

**Gutachterliche Stellungnahme zur beantragten**

**Betriebserweiterung am Flughafen Düsseldorf 2016**

Rainer Guski

Ruhr-Universität Bochum

Stand: 05.10.2016

# Inhaltsverzeichnis

1 Geplante Änderungen am Flughafen Düsseldorf.....	3
2 Programm für das vorliegende Gutachten.....	4
3. Akustische Kenngrößen zur Beschreibung der Fluglärm situation.....	4
3.1 Kurzbeschreibung der üblichen Kenngrößen.....	4
3.2 Was indizieren akustische Kenngrößen?.....	5
3.3 Welche nicht-akustischen Parameter sind zur Beschreibung von Fluglärm situationen hilfreich?.....	8
4. Zusammenhänge zwischen akustischen Kenngrößen und Lärmwirkungen, aktuelle Daten.....	9
4.1 Zusammenhänge mit Leq-basierten Kenngrößen.....	9
4.1.1 Leq-basierte Kenngrößen und Belästigung.....	9
4.1.2 Leq-basierte Kenngrößen und Gesundheitsrisiken.....	15
4.1.3 Leq-basierte Kenngrößen und kognitive Entwicklung.....	20
4.2 Maximalpegel-basierte Kenngrößen und Schlafstörungen bzw. Gesundheitsrisiken.....	21
4.2.1 Fluglärm-assozierte Schlafstörungen.....	21
4.2.2 Zeitpunkte der stärksten Störungen des Schlafes.....	24
4.2.3 Maximalpegel und Erkrankungsrisiken.....	26
4.3 Ereignishäufigkeiten und Belästigung.....	26
4.4 Kann man sich an Lärm gewöhnen?.....	31
4.4.1 Labor- und Feld-Untersuchungen zu Schlafstörungen durch Lärm.....	31
4.4.2 Reaktionen der Bevölkerung auf anhaltenden Fluglärm.....	32
5. Prognose der Lärmwirkungen bei Bestands- und Änderungsflughäfen.....	32
5.1. Wie können Bestands- und Änderungsflughäfen definiert werden?.....	32
5.2. Was sind typische Reaktionen auf hohe Lärm-Änderungsraten?.....	34
5.3. Wie lange halten „Änderungsreaktionen“ an?.....	35
5.4. Können „Änderungsreaktionen“ prognostiziert werden?.....	36
6. Können Belästigungsdaten zur Prognose von medizinisch erfassbaren Gesundheitsrisiken dienen?.....	36
7. Fazit.....	38
Literatur:.....	40

# 1 Geplante Änderungen am Flughafen Düsseldorf

Die Flughafen Düsseldorf GmbH plant nach den vorliegenden Informationen:

- bis zu 60 Flugbewegungen in den Spaltenstunden des Tages,
- eine flexiblere Nutzung der Nordbahn,
- die Planung der Bahnnutzung soll sich auf ein Jahr beziehen,
- acht neue Abstellpositionen für Flugzeuge, sowie
- bauliche Anpassungen zur Optimierung des Rollverkehrs im Bereich des östlichen Flughafengeländes.

Die bestehenden Nachtflugbeschränkungen (u.a. das Verbot für planmäßige Starts für Kap.3-Flugzeuge zwischen 22:00 und 06:00h und Landungen zwischen 23:00 und 06:00h, jeweils mit zu beantragenden Ausnahmegenehmigungen im Einzelfall, die generelle Erlaubnis von Flugbewegungen von 23:00 bis 24:00h und 05:00 bis 06:00h für acht Home-Base Carrier), sowie die sog. Off-Block-Regelung sollen nicht verändert werden.

Anmerkung:

Leider ist unklar, wie der Begriff „Spaltenstunden des Tages“ hier genau definiert ist. Handelt es sich um einen statistischen Begriff, dann könnte er z.B. die Stunden des Tages benennen, die im jährlichen Mittel die größte Zahl von Flugbewegungen haben. RP-Online berichtete am 15.04.2014 : „Die Spaltenstunden des Tages liegen laut Flughafen zwischen 7 und 8, 10 und 12, 13 und 14 sowie 17 und 20 Uhr“.

Laut Genehmigung zur Änderung der Betriebsregelung für das Parallelbahnsystem des Verkehrsflughafens Düsseldorf durch das Verkehrsministerium aus dem Jahr 2005 sind bisher erlaubt:

- 06:00 -- 22:00 Uhr: Einbahnnutzung 40 bzw. 43 + 2 Flugbewegungen; Zweibahnnutzung 45 + 2 Flugbewegungen in 56 Stunden pro Woche.
- 22:00 - 23:00 Uhr ganzjährig 33 Flugbewegungen.
- Für die übrige Nachtstunden gelten die oben erwähnten schwer überschaubaren Bedingungen in der Nachtflugregelung.

Für den Fall, dass es sich beim Begriff „Spaltenstunden des Tages“ um einen allgemeinen relativen Begriff handelt, könnte die konkrete Spaltenstunde von Tag zu Tag wechseln. Diese unterschiedlichen Bedeutungen sind für die Lärmwirkung wegen der unterschiedlichen Vorhersagbarkeit der Belastungen für die Lärm betroffenen wesentlich. Im Hinblick auf die Schlafgewohnheiten der Bevölkerung sind Belastungen in den morgendlichen Tagesstunden (06 bis 08 Uhr, vgl. Abschnitt 4.2.2) besonders schwerwiegend.

Weiterhin ist unklar, ob und welcher Zusammenhang zwischen der Steigerung der Flugbewegungen und der geplanten „flexiblere Nutzung der Nordbahn“ genau besteht. Für Flughafenbetreiber mag Flexibilität ein Standortvorteil sein; für Lärm betroffene ist es ein Nachteil, solange sie nicht an der Planung beteiligt sind und/oder nicht genau vorher wissen, wie der Flugbetrieb in den nächsten Tagen und Wochen aussehen wird.

## 2 Programm für das vorliegende Gutachten

Aus Sicht der Lärmwirkungsforschung besteht die wichtigste geplante Änderung in der Erhöhung der Flugbewegungen von bisher 45 auf 60 Slots im Linien- und Charterverkehr in bis zu 56 Tagesstunden pro Kalenderwoche von 6 bis 22 Uhr. Im vorliegenden Gutachten soll es zunächst (Kap. 3) um akustische Parameter zur Beschreibung von Fluglärmsituationen gehen, dann (Kap. 4) um Zusammenhänge zwischen akustischen Parametern und Lärmwirkungen, insbesondere aktuelle Daten zu Wirkungen von Dauerschallpegeln und Ereignishäufigkeiten von Luftverkehrsgeräuschen auf die Gesundheit der Anwohnerinnen und Anwohner. In Kap. 5 geht es um die Prognose der Lärmwirkungen bei sog. Bestands- und Änderungsflughäfen, und da es hierzu wenig Erfahrungen im medizinischen Bereich gibt, soll in Kap 6 diskutiert werden, ob (sozialpsychologisch erfasste) Belästigungsdaten zur Prognose von Gesundheitsrisiken dienen können.

## 3. Akustische Kenngrößen zur Beschreibung der Fluglärmsituation

### 3.1 Kurzbeschreibung der üblichen Kenngrößen

- Der **energie-äquivalente Dauerschalldruckpegel** ( $L_{pAeq3}$  bzw.  $L_{pAeq}$ ) ist der zur Zeit international am häufigsten benutzte Parameter. Der Buchstabe „L“ steht für „level“ (Pegel), das Subscript „p“ für „pressure“ (Druck), „A“ für die Frequenzbewertung durch das „A-Filter“, „eq3“ für den Äquivalenzparameter, der die Relation zwischen Ereignishäufigkeiten und Pegel beschreibt. Ist der Äquivalenzparameter „3“, dann entspricht die Verdopplung der Ereignishäufigkeit in einer bestimmten Bezugszeit einer Erhöhung des Dauerschallpegels um 3 dB. Wird dieser Parameter nicht angegeben, geht man meist stillschweigend davon aus, dass der Parameter „3“ gemeint ist. (Im alten deutschen Fluglärmgesetz von 1971 wurde der Äquivalenzparameter „4“ benutzt; d.h. bei Verdopplung der Ereignishäufigkeit in der Bezugszeit führte zur Erhöhung des Leq um 4 dB. Dies wurde mit Rücksicht auf internationale Vereinbarungen aufgegeben). Werden Dauerschallpegel zur Prognose von Lärmwirkungen eingesetzt, so muss berücksichtigt werden, dass Dauerschallpegel einige Annahmen enthalten, die in der Lärmwirkungsforschung selten geteilt werden, beispielsweise die Annahme, dass die mittlere Schallenergie eines diskontinuierlichen Geräusches in einem Zeitraum T die gleiche Wirkung hat, wie die eines kontinuierlichen Geräusches gleicher Energie im selben Zeitraum. Weiterhin wird meist angenommen, dass ein Dauerschallpegel X, der ein Geräusch mit der Dauer D beschreibt, gleichwertig einem Geräusch ist, das nur die halbe Dauer ( $D/2$ ) hat, dafür aber einen 3 dB (=  $10 * \log 2$ ) höheren Schallmesspegel aufweist. Der Dauerschallpegel ist ein sog. →

Beurteilungspegel, d.h. er braucht eine Angabe über die Zeit, für die er gelten soll.

- Der **Beurteilungspegel** kennzeichnet die auf einen Ort in einer bestimmten Zeit wirkende Schallimmission. In Europa werden heute für Verkehrslärm überwiegend drei Beurteilungspegel benutzt: der  $L_d$  (day level für 12 Tagesstunden, z.B.  $L_{pAeq, 06-18h}$ ), der  $L_n$  (night level für 8 Nachtstunden, die mit 10 dB Aufschlag gewichtet werden, z.B.  $L_{pAeq, 22-06h}$ ) und der  $L_{den}$  (day-evening-night level für 24 Stunden, eine Kombination aus  $L_d$ ,  $L_n$  und  $L_e$  (evening level für 4 Abendstunden, die mit 5 dB Aufschlag gewichtet werden)). In der Fachliteratur ist auch der 24-Stunden-Pegel  $L_{pAeq,24h}$  gebräuchlich. Vielfach wird in den Berechnungsvorschriften definiert, für welche längerfristigen Zeiträume (z.B. „die sechs verkehrsreichsten Monate“ oder ein ganzes Jahr) der Beurteilungspegel gelten soll. Dies ist für den Vergleich von Pegeln besonders wichtig.
- Der **Grundgeräuschpegel** ( $L_{90}$  bzw.  $L_{95}$ ) kennzeichnet denjenigen Schallpegel, der in 90 bzw. 95% der Beurteilungszeit erreicht oder überschritten wird. Auch hier muss die Beurteilungszeit angegeben werden.
- Der **Maximalpegel** ( $L_{pAF,max}$  oder  $L_{Amax}$ ) kennzeichnet den höchsten Schalldruckpegel, der in der Beurteilungszeit erreicht wurde. Er wird z.T. als „mittlerer Maximalpegel“ ( $L_{pAS,max}$ ) angegeben – z.B. als Mittelwert über die 6 höchsten Pegelwerte.
- Die **Emergenz** beschreibt üblicherweise das „Herausragen“ von Maximalpegeln aus dem Grundgeräuschpegel (z.B. definiert als  $L_{Amax} - L_{95}$ ); z.T. wird aber auch die Differenz zwischen Maximal- und Dauerschallpegel ( $L_{Amax} - L_{pAeq,24h}$ ) herangezogen. Auch hier muss die Beurteilungszeit angegeben werden.
- Die **Ereignishäufigkeit** kennzeichnet die Anzahl von lauten Schallereignissen – meist in Form von Überschreitungshäufigkeiten bestimmter Maximalpegel (sog. NAT-Werte, „number above threshold“). Die Festsetzung der „Schwelle“ für den Unterschied zwischen „leisen“ oder „normal lauten“ Ereignissen und „lauten“ Ereignissen ist willkürlich. Gebräuchlich sind NAT-Werte zwischen 55 und 75 dB (NAT55 bzw. NAT75). Auch hier muss die Beurteilungszeit angegeben werden. So vorteilhaft Ereignishäufigkeiten im Verständnis der Betroffenen erscheinen, muss doch berücksichtigt werden, dass der NAT-Wert für einen bestimmten Schwellenwert (z.B. NAT60 mit  $L_{Amax} > 60$  dB) keine Aussagen über die Anzahl der Häufigkeiten von unterhalb dieses Pegels liegenden Ereignissen zulässt.

## 3.2 Was indizieren akustische Kenngrößen?

In der Regel werden akustische Kenngrößen benutzt, um die Geräuschsituation an einem bestimmten Ort in einer bestimmten Zeit zu beschreiben. Wenn diese Kenngrößen benutzt werden, um juristisch relevante Grenzwerte zu definieren, wird impliziert, dass die Kenngrößen wirkungsrelevant sind, d.h. z.B. niedrige Pegelwerte auf geringere Wirkungen in der Bevölkerung hinweisen als größere Pegelwerte. Aus wissenschaftlicher Sicht ergibt sich die Frage, welche akustischen Kenngrößen mit welchen Lärmwirkungen in welchem Ausmaß korrespondieren. Anders ausgedrückt: Wie valide (gültig) sind akustische Kennwerte, und wofür?

Diese Frage wurde v.a. von August Schick (1990) ausführlich diskutiert, und inzwischen sind sich die meisten Forscher darin einig, dass nicht jede akustische

Kenngröße gleich gut mit allen bekannten Lärmwirkungen korrespondiert. So betonen z.B. die Schlafforscher oft, dass physiologische Kenngrößen der nächtlichen Schlafqualität zwar auch (negativ) mit dem nächtlichen energie-äquivalenten Dauerschallpegel korrelieren, aber deutlichere Zusammenhänge mit dem nächtlichen Maximalpegel und seiner zeitlichen Verteilung bestehen (vgl. z.B. Passchier-Vermeer & Passchier 2000; Guski et al. 2012, p.16f.; Müller et al. 2015, p.61). Andererseits zeigt sich im Bereich der gesundheitlichen Erkrankungsrisiken, dass der über ein Jahr integrierte energie-äquivalente Fluglärm-Dauerschallpegel (z.B. als  $L_{Aeq, 24h}$ ) signifikant sowohl mit der Rate von Depressions- als auch Herzinsuffizienz-Erkrankungen kovariiert (vgl. Seidler et al. 2015). Gleichzeitig betont die letztgenannte Studie die Bedeutung nächtlicher Maximalpegel für Herz-Kreislauf-Erkrankungsrisiken. Vergleichbare Zahlen über die Höhe des statistischen Zusammenhangs lassen sich in diesen Untersuchungsberichten allerdings kaum finden, weil oft mit abgeleiteten bzw. hinsichtlich des Einflusses von Confoundern bereinigten Größen gearbeitet wird, die zwischen den Untersuchungen variieren.

