenbelegung am Tag und in der Nacht

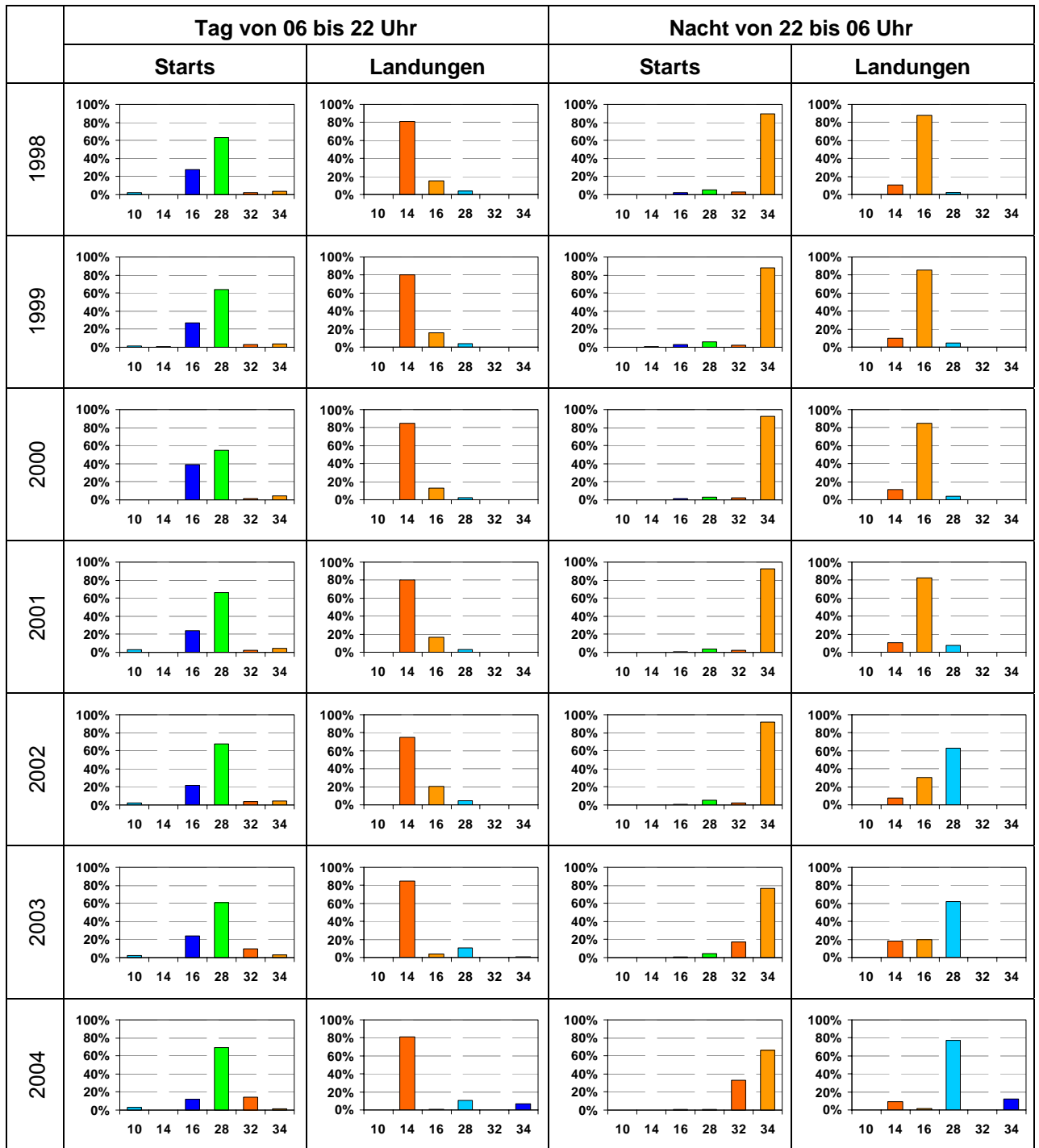
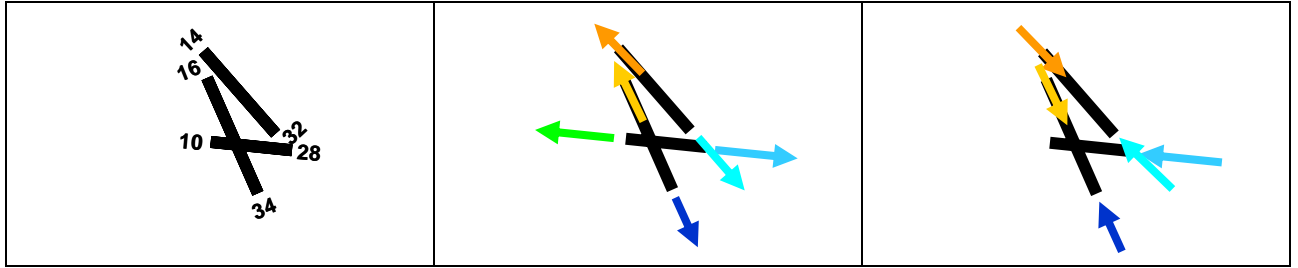