Die Datenlage ist bei den Belästigungen etwas günstiger: Systematisch erhobene Belästigungsangaben im Umkreis von Flughäfen korrelieren statistisch signifikant sowohl mit Dauerschallpegeln als auch Überflughäufigkeiten (vgl. Tab. 1). Die Unterschiede in der Höhe der Korrelationskoeffizienten ( $L_{Aeq}$  vs. N bzw. NAT) sind teils minimal (z.B. bei DFG 1974, Lärmstudie 2000, NORAH BER und NORAH STR), teils beträchtlich (z.B. Schreckenberg & Meis 2006 und NORAH CGN). Die Ursache dieser Unterschiede ist zur Zeit noch unklar; neben lokalen Unterschieden wird ein Zusammenhang mit der Art der Stichprobenziehung vermutet: im heute üblichen sozio-akustischen Studiendesign wird die Untersuchungsstichprobe meist nach Pegelklassen (z.B.  $L_{den}$  in 5-dB-Stufen) ausgewählt, d.h. die Stichprobe wird so angelegt, dass die Anzahl der Befragten auf allen Pegelstufen etwa gleich groß sind. Diese Methode der Stratifikation nach Pegelklassen sorgt zwar in der Gesamtstichprobe für eine Überrepräsentation der höheren Pegel im Vergleich zu einer reinen Zufallsstichprobe im Umkreis von Flughäfen, sichert aber die Präzision der Expositions-Wirkungs-Beziehungen über alle Pegelstufen hinweg, d.h. auch bei höheren Pegeln, was z.B. bei einer reinen Zufallsstichprobe nicht gewährleistet ist. Eine Alternative ist die Stratifikation der Stichprobe sowohl nach Pegeln und Überflughäufigkeiten möglichst unabhängig voneinander, wie sie MVA Consultancy (2007) an zusammen 19 Flughäfen realisiert haben. Leider finden sich in diesem Bericht keine Korrelationen auf Individualdaten-Basis.

Tab. 1 Korrelationen zwischen Fluglärmbelästigung und akustischen Prädiktoren

Studie	Jahr Erhebung	$L_{Aeq,T}$	N (NAT)	log N	NNI	Design
McKennell 1963	1961			.43	.45	R
MIL-Research 1971	1967		.26	.23	.43	R + N
Hazard 1971	1967				.35	R + Route
TRACOR 1970	1968	(.49)			.34	L + N
DFG Fluglärmwirkungen 1974	1969	.57	.55	.53	.57	L + N
Kodama 1971	1970				.67	?
Arbeitsgem. Schweiz 1973	1972	.46			.53	NNI
Hede & Bullen 1982	1980	(.36)	(.26)			(L)
Gjestland et al. 1990	1989	.42				L
Brink et al. 2005: Lärmst.2000	2001	.31	(.32)		.32	R
Schreckenberg & Meis 2006 (NAT70)	2005	.45	(.34)			L
NORAH FRA (NAT55, 06-22h)	2011	.47	.37			L
NORAH FRA (NAT55, 06-22h)	2012	.47	.39			L
NORAH FRA (NAT55, 06-22h)	2013	.47	.40			L
NORAH BER (NAT55, 06-22h)	2012	.50	.49			L
NORAH CGN (NAT55, 06-22h)	2013	.42	.31			L
NORAH STR (NAT55, 06-22h)	2013	.59	.56			L

Legende: ( ) = nicht vollständig vergleichbar. L = Stichproben-Stratifizierung nach Pegeln; R = Random-Design (keine Stratifizierung nach Pegel oder Bewegungshäufigkeit). FRA = Frankfurt, BER = Berlin-Schönefeld, CGN = Köln/Bonn, STR = Stuttgart. Alle angegebenen Korrelationen basieren auf Individualdaten. Die Angaben zu den NORAH-Koeffizienten finden sich im Anhang zu Schreckenberg et al. 2015.

Die relativ geringe Höhe der Korrelationskoeffizienten in Tabelle 1 (r zwischen 0.23 und 0.67) war schon häufiger Gegenstand von Diskussionen um die Validität von akustischen Maßen einerseits und ihrer Verwendung als Grundlage für Grenzwertsetzungen, angefangen von Schick (1990) bis Meyer (2011). Die Wirkungsforscher verweisen in diesem Zusammenhang darauf, dass Lärm als „unerwünschter Schall“ definiert ist und somit per Definition nicht allein akustisch erklärt werden kann, sondern nicht-akustische Faktoren (s.u.) einbeziehen muss. Hier bleibt festzuhalten, dass zumindest für systematisch erhobene Belästigungsangaben kein grundsätzlicher Validitäts-Unterschied zwischen Dauerschallpegeln und Überflughäufigkeiten besteht. Denkbar ist, dass sich die relativen Bedeutungen der Überflughäufigkeit einerseits und der Maximalpegel andererseits in Verlauf der letzten Jahrzehnte zugunsten der Überflughäufigkeiten verschoben haben, wie LeMasurier et al (2013) nahelegen – dazu mehr in Kap. 4. Eine andere Frage ist, ob das Ausmaß des Zusammenhangs zwischen diesen akustischen Variablen einerseits und den Belästigungsangaben andererseits hoch genug ist, um die Aussage wagen zu können,

dass akustische Variablen vom Typ  $L_{Aeq}$ , NAT oder NNI mit hinreichender Sicherheit Lärmwirkungen in der Bevölkerung vorhersagen. Auch dazu mehr in Kap. 4.

### **3.3 Welche nicht-akustischen Parameter sind zur Beschreibung von Fluglärmsituationen hilfreich?**

Seit Jahren ist bekannt, dass verschiedene situative, persönliche und soziale Faktoren (sog. Moderatoren) generell die Ausprägung von Belästigungs- und Störungssurteilen moderieren, d.h. dazu beitragen, verbal berichtete Lärmwirkungen stärker oder schwächer ausfallen zu lassen (vgl. dazu Job 1988; Guski 1999; Hellbrück et al. 2010). Es ist hier nicht der Ort, ausführlich über die Vielfalt dieser Faktoren zu berichten – hier sollen nur solche Faktoren aufgeführt werden, die im Zusammenhang mit Fluglärmsituationen dazu beitragen können, Fluglärmwirkungen und ihre Änderungen im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte besser zu verstehen.

1. Die individuelle **Lärmempfindlichkeit** ist ein starker Moderator für Belästigungs- und Störungsangaben. Personen, die sich selbst als generell stärker lärmempfindlich bezeichnen, zeigen bei vergleichbarer Exposition stärkere Belästigung und Störung als Personen, die sich selbst als weniger lärmempfindlich bezeichnen. Dieser Faktor kann offenbar nicht „von außen“ beeinflusst werden, und es gibt keine Hinweise darauf, dass sich die Lärmempfindlichkeit der von Fluglärm betroffenen Bevölkerung im Verlauf der letzten Jahrzehnte geändert hat.
2. Die **Bewältigungs- und Handlungsmöglichkeiten** gegenüber dem Lärm sind im Fall des Fluglärms sehr beschränkt: da der Fluglärm hauptsächlich von oben kommt, gibt es im Freien keinen Schutz, und innerhalb der Häuser werden die oben liegenden Räume, die meist weniger baulichen Schallschutz aufweisen als die unteren Räume, stärker belastet. Das von den Fluglärm-Betroffenen selbst eingeschätzte Lärmbewältigungsvermögen gilt als eine wesentliche Co-Determinante der Belästigungs- und Gesundheitswirkung von Lärm und ist eng mit der Beurteilung der eigenen Kontrolle über die Lärmsituation assoziiert (zusammenfassend: Schreckenberg et al. 2015, p. 29f.). Hier sei nur auf zwei Aspekte hingewiesen: *Erstens* haben einige Flughafenbetreiber schon lange erkannt, dass die erlebten Lärmbewältigungsmöglichkeiten der Betroffenen steigen, wenn sie Transparenz der Planungen, Zugang zu allen für sie relevanten Informationen und vorhersagbare Lärmsituationen erleben. Dies trägt zumindest zur sog. „kognitiven Kontrolle“ der Lärmsituation bei. *Zweitens* unterscheidet sich der Mittelwert des in NORAH erfassten Lärmbewältigungsvermögens zwischen den vier untersuchten Flughäfen: Die Skalenmittelwerte der 5-Punkte-Summenskala waren in Frankfurt (2011) mit 2,5 am niedrigsten, und in Stuttgart mit 3,2 am höchsten (vgl. Schreckenberg et al. 2015, p. 171). Gleichzeitig ist die Expositions-Wirkungsbeziehung der Belästigungs-Rohwerte unter den vier NORAH-Flughäfen in Frankfurt am höchsten und in Stuttgart am niedrigsten. Dieser Umstand weist darauf hin, dass die Bewältigungs- und Handlungsmöglichkeiten der Betroffenen gegenüber Fluglärm von den vier deutschen Flughäfen unterschiedlich stark unterstützt werden, obwohl sie wesentlich zur Minderung von Belästigung beitragen können.

3. **Strukturelle Faktoren** spielen bei der Beurteilung des Fluglärms eine besondere Rolle: „Die beim Fluglärm auf Verursacherseite, im Gegensatz z.B. zum Straßenverkehr, meist klar benennbaren Personen und Institutionen (Politiker, Behörden, Flughafen-Betreibergesellschaften etc.) erleichtern zudem die Adressierung von Lärmschutz-Forderungen. Erwähnenswert ist auch, dass beim Fluglärm wie in keinem anderen Gebiet der Lärmbekämpfung Grenzwerte eine direkte wirtschaftliche Auswirkung haben, da diese die Attraktivität eines Flughafens unmittelbar beeinflussen. Und wie nirgends sonst zeigt sich hier die Unvereinbarkeit zwischen einer wirtschaftlichen Nutzenmaximierung und den Erwartungen der Anrainer eines Flughafens an eine halbwegs erträgliche Lärmbelastung.“ (Guski et al. 2012, p. 15).

## 4. Zusammenhänge zwischen akustischen Kenngrößen und Lärmwirkungen, aktuelle Daten

### 4.1 Zusammenhänge mit Leq-basierten Kenngrößen

#### 4.1.1 Leq-basierte Kenngrößen und Belästigung

Vorbemerkung:

Auch wenn erhebliche Belästigungen eine gesundheitliche Beeinträchtigung darstellen, werden Belästigung (Abschnitt 4.1.1) und Gesundheitsrisiken (4.1.2) hier als getrennte Fluglärmwirkungen behandelt. Hauptgründe für diese Trennung sind v.a. die unterschiedliche Methodik der jeweiligen Untersuchungen und der unterschiedliche Differenziertheitsgrad der Ergebnisse.

In einem systematischen Review für die WHO haben Guski, Schreckenberg und Schümer (eingereicht 2016) insgesamt 15 Bevölkerungs-Befragungen zu Fluglärm nach festen Regeln ausgewählt und analysiert, die in den Jahren 2001-2014 publiziert wurden. (Die Daten der NORAH-Untersuchungen wurden leider erst 2015 publiziert, durften aus methodischen Gründen also nicht in das Review eingehen). Die Analysen fassen die Antworten von insgesamt 18.947 Personen zusammen; die Dauerschallpegel variieren in den Untersuchungen zwischen 22 und 74 dB L<sub>Aeq,24h</sub>, d.h. von kleineren Verkehrsflughäfen mit 34 regulären Flügen bis zu großen internationalen Flughäfen mit mehr als 1.200 Flügen pro Tag. Da die meisten der Untersuchungen den L<sub>den</sub> als Bezugspegel und die Belästigung entsprechend den ICBEN/ISO-Standards erhoben und dieselbe Definition von „hoch belästigt“ („Highly Annoyed“, HA) angeben, die auch in den sog. EU-Standardkurven benutzt wird (vgl. Miedema & Oudshoorn 2001), konnten auf der Basis von Funktionsgleichungen u.a. zusammenfassende Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen Fluglärmpegeln und „Prozent Hochbelästigte“ geschätzt werden. Als „hoch belästigt“ werden hier einheitlich diejenigen Personen bezeichnet, die mindestens 73% der Länge der Belästigungs-Antwortskala wählen. Das

zusammenfassende Ergebnis aus den hier eingehenden 12 Untersuchungen ist in Abb. 1 als schwarze Linie dargestellt, zusammen mit der sog. EU-Standardkurve für Fluglärm und der von Janssen & Vos (2009) publizierten Kurve. Dabei ist anzumerken, dass sich die Daten-Grundlagen zwischen den von den Niederländern und von uns geschätzten Kurven unterscheiden: Während die Niederländer auf die originalen Rohdaten zurückgreifen konnten, standen uns nur die von den Studien-Autoren gelieferten Funktionsgleichungen zur Verfügung. Das bedeutet nicht unbedingt, dass unsere Kurve weniger präzise ist, wohl aber, dass die uns zur Verfügung stehenden Informationen nicht ausreichen, um Konfidenzintervalle für die Kurve zu rechnen.

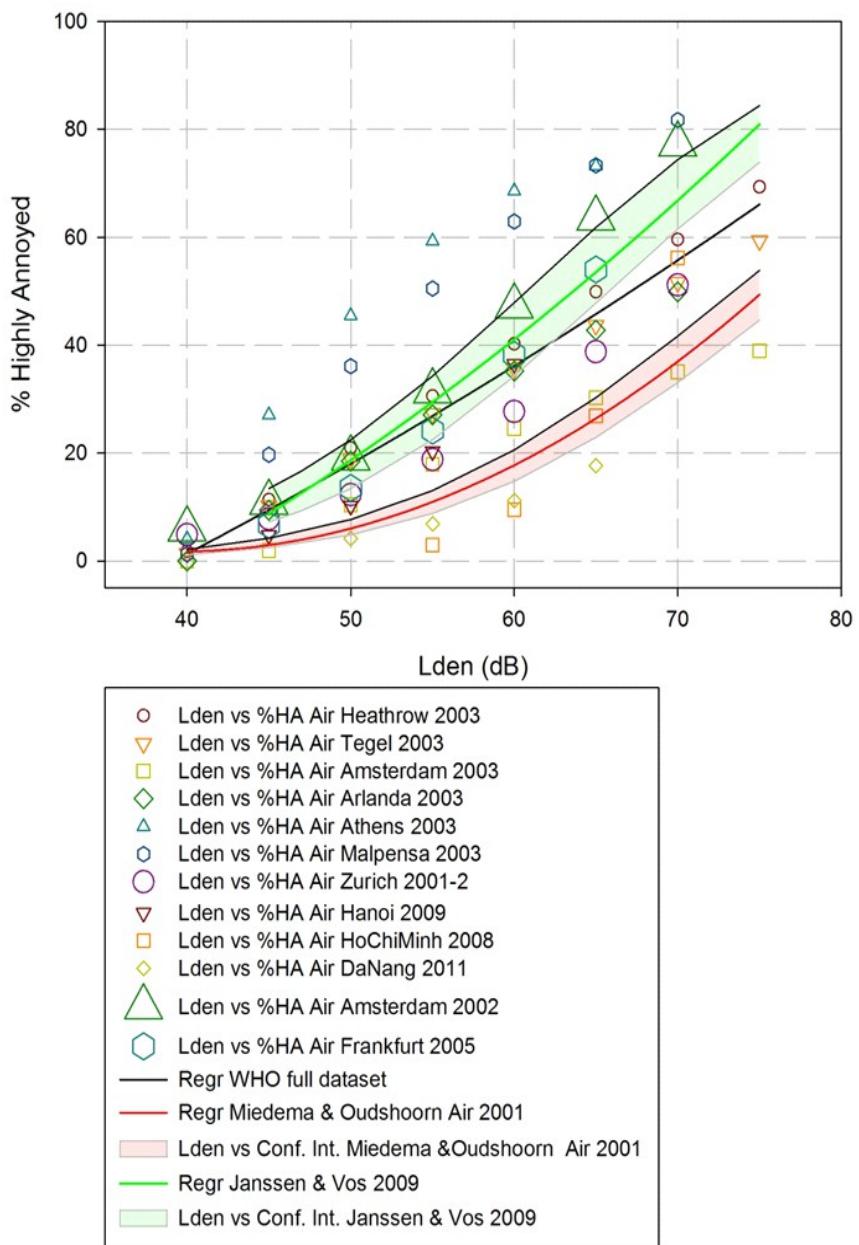


Abb. 1: (aus Guski et al., 2016, Fig. 2): Scatterplot und quadratische Regression (schwarze Linie) der Beziehung zwischen L<sub>den</sub> und dem Prozentsatz hoch belästigter Menschen für 12 Fluglärm-Untersuchungen. Daneben sind die Expositions-Wirkungsbeziehungen für Fluglärm aus Miedema & Oudshoorn (2001, rot) und Janssen & Vos (2009, grün) abgebildet.

Zunächst ist an Abb. 1 zu bemerken, dass die Varianz der Prozentwerte insbesondere im mittleren Pegelbereich relativ hoch ist – so gibt es Untersuchungen aus Asien, deren %-HA-Mittelwerte im mittleren Pegelbereich teils unterhalb der sog. „EU-Standardkurve“ (Miedema & Oudshoorn 2001) liegen, andererseits liegt die Mehrheit der Untersuchungen in fast allen Pegelbereichen oberhalb der „Standardkurve. Die Größe der einzelnen Punkte im Scatterplot entspricht näherungsweise der Teilnehmerzahl der jeweiligen Untersuchung, und die schwarze Regressionslinie ist eine quadratische Regression aus den per Teilnehmerzahl gewichteten Mittelwerten der %HA in 5-dB-Pegelschritten.

Abb. 1 macht deutlich, dass die Fluglärmwirkung im Sinne der „Hohen Belästigung“ der betroffenen Anwohnerinnen und Anwohner heute deutlich höher ist als zur Zeit der Etablierung der EU-Standardkurven. Damals waren bei 60 dB L<sub>den</sub> etwa 18% der Betroffenen hoch belästigt, heute sind es etwa 37%.

In der gesellschaftspolitischen Diskussion wird ein Anteil von 25% der Lärmbetroffenen als „erheblich“ angesehen (Rohrmann 1984). Fünfundzwanzig Prozent Hochbelästigte wurden früher bei ca. L<sub>den</sub> = 63 dB Fluglärm erreicht, heute schon bei ca. 53 dB L<sub>den</sub>. Das bedeutet, dass auch die im deutschen FluglärmSchutzGesetz von 2007 festgelegten Werte für baulichen Schallschutz längst nicht mehr ausreichen, um die Bevölkerung vor erheblichen Belästigungen zu schützen. Für den Änderungsantrag des Flughafen Düsseldorf GmbH bedeutet dies, dass der Lärmschutz schon heute – d.h. ohne Änderung – teilweise nicht mehr den gesundheitlichen Anforderungen entspricht, auch wenn er dem bestehenden Fluglärmgesetz genügt.

Der „day-evening-night level“ L<sub>den</sub> versucht zwar, den Abend- und Nachtstunden etwas mehr Berücksichtigung zu verschaffen, indem die in diesen Zeiten auftretenden Schallpegel einen Aufschlag bekommen, aber das deutsche FluglärmSchutzGesetz berücksichtigt weder den Nachmittag noch den Abend in besonderer Weise – es gibt nur getrennte Werte für den Tag und die Nacht. Dabei ist seit Jahren bekannt, dass die Belästigung durch Verkehrslärm besonders in den Nachmittags- und Abendstunden höher ist als während der üblichen beruflichen Beschäftigungszeiten mit vergleichbaren Dauerschallpegeln (vgl. z.B. Schreckenberg & Guski 2004: erhöhte Belästigung durch Straßenverkehrslärm 16-19h; erhöhte Belästigung durch Schienenverkehrslärm 18-22h); Schreckenberg & Meis 2006: erhöhte Belästigung durch Fluglärm 16-17h, 19-20h, 21-22h). Sollten Flughafen-Ausbaupläne dazu führen, dass die Anzahl der Flugbewegungen insbesondere zwischen 16 und 22 Uhr steigt, ist mit einer überproportionalen Zunahme der Belästigung zu rechnen.

In Abb. 1 wird nicht zwischen Untersuchungen an sog. „Bestandsflughäfen“ und Untersuchungen an „Änderungsflughäfen“ differenziert. Das entspricht dem Vorgehen von Miedema & Oudshoorn (2001) und Janssen & Vos (2009). Allerdings wird dieses Vorgehen in der wissenschaftlichen Literatur kritisiert (z.B. durch Gjestland et al. 2015), weil angenommen wird, dass die Erhöhung der Belästigung bei sog. „Änderungsflughäfen“ ein vorübergehender Effekt sein kann und somit die generelle Expositions-Wirkungskurve nach oben verzerrt. Allerdings gibt es noch keine allgemein akzeptierte Definition der Bestands- oder Änderungssituation an Flughäfen. Einigkeit besteht in der Lärmwirkungsforschung darin, dass es im strengen Sinne kaum „Bestandsflughäfen“ gibt, weil fast alle Verkehrsflughäfen seit etwa 1950 bis ca. 2008 von Jahr zu Jahr Steigerungsraten der Flugbewegungen (bis zu 7 Prozent pro Jahr) erlebt haben, und die „wesentliche bauliche Änderung“, die im deutschen FluglärmSchutzGesetz als Kriterium für „wesentliche Änderung“ genannt wird, meist schon lange vor ihrer Durchführung für erhebliche Unruhe in der Bevölkerung sorgt und zu gestiegenen Prozentsätzen hoch belästigter Personen in systematischen Befragungen führen kann.

Janssen & Guski (im Druck) haben vorgeschlagen, die öffentlich verbreitete Planung der langfristigen Erhöhung von Flugbewegungen und Verlegung von Flugrouten als Hauptkriterium zur Definition der *Änderungssituation* eines Flughafens zu machen, und folglich alle Flughäfen bis zu 3 Jahre nach dieser Ankündigung und nach dem Ende der öffentlichen Diskussion über diese Änderungen bzw. Änderungsabsichten als „high rate change“-Flughäfen (HRC) zu klassieren, alle anderen als „low rate change“ (LRC). Aus dieser Perspektive sind z.B. die Flughäfen Frankfurt seit 1997 und Düsseldorf seit 2015 HRC-Flughäfen, und Lärmwirkungsuntersuchungen, die in dieser Zeit an den betreffenden Flughäfen stattfinden, müssen zumindest mit erhöhten Belästigungswerten rechnen – wobei niemand genau sagen kann, ob und wann diese erhöhten Werte wieder heruntergehen. Die von Janssen & Guski vorgeschlagenen 3 Jahre sind nicht mehr als eine grobe Schätzung, die v.a. darauf zurückgeht, dass es keine Untersuchung gibt, die später als 2,5 Jahre nach einer baulichen Änderung durchgeführt wurde.

Werden die in Abb. 1 dargestellten Untersuchungen nach dem Vorschlag von Janssen & Guski (im Druck) hinsichtlich LRC und HRC klassiert (wobei 2 Untersuchungen wegen Unklarheiten in der HRC/LRC-Frage ausgeschlossen werden mussten), so zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Gruppen (Abb. 2). Allerdings liegen auch die %HA-Werte der LRC-Untersuchungen deutlich über der alten EU-Standardkurve; beispielsweise sind 25% der Betroffenen an LRC-Flughäfen schon bei 58 dB L<sub>den</sub> hoch belästigt. In HRC-Untersuchungen finden wir 25% HA bei ca. 53 dB L<sub>den</sub>. Beide Ergebnisse weisen darauf hin, dass die im deutschen FluglärmSchutzGesetz von 2007 festgelegten Werte für baulichen Schallschutz sowohl für Bestands- als auch Änderungsflughäfen nicht ausreichen, um die Bevölkerung heute vor erheblichen Belästigungen zu schützen.

Im Zusammenhang mit dem Planfeststellungsverfahren für den Flughafen Düsseldorf ist festzustellen, dass dieser Flughafen nach der Definition von Janssen & Guski (im Druck) zur Zeit als Änderungsflughafen („high rate change airport“) angesehen werden muss. Bei Übertragung der WHO-Ergebnisse auf Düsseldorf müssen folglich auch hier zur Zeit 25% Hochbelästigte bei ca. 53 dB L<sub>den</sub> angenommen werden, und niemand kann sagen, ob und wann diese hohe Belästigung wieder sinkt.

Noch eine Anmerkung: Die grüne Kurve aus Janssen & Vos 2009 liegt relativ dicht an der HRC-Kurve des WHO-Reviews, was damit korrespondiert, dass vier der sieben von Janssen & Vos (2009) benutzten Untersuchungen als HRC-Untersuchungen anzusehen sind.

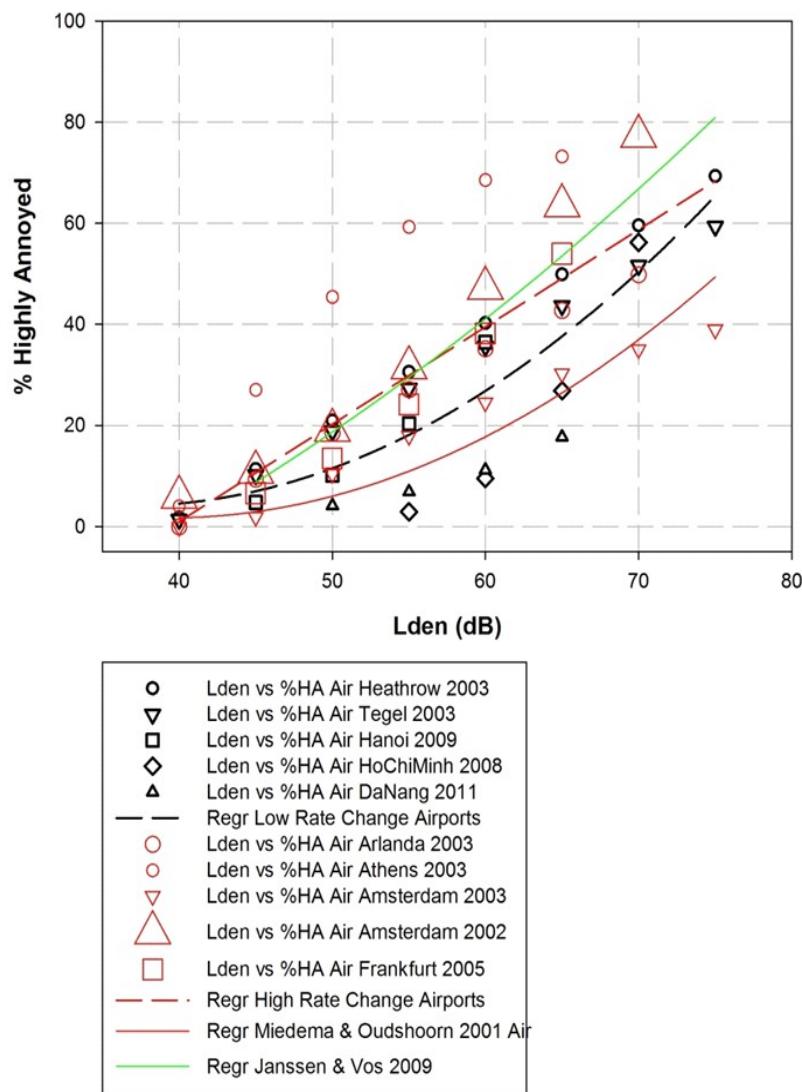


Abb. 2 (aus Guski et al. 2016, Fig. 4): Scatterplot und Regressionslinien zur Beziehung zwischen  $L_{den}$  und % „hoch belästigt“ (% HA) bei 5 „high-rate-change“ und 5 „low-rate-change“ Fluglärm-Untersuchungen. Weiterhin sind die Exposition-Wirkungskurven von Miedema & Oudshoorn (2001, rote Kurve), und Janssen & Vos (2009, grüne Kurve) dargestellt.

Die Frage nach den *Ursachen des Belästigungstrends* für Fluglärm kann bislang nur teilweise beantwortet werden. In der Vergangenheit wurden v.a. methodische Gründe, der Änderungs-Kontext der Untersuchung und der Anstieg der Flugbewegungen diskutiert.

Hinsichtlich *methodischer Unterschiede* zwischen älteren und jüngeren Fluglärm-Untersuchungen haben Janssen et al. (2011) die Studienmerkmale von 34 Untersuchungen zwischen 1967 und 2005 auf Basis der im TNO vorhandenen Originaldaten klassiert und per Meta-Regression in Zusammenhang mit der Höhe der Belästigungs-Rohwerte gebracht. Zur Vereinheitlichung der Belästigungsdaten wurden die individuellen Angaben zu Alter, Haushaltsgröße, Hauseigentümer, ökonomische Abhängigkeit vom Flughafen, Nutzung des Flughafens, Lärmempfindlichkeit, Furcht vor Flugzeugen, Anzahl der Überflüge (pro 24 h) und Fenster-Isolation als individuelle Moderatoren berücksichtigt, und Studienjahr, Kontakt-Art, Response-Rate sowie Art der Belästigungsskala als Gruppen-Moderatoren (teils als Interaktionsvariable mit Studienjahr)

in die Analyse eingebracht. Es zeigte sich, dass der postalische Kontakt, das (klassierte) Studienjahr zwischen 1996 und 2005, die 11-Punkte-Skala und eine Response-Rate <60% einen erhöhenden Einfluss auf die mittlere Belästigung hatte. Nur der Skalen-Effekt war dabei statistisch signifikant, aber mit dem Studienjahr konfundiert, d.h. alle Untersuchungen ab 1996 im TNO-Datensatz nutzten die 11-Punkte-Skala. Somit fallen nach dieser Analyse methodische Unterschiede zwischen den Fluglärm-Untersuchungen weitgehend aus, denn da der sog. „Belästigungstrend“ auch in älteren Untersuchungen auftritt, die überwiegend 4- oder 5-Punkte-Skalen benutzten, scheint die Antwortskala keinen wesentlichen Einfluss zu haben.

Der Einfluss des *Änderungs-Kontexts* der Untersuchungen wurde oben bereits angesprochen. Dort zeigte sich, dass er einen Einfluss auf die Belästigung hat, der jedoch als alleinige Erklärung nicht ausreicht. Hier sei noch erwähnt, dass auch die NORAH-Ergebnisse (Schreckenberg et al. 2015) zum Vergleich der Flughäfen Frankfurt, Berlin-Schönefeld, Köln/Bonn und Stuttgart die Bedeutung des Änderungs-Kontexts als Hauptursache für den Belästigungstrend in Frage stellen: Die Flughäfen Köln/Bonn und Stuttgart können beide zum Zeitpunkt der NORAH-Befragungen (2013) als LRC-Flughäfen angesehen werden. Dort ergaben sich Belästigungskurven, die deutlich oberhalb der EU-Standardkurve liegen und sich teilweise mit den Kurven für den HRC-Flughafen Frankfurt 2011-2013 überlappen. Dagegen liegen die gemittelten Belästigungsrohwerte vom Flughafen Berlin-Schönefeld, der 2012 wegen des erwarteten Betriebsbeginns als HRC galt, meist etwas unterhalb der Werte von Frankfurt, und die entsprechenden Werte von Köln/Bonn liegen teilweise oberhalb der Werte von Frankfurt (vgl. Abb.3). Insgesamt sprechen die NORAH-Daten zwar für einen die Belästigung erhöhenden Effekt der Änderungssituation am Flughafen, aber dieser Einfluss ist nicht dominierend und kann nicht als Hauptursache für den sog. Belästigungstrend gelten.