Abbildung A3-1 Pistenbelegung am Tag und in der Nacht für die Jahre 1998 bis 2004

Orange Nord (Landungen RWY14 und RWY16, Starts RWY32 und RWY34)  
 Hellblau Ost (Landungen RWY28 und RWY32, Starts RWY10 und RWY14)  
 Dunkelblau Süd (Landungen RWY34, Starts RWY16)  
 Hellgrün West (Starts RWY28)



**Abbildung A3-2** Pistensystem mit An- und Abflugrichtungen

## A3 Zahlen zu den Abbildungen des Berichts in tabellarischer Form

**Tabelle A4-1 Anzahl Personen im Untersuchungsperimeter, HA, HSD und ZFI**

Jahr	Tag (06 bis 22 Uhr)		Nacht (22 bis 06 Uhr)		Tag&Nacht
	AP im UP	HA	AP im UP	HSD	ZFI
1998	457'940	39'925	147'132	5'873	45'799
1999	468'517	41'002	224'761	11'753	52'755
2000	497'616	43'827	240'627	15'753	59'580
2001	451'994	38'501	203'435	12'134	50'635
2002	407'830	34'358	188'965	9'075	43'433
2003	346'049	28'260	261'702	13'040	41'300
2004	356'462	28'340	182'537	9'867	38'207

AP im UP Anzahl Personen im Untersuchungsperimeter  
 HA Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen  
 HSD Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen  
 ZFI Zürcher Fluglärmindex; Anzahl der durch den Fluglärm im Umfeld des Flughafens Zürich stark beeinträchtigte Personen resp. Anzahl Personen, die sich durch den Fluglärm stark belästigt und/oder durch den Fluglärm stark im Schlaf gestört fühlen

**Tabelle A4-2 Anzahl Personen über den Belastungsgrenzwerten der LSV**

Jahr	Umhüllende Tag und Nacht			Tag (06 bis 22 Uhr)			Nacht (22 bis 06 Uhr)		
	AW	IGW	PW	AW	IGW	PW	AW	IGW	PW
1998	10'212	41'735	94'142	8'832	30'686	65'108	1'516	15'359	44'182
1999	10'287	51'727	121'198	7'971	30'300	65'240	2'461	33'296	84'722
2000	11'395	53'563	138'753	8'793	27'331	70'151	2'748	31'729	89'902
2001	9'516	48'445	114'118	7'302	26'522	64'590	2'356	27'528	72'363
2002	6'665	38'777	92'780	6'073	21'194	54'622	728	20'630	57'513
2003	5'746	38'043	100'150	3'853	14'038	41'711	2'029	30'686	84'901
2004	3'538	29'029	79'327	2'173	11'479	35'304	1'501	18'255	59'741

AW Alarmwert  
 IGW Immissionsgrenzwert  
 PW Planungswert