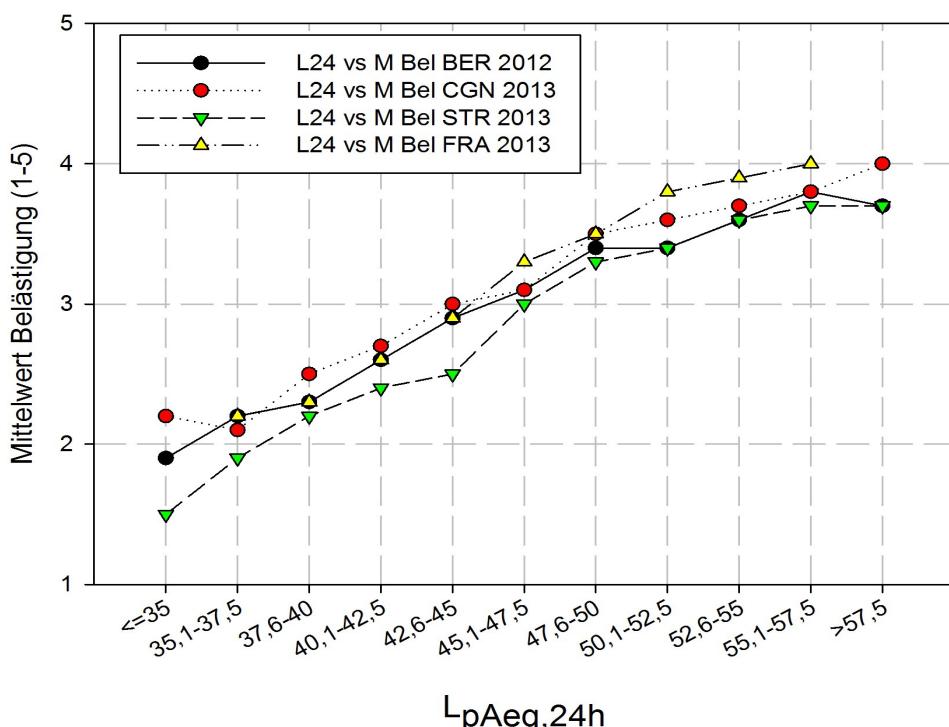


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Belästigungs-Mittelwerten und 24-Stunden-Pegel. Daten aus den Querschnittsuntersuchungen von NORAH an den Flughäfen Frankfurt (2013, N=3.508), Köln/Bonn (2013, N=2.955), Stuttgart (2013, N=1.979) und Berlin-Schönefeld (2012, N=5.548). Quelle: Schreckenberg et al., 2015, Tab.9-15, hier nur Mittelwerte für Zellen mit mehr als 90 Personen.

Anmerkung: Der Einfluss der über die Jahre gestiegenen Flugbewegungshäufigkeit auf den sog. Belästigungstrend wird im Abschnitt 4.3 diskutiert.

#### 4.1.2 Leq-basierte Kenngrößen und Gesundheitsrisiken

Die Erforschung der Auswirkungen von Fluglärm auf medizinisch diagnostizierbare Gesundheitsrisiken hat im letzten Jahrzehnt erhebliche Fortschritte gemacht. Als wissenschaftliche Meilensteine sind hier die HYENA-Studie (zusammenfassend Jarup et al. 2008), die Untersuchungen von Huss et al. (2010), Hansell et al. (2013), Correia et al. (2013) und der epidemiologische Teil der NORAH-Studie (Seidler et al. 2015) zu nennen. Die große Verbundstudie HYENA („Hypertension and Exposure to Noise near Airports“) untersuchte gezielt den Einfluss von Fluglärm auf den **Blutdruck** (bzw. Hypertonie). Sie wurde an 6 europäischen Flughäfen mit insgesamt 4.861 Personen im Alter zwischen 45 und 70 Jahren durchgeführt, wobei nicht zwischen Bestands- und Änderungsflughäfen unterschieden wurde. Bei der Stichprobenziehung wurde sowohl nach Flug- als auch Straßenlärm-Belastung stratifiziert. Die (automatisierten) Blutdruckmessungen fanden an nur einem Tag während des Besuchs eines geschulten Interviewers statt. In der statistischen Auswertung zeigte sich eine signifikante Abhängigkeit der Blutdruckwerte von der Höhe des nächtlichen Fluglärms. Bemerkenswert erscheint, dass in der Pegelklasse 40-44 dB  $L_{night}$  das höchste Hypertonie-Risiko gefunden wurde. Dagegen zeigte sich kein Zusammenhang für den Fluglärm am Tage (s. Abb. 4).

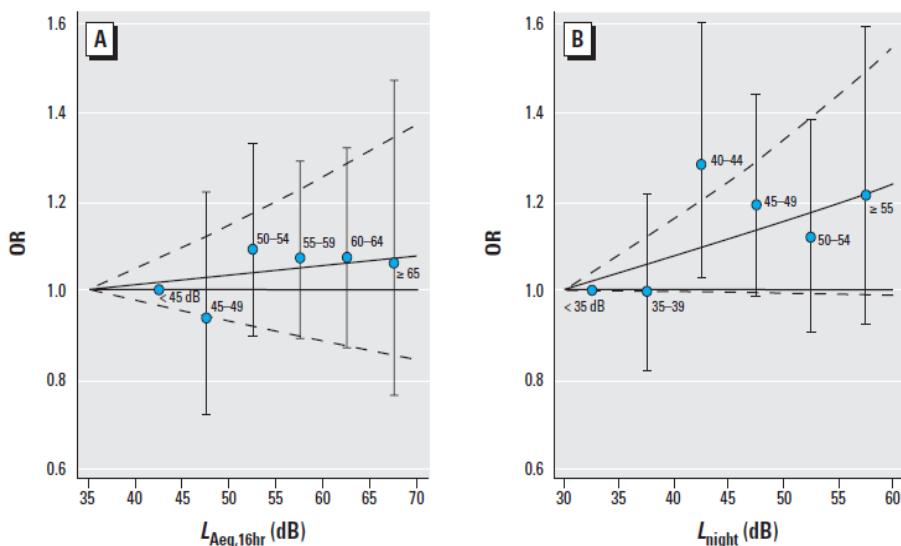


Figure 1. ORs of hypertension in relation to aircraft noise (5-dB categories).  $L_{Aeq,16hr}$  (A) and  $L_{night}$  (B) separately included in the model. Adjusted for country, age, sex, BMI, alcohol intake, education, and exercise. The error bars denote 95% CIs for the categorical (5-dB) analysis. The unbroken and broken curves show the ORs and corresponding 95% CIs for the continuous analysis.

Abb. 4 (aus der HYENA-Studie - Jarup et al., 2008): Zusammenhang zwischen Hypertonie-Risiko (als Odds Ratio, OR) und Fluglärmbelastung am Tage (links) und in der Nacht (rechts), adjustiert für wichtige Confounder.

Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass zwischen den 6 verschiedenen Flughäfen (bzw. Ländern) innerhalb der HYENA-Studie große Unterschiede bei den

gemessenen Blutdruckwerten bestanden, die wegen der Konfundierung von Land (Kultur, Sprache und Interviewer) und Flughafen (Größe, HRC/LRC) nicht aufgeklärt werden können. Zu erwähnen ist weiterhin, dass in der Blutdruck-Teilstudie des NORAH-Projekts (Eikmann et al. 2015) an 844 Personen, die nach Schulung 2011 und 2013 jeweils 3 Wochen lang ihren Blutdruck morgens und abends selbst (automatisch) gemessen haben, kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem abendlich/nächtlichen Fluglärmpegel ( $L_{pAeq,18-06h}$ ) am Wohnort und der Höhe der morgendlichen Blutdruck-Mittelwerte gefunden wurde.

In der registerbasierten Schweizer Kohortenstudie (Huss et al., 2010) wurde der Einfluss von Fluglärm, Straßenverkehrslärm und Luftschadstoffen auf die **Herzinfarkt-Mortalität** untersucht. Es zeigte sich eine grenzwertig signifikante etwa 30%ige Risikoerhöhung bei Fluglärm-Exposition von mindestens 60 dB gegenüber <45 dB  $L_{DN}$ ; bestand die gleiche Wohnadresse über mindestens 15 Jahre, so zeigte sich ein signifikant um etwa 50% erhöhtes Risiko (entsprechend einem relativen Risiko von 1,5 - vgl. Abb.5). Diese Ergebnisse sind hinsichtlich des Alters und Geschlechts adjustiert, allerdings ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass diese Studie ebenso wie fast alle bisherigen epidemiologischen Studien etwaige Ergebnisverzerrungen durch wichtige potentielle individuelle Confounder (Störvariablen) wie beispielsweise den Tabakkonsum und Leibesumfang nicht berücksichtigt.

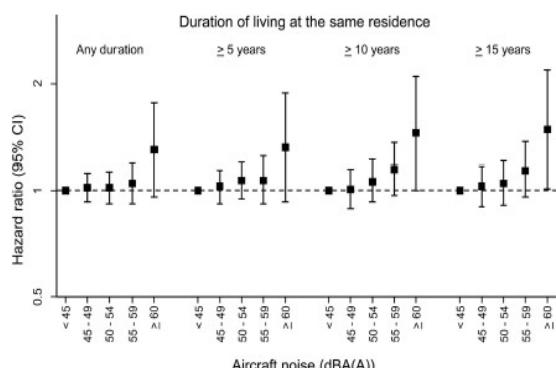


FIGURE 1. Mortality from myocardial infarction and estimated exposure to aircraft noise, Switzerland, 2000–2005. Results from model III are shown for persons who at the time of census had lived in the same place of residence for any duration, or for at least 5, 10, or 15 years.

Abb. 5 (aus Huss et al., 2010): Zusammenhang zwischen Herzinfarkt-Risiko und Fluglärmpegel ( $L_{DN}$ ) in der Schweizer Kohortenstudie insgesamt (ganz links) und getrennt nach Wohndauer (5, 10 und 15 Jahre).

Im Rahmen der HYENA-Studie untersuchten Floud et al. (2013) den Zusammenhang zwischen Fluglärm und der selbstberichteten Diagnose einer ischämischen Herzerkrankung (**Herzinfarkt** oder **Angina pectoris**), eines **Schlaganfalls** oder einer **Herzerkrankung**. Bei Berücksichtigung möglicher Confounder fanden die Autoren statistisch nicht signifikant erhöhte adjustierte Odds Ratios für ischämische Herzerkrankungen, Schlaganfälle und Herzinsuffizienz. Bei gemeinsamer Auswertung von ischämischen Herzerkrankungen und Schlaganfall zeigte sich für Fluglärm am Tag eine Odds Ratio von 1,05, für Fluglärm in der Nacht eine Odds Ratio von 1,12. Die prozentuale Risikoerhöhung für Fluglärm wurde nahezu verdoppelt, wenn ausschließlich Personen mit einer mindestens 20-jährigen Wohndauer an ihrer letzten Adresse betrachtet werden; für Fluglärm in der Nacht wurde die entsprechende Odds Ratio statistisch signifikant (OR=1,25).

Hansell et al. (2013) untersuchten im Bereich des Flughafens Heathrow das Risiko für stationäre Behandlungen und Todesfälle aufgrund von **koronarer Herzkrankheit**, **Schlaganfall** und aufgrund einer **kardiovaskulären Erkrankung insgesamt**. Für

Fluglärm am Tage ( $L_{day}$  7 bis 23 Uhr;  $>63$  dB gegenüber  $\leq 51$  dB) zeigte sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang mit Krankenhaus-Einweisungen wegen koronarer Herzkrankheit einschließlich Herzinfarkt (relatives Risiko RR=1,21) sowie Schlaganfall (RR=1,24). Für nächtlichen Fluglärm ( $L_{night}$   $>55$  dB gegenüber  $\leq 50$  dB) betrug das relative Risiko für Krankenhaus-Einweisungen wegen koronarer Herzkrankheit 1,11 sowie für Schlaganfall 1,23. Generell war das relative Risiko für Krankenhaus-Einweisungen wegen einer kardiovaskulären Erkrankung etwas niedriger.

Correia et al. (2013) untersuchten bei über 65-jährigen Personen im Umfeld von insgesamt 89 amerikanischer Flughäfen die Fluglärm-bezogenen Risiken (Risk Ratios) für Krankenhaus-Einweisungen wegen einer **Herz-Kreislauf-Erkrankung**. Dabei wurde die Fluglärmbelastung an Hand von Lärmkonturen und Postleitzahlen nur relativ grob geschätzt. Bei Adjustierung für individuelle, soziodemographische Faktoren und für Luftsabststoffe ergab sich die stärkste (und statistisch signifikante) Assoziation der Fluglärmexposition (3,5% Risiko-Anstieg bei 10 dB Anstieg des  $L_{DN}$ ) mit der stationären Aufnahme wegen einer ischämischen Herzerkrankung.

Im Rahmen des NORAH-Projekts analysierten Seidler et al. (2015) Krankenkassen-Daten von ca. 1 Million Versicherten älter als 40 Jahre im Umfeld der Flughafen Frankfurt. Es ging um den Zusammenhang zwischen Flug-, Straßen- und Schienenlärm einerseits und den Risiken für Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Herzinfarkt, Schlaganfall, Herzinsuffizienz) sowie Brustkrebs und Depressionen (depressive Episoden). Die akustische Belastung wurde für alle drei Verkehrslärmquellenarten adressgenau berechnet – im Fall der vertiefenden Befragung von Herzinsuffizienz-Patienten sogar rückwirkend für deren Wohnadressen im Verlauf der letzten 18 Jahre. Hier soll nur über die Fluglärm-Ergebnisse berichtet werden.

Zu **Herz-Kreislauf-Erkrankungen**: In der NORAH-Fallkontrollstudie sind Fluglärmpegel ab 60 dB  $L_{pAeq,24h}$  (statistisch nicht signifikant) mit einem erhöhten Herzinfarkt-Risiko (OR = 1,42) und einem erhöhten Schlaganfall-Risiko (OR = 1,62) verbunden. Wenn ausschließlich verstorbene Herzinfarkt-Patienten in die Analyse einbezogen werden, ergibt sich für Fluglärmpegel ab 60 dB  $L_{pAeq,24h}$  ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko (OR = 2,70). Beim Schlaganfall verändern sich die Risiken bei Einschränkung auf die verstorbenen Patient/innen nicht wesentlich. Für die Herzinsuffizienz/hypertensive Herzkrankheit findet sich eine statistisch signifikante Risikoerhöhung um 1,6% pro 10 dB 24-Stunden-Dauerschallpegel (OR per 10 dB = 1,016) im Sinne einer linearen Exposition-Risikobeziehung (Abb. 6).

In diesem Teil des NORAH-Projekts ergab auch die aufwändige „Rekonstruktion“ historischer Lärmexpositionen für die Jahre 1996 bis 2010 deutliche Hinweise auf den Ursache/Wirkungs-Zusammenhang zwischen langjähriger Fluglärmbelastung und Herz-Kreislauf-Erkrankungen: Werden die statistischen Analysen eingeschränkt auf Fälle mit einer langjährig „konstanten“ Wohnadresse, so führte dies bei mehreren Krankheitsbildern zu tendenziell höheren Risikoschätzern, beispielsweise zeigten sich kontinuierlich zunehmende Risiken für die Herzinsuffizienz/hypertensive Herzkrankheit mit zunehmenden kumulativen Lärmjahren, die für das höchste Quartil der kumulativen 5 Lärmjahre vor dem Diagnosejahr statistische Signifikanz erreichten.

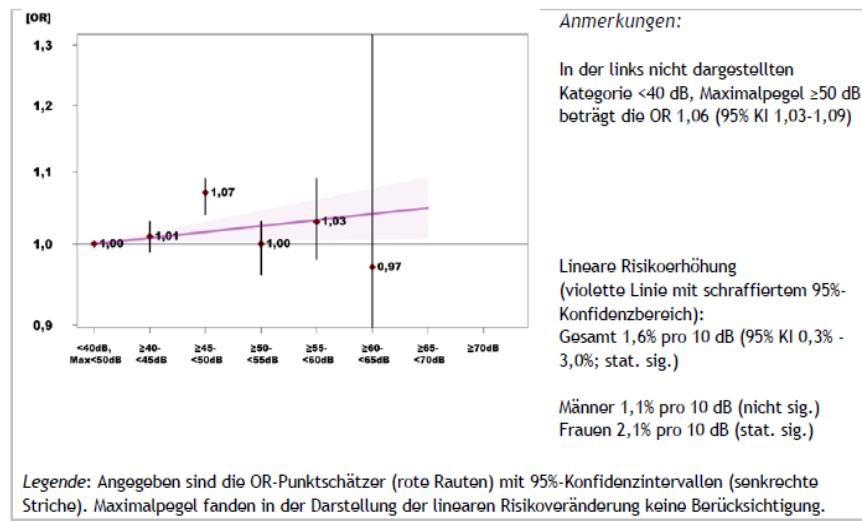


Abbildung 4-8: Fluglärm ( $L_{pAeq,24h}$ ) und Herzinsuffizienz-Risiko

Abb. 6 (aus Seidler et al. 2015, p. 250): Statistisch signifikanter linearer Anstieg des Herzinsuffizienz-Risikos mit zunehmendem 24-Stunden-Dauerschallpegel. Der beobachtete Abfall des Risikos in der Pegelklasse 60-65 dB fällt wegen der geringen Fallzahl und entsprechend hohem Konfidenzintervall statistisch kaum ins Gewicht.

**Zu Brustkrebs:** In der NORAH-Fallkontrollstudie zeigte sich kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen 24-Stunden-Fluglärmpegeln und Brustkrebsdiagnose bei Frauen. Nur für den Zeitraum 23 bis 5 Uhr konnte eine signifikante Risiko-Erhöhung bei Pegeln >55 dB festgestellt werden (OR = 2,98).

**Zu Depressionen:** Mit steigenden 24-Stunden-Fluglärmpegeln zeigt sich zunächst (ab <40 - 45 dB bis zur Pegelklasse 50 - <55 dB) ein Anstieg der Risikoschätzer für Depressionen; in höheren Pegelklassen sinken diese Werte wieder im Sinne einer umgekehrten „U“-Kurve (Abb.7). Für nächtlichen Fluglärm ergab sich bei einem Fluglärmpegel  $\geq 60$  dB sogar eine statistisch signifikante Risiko-Erniedrigung – allerdings ist diese Pegelklasse nachts noch schwächer besetzt als am Tage. Wird eine lineare Expositions-Risiko-Beziehung beim 24-Stunden-Pegel zugrunde gelegt (die allerdings den Expositions-Wirkungs-Verlauf nicht optimal beschreibt), dann findet sich pro 10 dB  $L_{pAeq,24h}$  eine statistisch signifikante Risikoerhöhung um 8,9%; bei Männern beträgt die Risikoerhöhung 8,6% und bei Frauen 9,2%. Die Risikoerhöhung in der Gesamtgruppe ist die höchste, die in der NORAH-Fallkontrollstudie gefunden wurde. Anzumerken ist, dass etwas schwächere, aber ebenso statistisch signifikante Risikoerhöhungen beim Straßenverkehr (4,1%) und beim Schienenverkehr (3,9%) gefunden wurden.

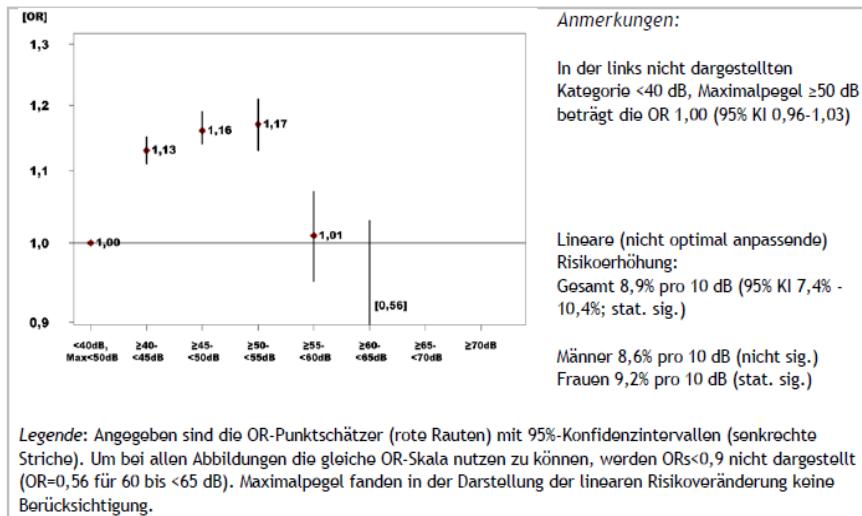


Abbildung 4-14: Fluglärm ( $L_{pAeq,24h}$ ) und Depressions-Risiko

Abb. 7 (aus Seidler et al., 2015, p.259): Zusammenhang zwischen Depressions-Risiko und 24-Stunden-Fluglärmpegel. Der Risiko-Abfall bei Pegeln  $>55$  dB verhindert wegen der dort geringen Fallzahlen nicht die statistische Signifikanz einer ansteigenden linearen statistischen Beziehung.

Die NORAH-Ergebnisse zu depressiven Erkrankungen durch Lärm – insbesondere Fluglärm – sind in zweifacher Hinsicht bemerkenswert: Erstens sind noch nie zuvor in der wissenschaftlichen Literatur so deutliche Auswirkungen von Umweltlärm auf ärztlich diagnostizierte psychische Störungen berichtet worden (zusammenfassend: van Kamp & Davies 2012). Zweitens bietet sich hier erstmals Gelegenheit, eine Theorie-Brücke zu sozialpsychologisch erhobenen Lärmwirkungen (z.B. Belästigung und Lebensqualität) zu suchen – was im NORAH-Projekt bisher nur sehr zögerlich geschah, weil jede Teilstudie bis zur Abgabe der Berichte primär mit den eigenen Aufgaben beschäftigt war. Da depressive Episoden vor allem dann auftreten, wenn Menschen längerfristig nicht wissen, wie sie sich aus einer (scheinbar oder tatsächlich) ausweglosen Situation befreien können, liegt es nahe, dass dieser erlebte Kontrollverlust mit geringer Lebensqualität und hoher Lärmbelästigung zu verbinden. Die Verbindung zwischen geringer Lebensqualität (einschließlich depressiver Tendenzen) mit Fluglärmbelästigung wird im NORAH-Projekt (Schreckenberg et al., 2015) gezeigt. Die Verbindung zwischen Lärmbelästigung und Depression wird in einer Teilstudie der Gutenberg Health Study gezeigt: Beutel et al. (2016) berichten, dass Depressions- und Angstscores sehr systematisch mit der Fluglärmbelästigung steigen. Was noch fehlt, ist eine Kausalanalyse des Zusammenhangs zwischen Fluglärm (als akustisch definiertem exogenem Faktor) und Belästigung, Lebensqualität und Depression (als Wirkungsvariablen).

Anmerkung: frühere Untersuchungen stellten signifikante Risiko-Erhöhungen erst bei sehr hohen Fluglärmpegeln fest. Dagegen stellte NORAH generell signifikante Risiko-Anstiege teilweise schon ab 45 dB  $L_{pAeq,24h}$  fest.

#### 4.1.3 Leq-basierte Kenngrößen und kognitive Entwicklung

Seit den 1990er Jahren werden die Auswirkungen lang anhaltender Fluglärmbelastung im Bereich großer Verkehrsflughäfen untersucht. Dabei zeigten sich bezüglich der Wirkungen auf Aufmerksamkeits- und Gedächtnisleistungen inkonsistente Befunde (zusammenfassend: Klatte et al., 2013). Hinsichtlich der Leseleistungen wurden jedoch weitgehend übereinstimmend negative Fluglärmwirkungen gefunden (zusammenfassend: Hygge & Kim, 2011).

Die „Kinderstudie“ des NORAH-Projekts (Klatte et al., 2014) untersuchte im Bereich des Flughafens Frankfurt den Zusammenhang zwischen Fluglärm und der geistigen Entwicklung und Lebensqualität von Kindern hinsichtlich mehrerer Fragestellungen, darunter die nach dem Zusammenhang zwischen Fluglärm und Lesefähigkeit bzw. Lesenlernen von Schulkindern. Es wurden 29 Schulen ausgewählt, die einem Fluglärmpegel von mindestens 40 dB L<sub>pAeq,06-22h</sub> ausgesetzt und so weit wie möglich soziodemografisch vergleichbar waren. Insgesamt 1.246 Kinder im Alter von 7-10 Jahren nahmen an den Untersuchungen in ihren Schulklassen teil. Weiterhin fanden Befragungen der Kinder, Eltern und Lehrer statt.

Unter den Leistungsmessungen seien hier v.a. der standardisierte und normierte Leseverständnistest für Erst- bis Sechstklässler, Tests zum Hörverstehen, zum phonologischen Kurzzeitgedächtnis und zur sprachlichen und nicht-sprachlichen Fähigkeiten genannt. Die Darbietung der auditiven Testitems (Silben, Wörter, Sätze) geschah über eine Funk-Kopfhöreranlage, die sicherstellte, dass alle Kinder diese Testitems störungsfrei hören konnten. Die Befragungen der Kinder und die Fragebögen der Eltern bezogen sich auf das schulische, körperliche und psychische Wohlbefinden sowie auf schulbezogene und wohnortbezogene Belästigung durch Lärm. Nicht-fluglärmbezogene Einflussfaktoren, insbesondere Sozialstatus, Migrationshintergrund und Deutschkenntnisse der Kinder sowie die Belastung durch andere Geräuschquellen (Straßen- und Schienenverkehr, Schalldämmung und Raumakustik in den Klassenräumen) wurden mit größtmöglicher Sorgfalt kontrolliert.

Als Hauptergebnis zeigten sich statistisch signifikante beeinträchtigende Effekte der Fluglärmpegel auf den Leseerwerb in einer linearen Expositions-Wirkungs-Beziehung. Eine Zunahme des Pegels um 10 dB geht mit einer Verringerung der Leseleistung um einen T-Wertpunkt (d. h. 1/10 der Standardabweichung) einher (Abb. 8). Dies entspricht einer Verzögerung in der Leseentwicklung um einen Monat. Weiterhin zeigten sich signifikante negative Effekte der Fluglärmpegel auf die Beurteilungen der Lebensqualität (körperliches und psychisches Wohlbefinden der Kinder nach Elternbeurteilung, körperliches Wohlbefinden und Schlafqualität nach Kinderbeurteilung).

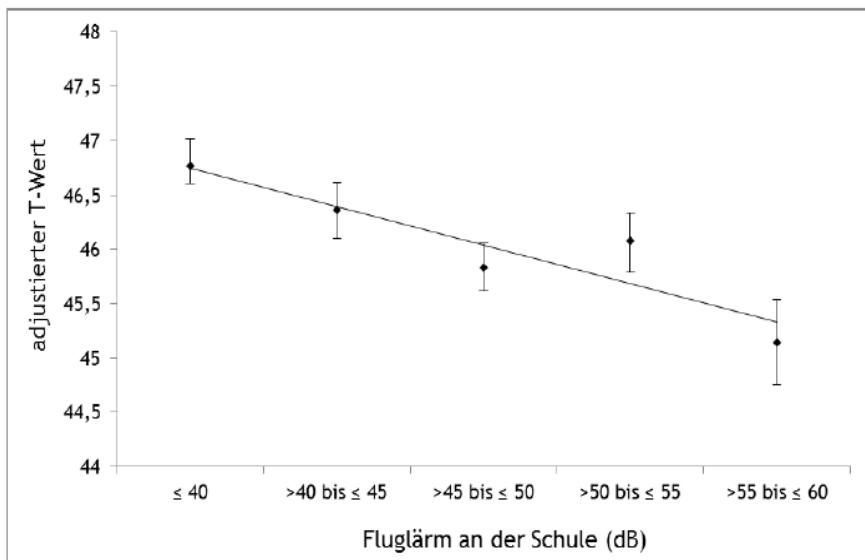


Abbildung 3-13: Exposition-Wirkungskurve „Gesamtleistung Lesetest“ (Gesamtgruppe): Adjustierte mittlere T-Werte der Leseleistung (adjustiert um die Kontrollvariablen im Endmodell) und 95% Konfidenzintervalle für 5-dB-Bänder des Fluglärmes an der Schule ( $L_{pA,eq,08-14}$ ).

Abb. 7 (aus Klatte et al., 2014, p. 137): Zusammenhang zwischen Fluglärmpegel  $L_{pA,eq,08-14h}$  an der Schule und der Gesamtleistung im Lesetest der Kinderstudie des NORAH-Projekts.

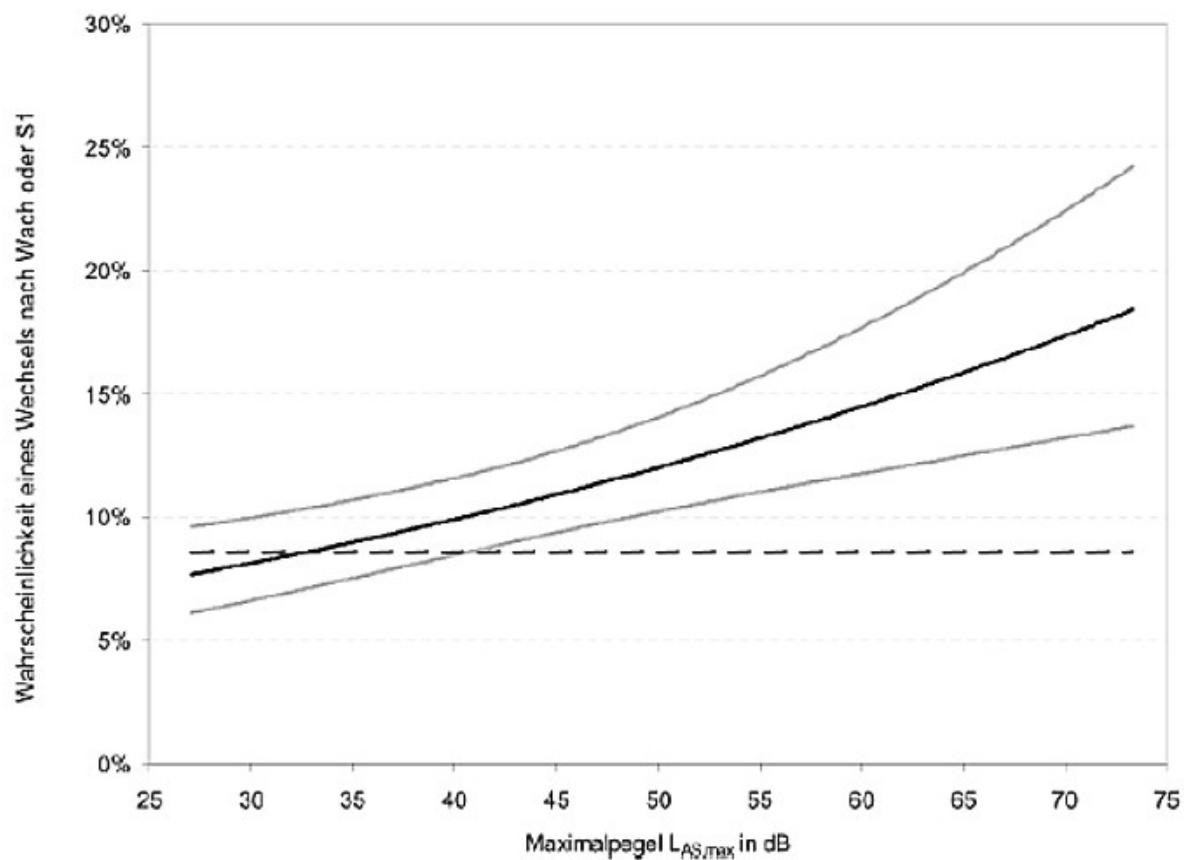
## 4.2 Maximalpegel-basierte Kenngrößen und Schlafstörungen bzw. Gesundheitsrisiken

### 4.2.1 Fluglärm-assozierte Schlafstörungen

Die lärmbezogene Schlafforschung benutzt seit längerer Zeit Maximalpegel von Einzelereignissen als Hauptkriterium zur Beschreibung der akustischen Belastung bei Schlafstörungen. Hauptgrund dafür ist, dass die Mikro- und Makrostruktur des Schlafes weniger vom Mittelungspegel als von der Pegelverlaufsstruktur und dem Maximalpegel einzelner Lärmereignisse abhängt - und daher auch für gesundheitliche Langzeitwirkungen relevant erscheint. Die erkannten Nachteile des Leq für die Vorhersage gesundheitlicher Lärmwirkungen können etwas entschärft werden, wenn die Beurteilungszeit verkürzt wird, wie das z.B. in der Schweizerischen Lärmschutzverordnung (Schweizerische Eidgenossenschaft, 1986) geschieht, in dem die nächtlichen Zeitperioden 22-23, 23-24 und 05-06 Uhr getrennt behandelt und Ein-Stunden-Leqs definiert werden.

Im Bereich der Schlafforschung sieht man Leq-basierte Kennwerte besonders kritisch: Guski et al 2012 (p.18) schreiben zum Zusammenhang zwischen Ereignishäufigkeit und Störung der Nachtruhe bzw. des Schlafs: „Mit zunehmend niedrigeren Einzelereignis-Pegeln (z.B. infolge lärmärmer Technik) verschlechtert sich nämlich tendenziell die Schutzwirkung eines Leq-basierten Schutzkriteriums, wenn die Bewegungszahlen „lärmreduzierter“ Flugzeuge in einer Weise ansteigen, bis eine energetische Kompensation erfolgt.“

Der Zusammenhang zwischen dem Fluglärm-Maximalpegeln und (physiologischen) Aufwachreaktionen wurde in Deutschland v.a. aus den DLR-Studien 2001-2002 im Umfeld des Köln/Bonner Flughafens bekannt (Basner et al. 2005). Mit 64 Untersuchungspersonen und 576 Untersuchungsnächten war die DLR-Studie die bis dahin größte Feldstudie zum Thema Nachtfluglärm und Schlaf, in der die aufwändige Methode der Polysomnographie eingesetzt wurde. Dabei kann die Struktur des Schlafes erfasst werden, insbesondere Zeitpunkte und Dauer der verschiedenen Schlafstadien „Wach, S1, S2, S3 und S4“. S1-S4 kennzeichnen die Schlafstadien, wobei zunehmende Höhe der Zahl zunehmende Schlaftiefe bedeutet. In Kombination mit der Aufzeichnung der Geräusche im Außenbereich der Wohnung und im Schlafräum kann die Tiefe des Schlafes ereigniskorreliert (d.h. hier bei einzelnen Überflügen) erhoben werden. Der Wechsel aus irgendeinem Schlafstadium in das Stadium „Wach“ wird in der wissenschaftlichen Literatur als „Aufwachreaktion“ (AWR) bezeichnet – diese Reaktion kann mehrfach in der Nacht geschehen und sollte nicht mit „erinnerbarem Aufwachen“ verwechselt werden. Sie tritt zwar auch spontan in der Nacht auf, jedoch kann die ereigniskorrelierte Untersuchungsmethode spontane von fluglärmbedingten Aufwachreaktionen unterscheiden. Basner et al. (2005, p. 111) bezeichnen die AWR als „die stärkste Ausprägung einer Aktivierung des Organismus im Schlaf. Dementsprechend groß sind die Folgen für die regenerative Funktion des Schlafs.“ In der Köln/Bonner Feldstudie zeigte sich ein statistisch hoch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel des Überflugs (am Ohr der Schlafenden) und der Wahrscheinlichkeit einer Aufwachreaktion im Sinne des Wechsels des Schlafstadiums nach „Wach“ oder „S1“ - diese Operationalisierung der AWR wurde gewählt, weil die Autoren davon ausgehen, dass das Schlafstadium „S1“ ebenso wenig zur Erholung beiträgt wie das Stadium „Wach“.



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

Abb. 8 (aus Basner et al., 2005, p. 113): Zusammenhang zwischen den Maximalpegeln einzelner Überflüge und der fluglärminduzierten Aufwachreaktion in der DLR-Feldstudie Köln/Bonn. In dieser Darstellung wurde die spontane Aufwachreaktion rechnerisch nicht berücksichtigt.

Wie Abb. 8 zeigt, fanden sich fluglärmbedingte Aufwachreaktionen schon ab Überflug-Maximalpegeln ( $L_{ASmax}$ ) von ca. 33 dB, sofern eine spontane AWR-Wahrscheinlichkeit von 8% berücksichtigt wird. Die Wahrscheinlichkeit der AWR steigt in dieser Untersuchung bis auf 18% bei Maximalpegeln von 73 dB (ca. 10% bei Berücksichtigung spontaner AWR). Zur Frage der Übertragbarkeit der Köln/Bonner Ergebnisse auf andere Flughäfen gibt es bisher nur eine einzige Untersuchung, die im Rahmen des NORAH-Projekts 2011 bis 2013 am Flughafen Frankfurt stattfand (Müller et al., 2015). Hier stellte sich heraus, dass die für den Flughafen Frankfurt 2012 (mit Kernruhezeit,  $N=41$ ) gefundene Kurve deutlich niedriger liegt als die für Köln/Bonn 2001-2002: bei  $L_{ASmax} = 33$  dB beträgt die fluglärmassoziierte AWR 5-6%, und bei 70 dB etwa 12%.

## 4.2.2 Zeitpunkte der stärksten Störungen des Schlafes

Für die gesundheitliche Bewertung von fluglärmbedingten AWR muss die **Verteilung der Flüge in der Nacht** (22 bis 06 Uhr nach deutscher Nacht-Definition) in Relation zur individuellen oder durchschnittlichen Schlafzeit der Betroffenen betrachtet werden.

Brink et al. (2005) haben Befragungsdaten der Schweizer Lärmstudie 2000 (an Erwachsenen >17 Jahre) in Kombination mit Schlafgewohnheiten von Kindern benutzt und durchschnittliche Wachheits- bzw. Schlafdichtefunktionen über die 24 Stunden eines Tages dargestellt (Abb. 9 = Abb. 13 aus Guski et al. 2012). Daraus folgt, dass etwa die Hälfte der mitteleuropäischen Bevölkerung im Durchschnitt um 7:00 Uhr aufsteht und gegen 23:00 Uhr zu Bett geht. „Der Einsatz von Fluglärm um 5:00 Uhr widerspricht nach diesen Daten den Schlafgewohnheiten von etwa 97% der Bevölkerung, der Einsatz um 6:00 Uhr widerspricht 85%, und der Einsatz um 7:00 Uhr immer noch 48%“ (Guski et al. 2012, p. 55).

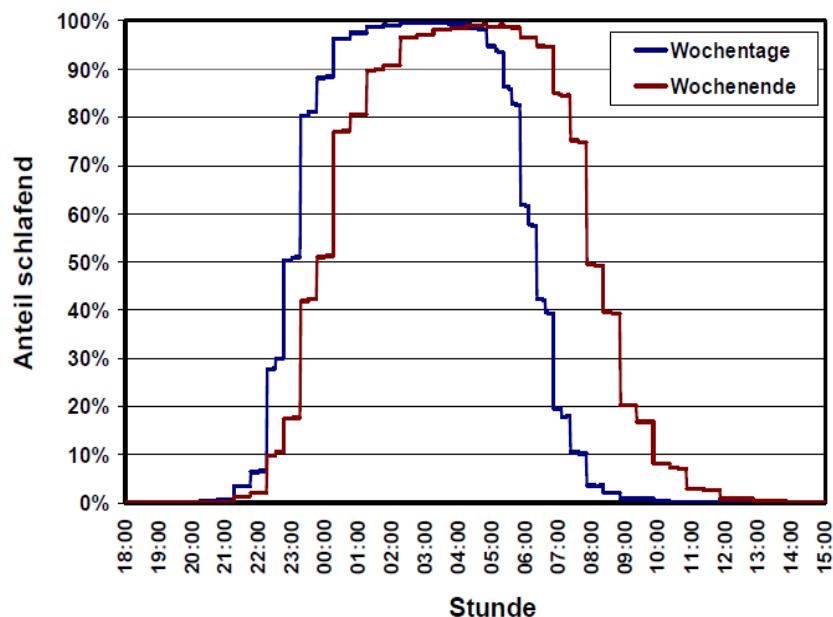


Abbildung 13: *Schlafender Anteil der Bevölkerung rund um den Flughafen Zürich an Wochentagen und Wochenenden als Funktion der Tageszeit (Daten aus der "Lärmstudie 2000", Befragungswelle 2001, siehe Brink et al. 2005, vgl. auch Brink et al. 2010, dort Fig. 4).*

Abb. 9 (Abb. 13 aus Guski et al., 2012): Verbale Angaben zu Bett- und Aufstehzeiten in der Schweiz und in Deutschland.

Die Wirkung des Lärms während der Schlafzeit hängt v.a. vom jeweiligen „Schlafdruck“ ab, d.h. von der jeweiligen Tiefe des Schlafes. Sie ist zwar je nach Chronotyp und der individuellen Belastung am Vortag unterschiedlich, jedoch kann vereinfachend gesagt werden, dass die Wahrscheinlichkeit, im Schlaf durch Geräusche gestört zu werden bzw. physiologische Aufwachreaktionen zu registrieren, im Verlauf der Schlafzeit mit zunehmender Nähe zu ihrem Ende zunimmt.

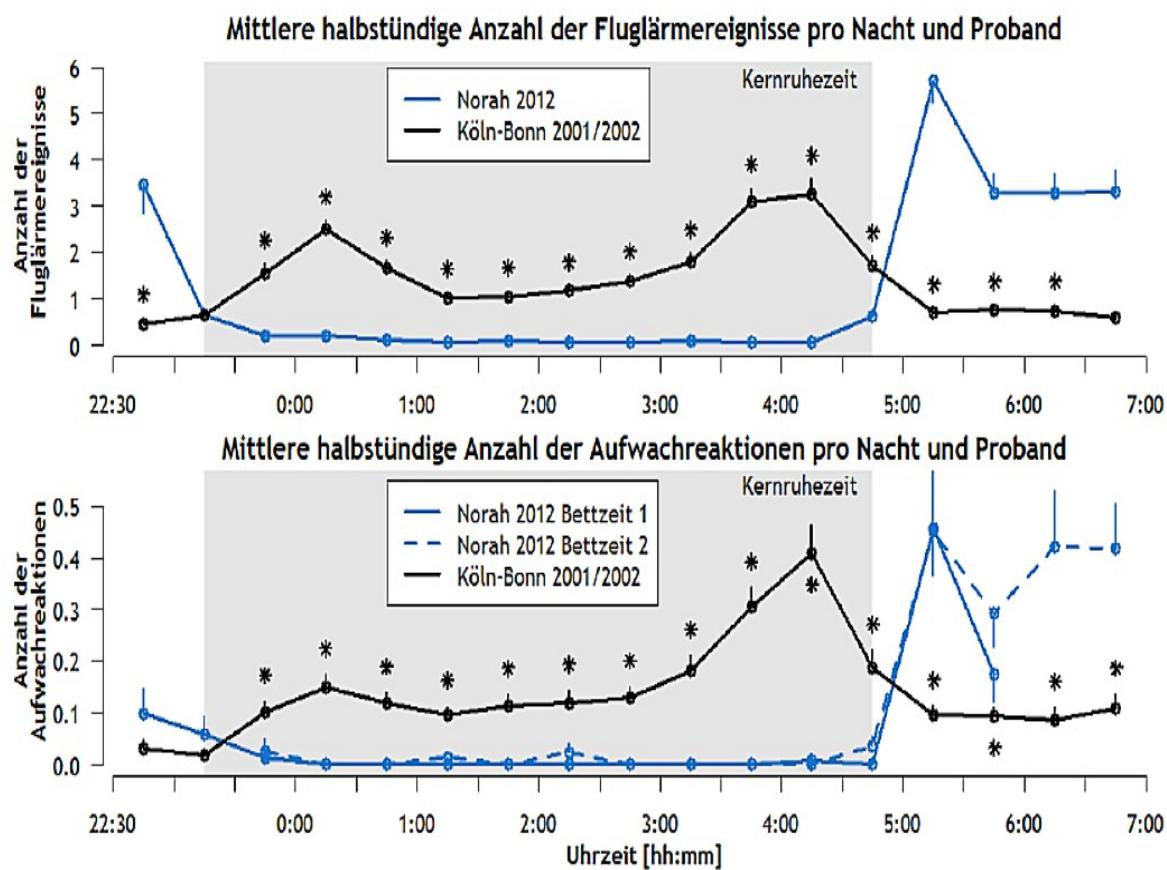


Abbildung 3-13: Nächtlicher Verlauf der mittleren Anzahl an Fluglärmereignissen (oberer Teil) und fluglärmassozierter Aufwachreaktionen (unterer Teil) in halbstündigen Intervallen pro Proband und Nacht. \* bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2011 und 2012, adjustiert für multiple Tests nach Holm. Die Fehlerbalken entsprechen einem Standardfehler.

Abb. 10 (aus Müller et al., 2015, p. 104): Verlauf von Fluglärmereignissen (oben) und Anzahl Aufwachreaktionen (unten) in der Köln/Bonner Studie (für insgesamt 64 Untersuchungspersonen) und in der NORAH-Schlafstudie (für insgesamt 79 Untersuchungspersonen).

Die schwarzen Linien in Abb. 10 zeigen, dass es am Flughafen Köln/Bonn (2001/2002) zwei nächtliche Verkehrsspitzen gab (etwa um 00:15 und zwischen 03 und 04 Uhr), und entsprechend stieg die Anzahl der AWR an, allerdings gegen Morgen stärker als in den ersten Nachtstunden. Der Anstieg am Morgen ist mit dem Nachlassen des sog. „Schlafdrucks“ in der zweiten Nachhälfte zu erklären. Zu diesem Zeitpunkt hat schon eine teilweise Erholung stattgefunden, die zwar noch nicht abgeschlossen ist, aber den Wechsel von tieferen zu flacheren Schlafstadien erleichtert; deshalb kommt es in den frühen Morgenstunden eher zu fluglärmbedingten AWR als in den ersten Nachtstunden. Um so stärker steigen die AWR beim plötzlichen Einsetzen von Fluglärm nach einer „Kernruhezeit“ am Flughafen Frankfurt ab 05:00 Uhr, wobei insbesondere solche Personen benachteiligt werden, die spät schlafen gehen und entsprechend später aufstehen (Bettzeitgruppe 2 in der NORAH-Schlafstudie: ab 23:00h bis 07:30h; dagegen Bettzeitgruppe 1: ab 22:00 bis 06:30h). Die „Spätschlafenden“ haben zwar den Vorteil, dass ihre Einschlafphase am Flughafen Frankfurt durch die Umsetzung der „Kernruhezeit“ nicht durch Fluglärm gestört wird, dafür den Nachteil, dass sie der Fluglärm in der morgendlichen Schlafphase trifft. Übertragen wir diese Ergebnisse auf den Flughafen

Düsseldorf mit seiner unübersichtlichen Nachtflugregelung und ca. 726 Flugbewegungen in der Nachtzeit des 3.Quartals 2015 (Flughafen Düsseldorf GmbH 2015), so wird die Bevölkerung rings um den Flughafen jetzt schon in ihrer Nachtruhe während der Nacht-Randzeiten (22-24 Uhr und 05-06 Uhr) durchschnittlich durch 8 Flüge pro Nacht gestört. Die vielen Ausnahmen von der Haupt-Beschränkungszeit 22-06 Uhr vor allem für die „Home-Base Carrier“ sowie die (im Vergleich zu Frankfurt) großzügigen Regelungen für die Off-Block-Zeit und Verspätungen haben dafür gesorgt, dass im Umfeld des Düsseldorfer Flughafens der Eindruck herrscht, es gäbe gar keine Betriebsbeschränkungen in den Nachrandzeiten, allenfalls eine „Kernruhezeit“ von 00 bis 05 Uhr. Eine weitere Erhöhung der Flugbewegungszahl wäre insbesondere in den Nachrandzeiten gesundheitlich sehr bedenklich.

#### 4.2.3 Maximalpegel und Erkrankungsrisiken

Der Einfluss von Maximalpegeln wurde auch im epidemiologischen Teil des NORAH-Projekts (Seidler et al. 2015) untersucht. Als wichtiges neues Ergebnis stellen die Autoren heraus, dass nächtliche Fluglärm-Spitzen von  $>50 \text{ dB } L_{pA\text{max},22-06\text{h}}$  (hier gebildet aus dem Mittelwert von 6 Pegel-Überschreitungshäufigkeiten) im Zusammenhang mit **Herz-Kreislauf-Erkrankungen** stehen: Beim Schlaganfall und bei der Herzinsuffizienz zeigten sich statistisch signifikant erhöhte Risikoschätzer bei nächtlichen Maximalpegeln über 50 dB auch dann, wenn der 24-Stunden-Pegel unter 40 dB liegt. Dieser Fund ist bevölkerungsbezogen besonders relevant, weil die Personengruppe mit Fluglärm-Dauerschallpegeln  $<40 \text{ dB}$  die größte unter den von Fluglärm betroffenen Personengruppen darstellt. Ein methodischer Aspekt dieses Befunds fordert geradezu zur Re-Analyse alter Studiendaten auf: Oft landet gerade die Gruppe mit Dauerschallpegeln  $<40 \text{ dB}$  in der sog. „Kontrollgruppe“, in der überhaupt keine Lärmwirkung erwartet wird. Wenn dennoch in dieser Gruppe Lärmwirkungen auftreten, werden sie mit traditionellen Untersuchungsmethoden nicht entdeckt.

#### 4.3 Ereignishäufigkeiten und Belästigung

Im Abschnitt 3.2 dieses Gutachtens wurde bereits darauf hingewiesen, dass aus Sicht der Belästigungsorschung wenig Anlass besteht, Leq-basierte akustische Kennwerte den Häufigkeits-basierten Kennwerten (z.B. NAT-Werten) vorzuziehen. Ein älteres Beispiel für den Zusammenhang zwischen der Anzahl von lauten Überflügen (mit Maximalpegeln  $>69 \text{ dBA}$ , hier NAT69 genannt) und dem Prozentsatz belästigter bzw. hoch belästiger Personen zeigt die Untersuchung von Rylander & Björkman (1997) an 3 kleineren schwedischen Flughäfen (8 Untersuchungsgebiete, N=513). In der Originalarbeit werden zwar die „Hochbelästigten“ definiert als jene Personen die die oberen beiden Punkte der 4-Punkt-Antwortskala benutzt haben (das entspricht HA =  $>49 \%$  der Antwortskala und wird heute eher als A (annoyed) angesehen), jedoch gibt es auch eine Tabelle mit Angaben zum Anteil von Personen, die die oberste Skalenstufe gewählt haben (HA =  $>74 \%$  der Antwortskala). Diese Definition der „hohen Belästigung“ ist eher mit der (bisher) international üblichen Definition von Miedema & Oudshoorn (2001; HA =  $>72 \%$  der Antwortskala) vergleichbar, und daraus wurde eine neue Abbildung zum Zusammenhang

zwischen Überflughäufigkeit (NAT69) und „hoher Belästigung“ erzeugt (s. Abb. 10).

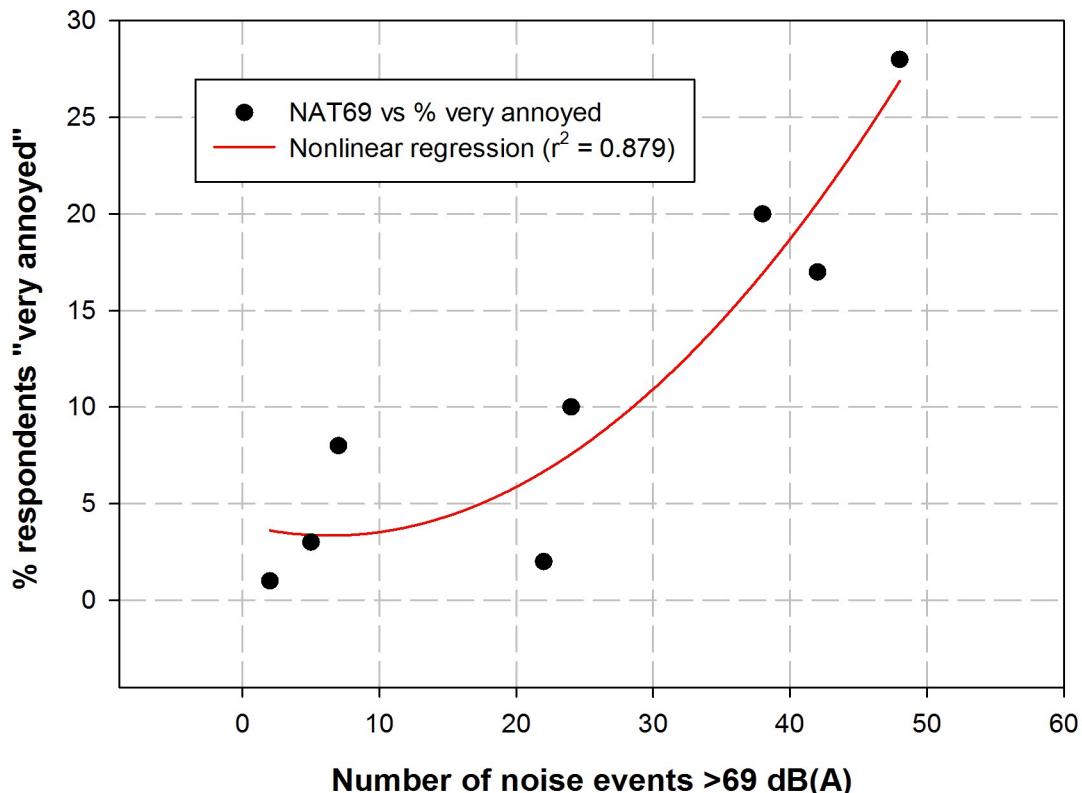


Abb. 11: Re-Analyse von Daten aus Rylander & Björkman (1979) zum Zusammenhang zwischen der Anzahl von Fluglärm-Ereignissen mit Pegeln > 69 dB(A) und dem Prozentsatz hoch belästigter Untersuchungspersonen. Die Grafik basiert auf den Tabellen 1 und 2 in Rylander & Björkman (1979).

In der Untersuchung von Rylander & Björkman (1997) zeigt sich ein deutlicher nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Anzahl von Flugereignissen >69 dB und dem Prozentsatz hoch belästigter Personen ( $r^2 = 0.879$ ), und dieser Zusammenhang ist stärker als der entsprechende Zusammenhang mit dem Leq-basierten Dauerschallpegel ( $r^2 = 0.485$ ; hier das schwedische FBN, das dem  $L_{den}$  sehr ähnelt). Die Determinationskoeffizienten beziehen sich allerdings nicht auf die 519 Rohwerte, sondern auf die 8 Untersuchungsgebiete, deshalb ist ihre absolute Höhe etwas irreführend. Unabhängig davon ist festzustellen, dass sich in dieser Untersuchung bei etwa 48 Überflügen mit Pegeln >69 dB(A) 25% der Betroffenen hoch belästigt fühlten.

Ein jüngeres Beispiel für den Zusammenhang zwischen Belästigung und der Flugbewegungszahl findet sich in der ANASE-Studie (MVA Consultancy 2007), die im Jahre 2005 in insgesamt 76 Untersuchungsgebieten in der Nähe von insgesamt 19 britischen Verkehrsflughäfen durchgeführt wurde. Da bei der Stichprobenziehung auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Maximalpegeln und Bewegungshäufigkeit geachtet wurde, hatten beide Arten von akustischen Kennwerten zumindest theoretisch gleich gute Chancen, mit den mittleren Belästigungswerten in den Untersuchungsgebieten zu kovariieren. In der Praxis erwies sich der statistische Zusammenhang zwischen Maximalpegeln und Belästigung als kleiner im Vergleich zum Zusammenhang zwischen Flugbewegungshäufigkeit und Belästigung. Ein Beispiel zeigt Abb. 12, in der auch die

Mittelwerte der älteren britischen ANIS-Studie (Brooker et al., 1985; 5 Flughäfen, Datenerhebung 1982) eingetragen sind.

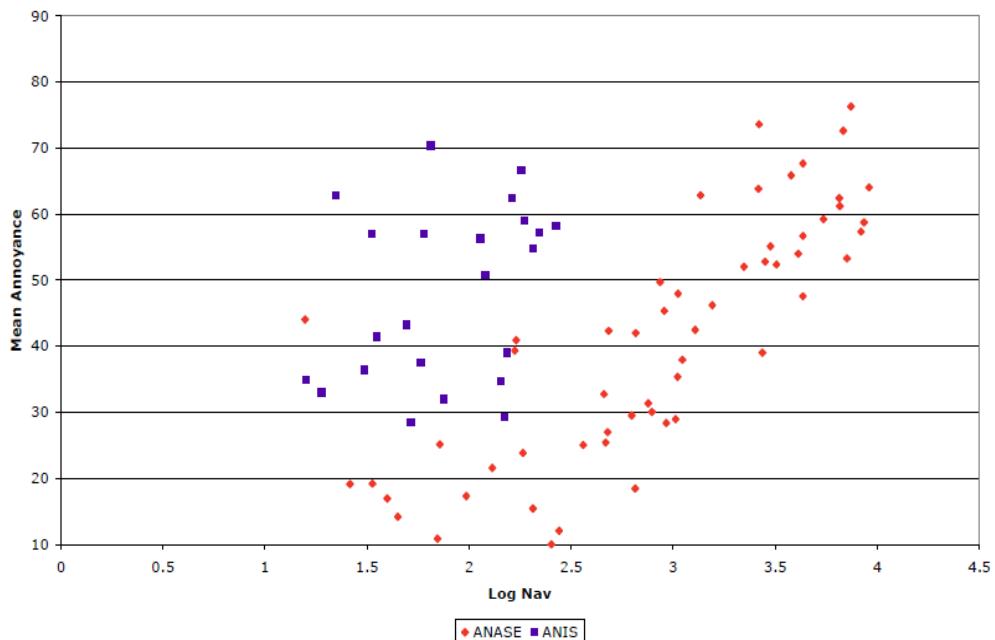


Figure 9.7 Mean Annoyance against Log Nav for ANIS and ANASE

Abb. 12 (aus MVA Consultancy, 2007, p. 9.13): Zusammenhang zwischen (logarithmierter) Flugbewegungszahl und mittlerer Belästigung in der älteren ANIS-Studie (blaue Punkte; Brooker et al., 1985) und der jüngeren ANASE-Studie (rote Punkte; MVA Consultancy, 2007).

Leider geben die ANASE-Autoren keine Korrelationskoeffizienten auf Individualdaten-Basis an, jedoch zeigt Abb. 12 einen deutlichen statistischen Zusammenhang zwischen der gemittelten Belästigung und der Anzahl der Flugbewegungen in der jüngeren Untersuchung, während ein ähnlicher Zusammenhang in der älteren Studie kaum sichtbar ist. Der Unterschied mag auch methodische Ursachen haben (z.B. deutlich weniger Flughäfen in der älteren Studie, dadurch geringere Varianz der Bewegungshäufigkeit), jedoch kommen die ANASE-Autoren nach verschiedenen statistischen Analysen zu dem Schluss, dass „die Beziehung zwischen berichteter Belästigung, Schallpegel und der Anzahl von Flugbewegungen in der Zeit nicht stabil ist. Das Gewicht der Anzahl von Flugbewegungen (in Relation zum Schallpegel) hat sich von 6 bei ANIS auf über 20 bei ANASE erhöht. Das bedeutet, dass sich der Beitrag der Flugbewegungszahl zur Belästigung beträchtlich erhöht hat.“ MVA Consultancy, 2007, p. 9.18; Übersetzung RG).

Im Rahmen des NORAH-Projekts wurden Anwohnerinnen und Anwohner der Flughäfen Frankfurt, Köln/Bonn, Stuttgart und Berlin-Schönefeld interviewt, und ihre individuelle akustische Belastung durch Fluglärm u.a. hinsichtlich der Dauerschallpegel und Anzahl der Überschreitungspegel (z.B. NAT55, NAT70) beschrieben. Bisher wurden die Belästigungswerte nur hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit Dauerschallpegeln ausführlich analysiert (vgl. Schreckenberg et al., 2015). Die auf Überschreitungspegel bezogenen Daten sollen erst in der näheren Zukunft ausführlich analysiert werden. Der Autor des vorliegenden Gutachtens hat eine erste Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Prozentsatz der individuellen Überflughäufigkeit mit Überschreitungspegeln von 55 dB am Tage (NAT55, 06-22h) einerseits und dem Prozentsatz der „Hochbelästigten“

andererseits für die Flughäfen Stuttgart und Frankfurt (hier nur aus dem Jahr 2013) durchgeführt. Der Flughafen Stuttgart ist mit insgesamt etwa 112.000 Flugbewegungen im Jahr 2012 zwar deutlich „kleiner“ als der Flughafen Düsseldorf (mit über 200.000 Flugbewegungen im Jahr 2015), jedoch gehört er neben Köln/Bonn zu den im NORAH-Projekt untersuchten „low rate change“ Flughäfen, d.h. es sind keine wesentlichen Einflüsse durch öffentliche Diskussionen über Ausbauvorhaben zu befürchten, und der Nachtflugbetrieb ist in Stuttgart ähnlich deutlich beschränkt wie in Düsseldorf.

Die Beziehung zwischen den % Hochbelästigten und der Häufigkeit von Flugbewegungen während des Tages (NAT55,06-22h) wurde im Stuttgarter NORAH-Datensatz analysiert. Die „Hochbelästigten“ sind im NORAH-Projekt als diejenigen Personen definiert, die während der ICBEN/ISO Standard-Belästigungsfrage auf der verbalen 5-Punkte Antwortskala mindestens die vierte Stufe (d.h. „ziemlich“ oder „extrem“) wählten. Diese Definition der Hochbelästigten entspricht der Empfehlung der ISO TS 15666 und führt zu etwas höheren Hochbelästigungswerten als die von Miedema & Oudshoorn (2001) verwendete Formel. NAT55 ist im NORAH-Projekt definiert als die Anzahl der Pegelüberschreitungen von  $L_{pAmax} > 55$  dB, berechnet als Mittelwert der zurückliegenden 12 Monate vor dem Interview. Das bedeutet, dass nur ein Teil aller Flugbewegungen über einem bestimmten Wohnort innerhalb des Untersuchungsgebiets durch dieses akustische Maß erfasst werden. Es wurden nur diejenigen Flugzeuggeräusche erfasst, die im Wohngebiet üblicherweise relativ klar als Luftverkehrsgeräusche wahrgenommen werden. Die statistischen Analysen wurden beschränkt auf den Tages-NAT (NAT55 06-22h), weil Belästigungsangaben in der Regel häufiger durch Lärmereignisse während des Tages determiniert werden als während der Nacht. Den statistischen Zusammenhang zwischen dem Anteil Hochbelästigter und NAT55,06-22h am Flughafen Stuttgart zeigt Abb. 12, berechnet in logarithmisch gleichen Klassenabständen der NAT-Werte zwischen 0 und dem in der Untersuchung erreichten Maximum bei 213,8. (Zur Erinnerung: Stuttgart hatte im Jahre 2012 insgesamt 112.000 Flugbewegungen, d.h. im Durchschnitt etwa 307 Bewegungen pro Tag. Davon erreichten nur etwa 70 % die NAT55-Schwelle im akustischen Datensatz des NORAH-Projekts.

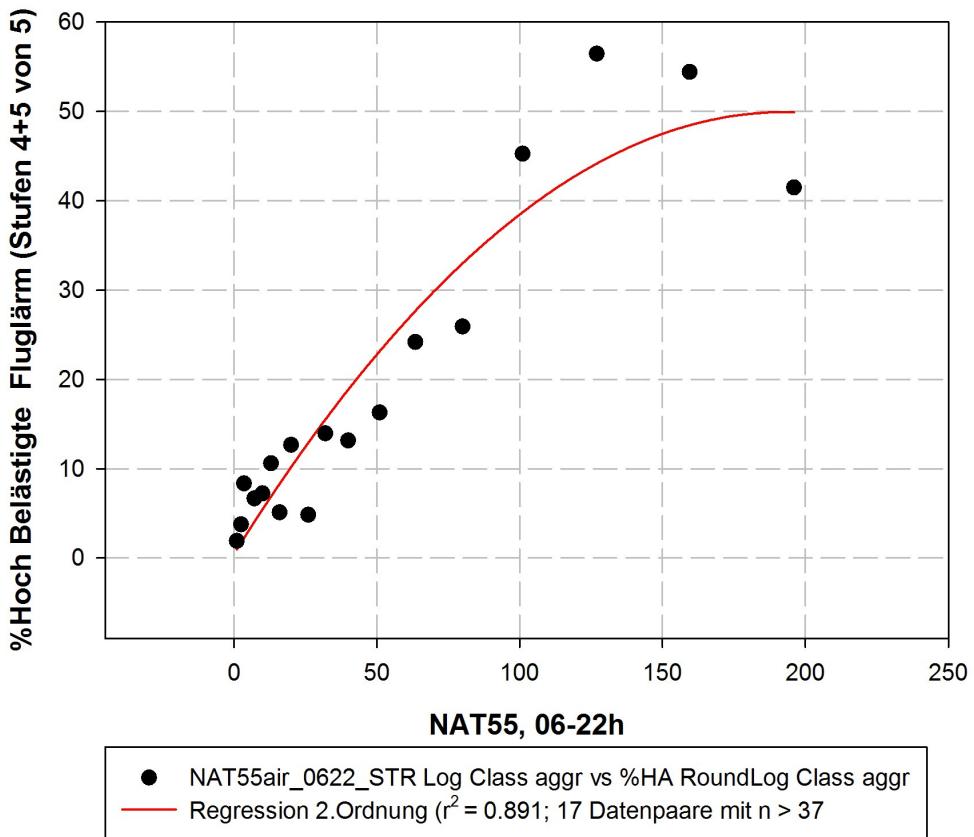


Abb. 13: Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Anzahl von täglichen Flugbewegungen mit Pegeln >55 dB während der Tageszeit (NAT55, 06-22h) und % Hochbelästigten in Daten des NORAH-Projekts, Querschnittsstudie Stuttgart, Erhebungsjahr 2013.

Abb. 13 zeigt eine hochsignifikante (quadratische) Beziehung mit einem relativ steilen Anstieg des Prozentsatzes Hochbelästigter zwischen 0 und etwa 130 Überflügen, der sich dann abflacht und bei ca. 190 Überflügen wieder etwas absinkt. Die gesundheitspolitisch wichtige Marke von 25% Hochbelästigten wird hier bei ca. 56 Flugbewegungen am Tag erreicht. Zum Vergleich sei erwähnt, dass die vergleichbare Analyse mit Daten der NORAH-Erhebung 2013 am Frankfurter Flughafen zu einem 25-Prozentwert der Hochbelästigten schon bei 29 Flugbewegungen am Tag führt. Das war zu erwarten, denn der Flughafen Frankfurt war 2013 immer noch in einer „high rate change“-Situation nach der Definition von Janssen & Guski (im Druck). In solchen Situationen ist mit höheren Belästigungswerten zu rechnen als in „low rate change“-Situationen.

Was bedeutet die Stuttgarter Kurve für Düsseldorf? Das Accon-Gutachten (Petz, 2016) zum Planfeststellungsverfahren gibt auf S. 16 im Referenzszenario für die 6 verkehrsreichsten Monate 114.990 Flugbewegungen tagsüber an, das sind 630 Flugbewegungen pro Tag; im Prognoseszenario werden 131.004 Flugbewegungen angegeben, also 718 Flugbewegungen pro Tag. Wenn wir davon ausgehen, dass – ähnlich wie bei den NORAH-Daten für Stuttgart – nur 70% aller Flugbewegungen im NAT55 (06-22h) reflektiert werden, wären das pro Tag 441 Bewegungen mit Maximalpegeln >55 dB im Referenz- und 502 entsprechende Bewegungen im Prognoseszenario. Bei Übertragung der Stuttgarter Belästigungsergebnisse auf den Flughafen Düsseldorf liegen diese Verkehrszahlen zwar außerhalb des Stuttgarter

Verkehrsvolumens, aber in jedem Fall deutlich über jenen, die statistisch mit 25% Hochbelästigten verbunden sind. Rechnerisch ergäbe sich eine Hochbelästigten-Rate von über 50% in beiden Düsseldorfer Szenarien. Diese Raten sind im Hinblick auf die Gesundheit der Anwohnerinnen und Anwohner schon heute zu erwarten und eine weitere Steigerung keineswegs vertretbar.

## **4.4 Kann man sich an Lärm gewöhnen?**

In der gesundheitspolitischen Diskussion wird gelegentlich die Meinung vertreten, dass sich die von Lärm betroffenen Menschen an Lärm gewöhnen können. Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es darauf jedoch keine einfache Antwort, weil sie sowohl von der Art der betrachteten Lärmwirkung abhängt als auch von der Art der Untersuchung. Aber die Antwort-Tendenz ist eher negativ:

### **4.4.1 Labor- und Feld-Untersuchungen zu Schlafstörungen durch Lärm**

Im Labor zeigen sich öfter nachlassende akute Reaktionen bei Wiederholung der Lärmbelastung, so beispielsweise in Labor-Schlafuntersuchungen während einer Nacht (vgl. z.B. Basner et al., 2008; Muzet, 2007) und im Verlauf von mehreren Nächten (Basner et al., 2011). Solche Untersuchungen können aber keine Auskunft über langfristige Effekte bei Lärmgefährdeten in ihren Wohngebieten geben, dazu braucht es Feldstudien – bei der allerdings die Kontrolle der akustischen Belastung nicht in der Hand der Forschenden liegt. Einen Zwischenschritt zwischen Labor und Feld vollzogen Brink et al. (2008) durch eine experimentelle Feldstudie mit 8-16 frühmorgendlichen Überflug-Geräuschen innerhalb von 90 min. Messungen der Schlafqualität durch Polysomnografie und der Motilität durch Sensoren an Bettpfosten zeigten eine Tendenz zur Abnahme der Reaktionen von einem Geräusch zum nächsten, aber keine vollständige Gewöhnung.

Pearsons et al. (1995) stellten in einer Übersicht von 21 Schlafstudien fest, dass es keine gemeinsame Expositions-Wirkungskurve aus Labor- und Feldstudien gibt, weil die Art und Höhe der Schlafstörungen im Feld (d.h. in den Schlafräumen von Anwohnerinnen und Anwohnern von Verkehrslärmquellen) und im Labor sich stark unterscheiden. Das DLR begann daraufhin mit einer großen Felduntersuchung, die 2004 veröffentlicht wurde (Basner et al., 2004). Hier wurde festgestellt, dass die physiologischen Aufwachreaktionen (s.o. Abschnitt 4.2) im Feld zwar deutlich geringer ausfallen als im Labor, jedoch keine vollständige Gewöhnung stattfindet. Guski et al. (2012, p25) schreiben dazu: „Die Anpassung ist jedoch nicht komplett, d.h. auch nach langjähriger Exposition können immer noch Reaktionen auf den Verkehrslärm im Feld registriert werden. Das trifft insbesondere für lärmbedingte Aktivierungen des vegetativen Nervensystems zu (z.B. Herzrasen, Blutdruckanstieg), für die im Vergleich z.B. zum Aufwachen geringere Gewöhnungseffekte gezeigt wurden (Basner, Müller & Elmenhorst, 2011; Buxton et al., 2012b). Zudem ist wenig bekannt über interindividuelle Unterschiede in der Fähigkeit, sich dem Verkehrslärm anzupassen.“

#### 4.4.2 Reaktionen der Bevölkerung auf anhaltenden Fluglärm

Die erhöhte Belästigung durch Fluglärm heute im Vergleich zu EU-Standardkurve (s.o., Abb.1) sowie epidemiologische Untersuchungen über Langzeit-Wirkungen bei Flughafen-Anrainern, und auch die anhaltenden Protestveranstaltungen im Umkreis des Frankfurter Flughafens sprechen eine andere Sprache:

Wie in Abschnitt 4.1.2 bereits dargestellt, steigen die Erkrankungsrisiken mit zunehmender Wohndauer unter Fluglärm, auch bei rechnerischer Berücksichtigung des Lebensalters (vgl. Huss et al. 2010), wie auch bei Analyse der „kumulativen Lärmjahre“ unter Fluglärm (Seidler et al. 2015). Selbst wenn einige Menschen meinen sollten, sie könnten sich an den alltäglichen Lärm gewöhnen – ihr Körper tut das ganz offensichtlich nicht.

Die seit Jahren anhaltenden Proteste am Frankfurter Flughafen sind sicher kein typisches Beispiel für die Reaktionen der Bevölkerung auf anhaltenden Fluglärm; hier spielen lokale Faktoren, wie die anhaltenden Ausbaupläne auf der Seite des Flughafens und gewachsene Protestkultur auf der Seite der Betroffenen eine gewichtige Rolle.

Andererseits müssen auch generelle soziale Veränderungen in der bundesdeutschen Bevölkerung berücksichtigt werden, wie z.B. der Trend zur Selbstaufmerksamkeit und Selbstoptimierung der Deutschen (vgl. Zweck et al., 2015), der im Rahmen des Foresight-Programms des Bundesministeriums für Bildung und Forschung festgestellt wurde. Er lässt erwarten, dass die deutsche Bevölkerung immer weniger geneigt ist, Belästigungen und gesundheitliche Risiken durch Umweltlärm hinzunehmen. Das ist auch für die Lärm betroffenen am Flughafen Düsseldorf anzunehmen.

### 5. Prognose der Lärmwirkungen bei Bestands- und Änderungsflughäfen

#### 5.1. Wie können Bestands- und Änderungsflughäfen definiert werden?

Das deutsche Fluglärmgesetz von 2007 unterscheidet zwischen „bestehenden“ und „neuen“ bzw. „wesentlich baulich erweiterten“ Flugplätzen, legt aber auch für bestehende Flughäfen in §4 Abs. 5 fest, dass der Lärmschutzbereich neu festzusetzen ist, „wenn eine Änderung in der Anlage oder im Betrieb des Flugplatzes zu einer wesentlichen Veränderung der Lärm belastung in der Umgebung des Flugplatzes führen wird. Eine Veränderung der Lärm belastung ist insbesondere dann als wesentlich anzusehen, wenn sich die Höhe des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{Aeq,Tag}$  an der Grenze der Tag-Schutzzone 1 oder des äquivalenten Dauerschallpegels  $L_{Aeq,Nacht}$  an der Grenze der Nacht-Schutzzone um mindestens 2 dB(A) ändert.“ Diese Orientierung an Dauerschallpegeln ist willkürlich und hat mit der Wirkung von Änderungen im Betrieb eines Flughafens auf die Wohnbevölkerung wenig zu tun.

Raw & Griffiths (1985) haben in eine Re-Analyse von Daten einer Fluglärm-Untersuchung von Fidell et al. (1981) festgestellt, dass die wenige Tage vor und im Abstand von 11 bis 82 Tagen nach der baulichen Änderung erhobenen mittleren Belästigungswerte von Flughafen-Anrainern zwar generell der Richtung und dem Ausmaß der Dauerschallpegel-Änderung folgen, jedoch darüber hinaus ein „Change-Effekt“ diagnostiziert werden kann,

der etwa 50% größer ist, als auf Grund der Expositions/Wirkungskurve für nicht-geänderte Flughäfen zu erwarten wäre. Brown & van Kamp (2009) sprechen in diesem Zusammenhang von einer „Überschuss-Reaktion“: Die Belästigungsichten sind bei einer Erhöhung der akustischen Belastung durch eine bauliche Änderung zunächst deutlich höher, und bei einer Verringerung der akustischen Belastung zunächst deutlich niedriger, als auf Grund der Expositions/Wirkungsbeziehungen für nicht-geänderte Situationen erwartet werden kann.

In Bezug auf die Belästigung der Bevölkerung an Schienen- und Straßenverkehrswege haben Lambert et al. (1998) einen sog. „Infrastruktur-Effekt“ diagnostiziert: Anwohnerinnen und Anwohner, die schon vor der baulichen Installation einer neuen Straße oder Bahnlinie dort wohnten und innerhalb von 5 Jahren nach dieser Änderung sozialpsychologisch untersucht wurden, zeigten bei vergleichbaren Dauerschallpegeln signifikant höhere Belästigungswerte als Personen, die in Untersuchungsgebieten wohnten, die mehr als 10 Jahre keine bauliche Änderung erlebten.

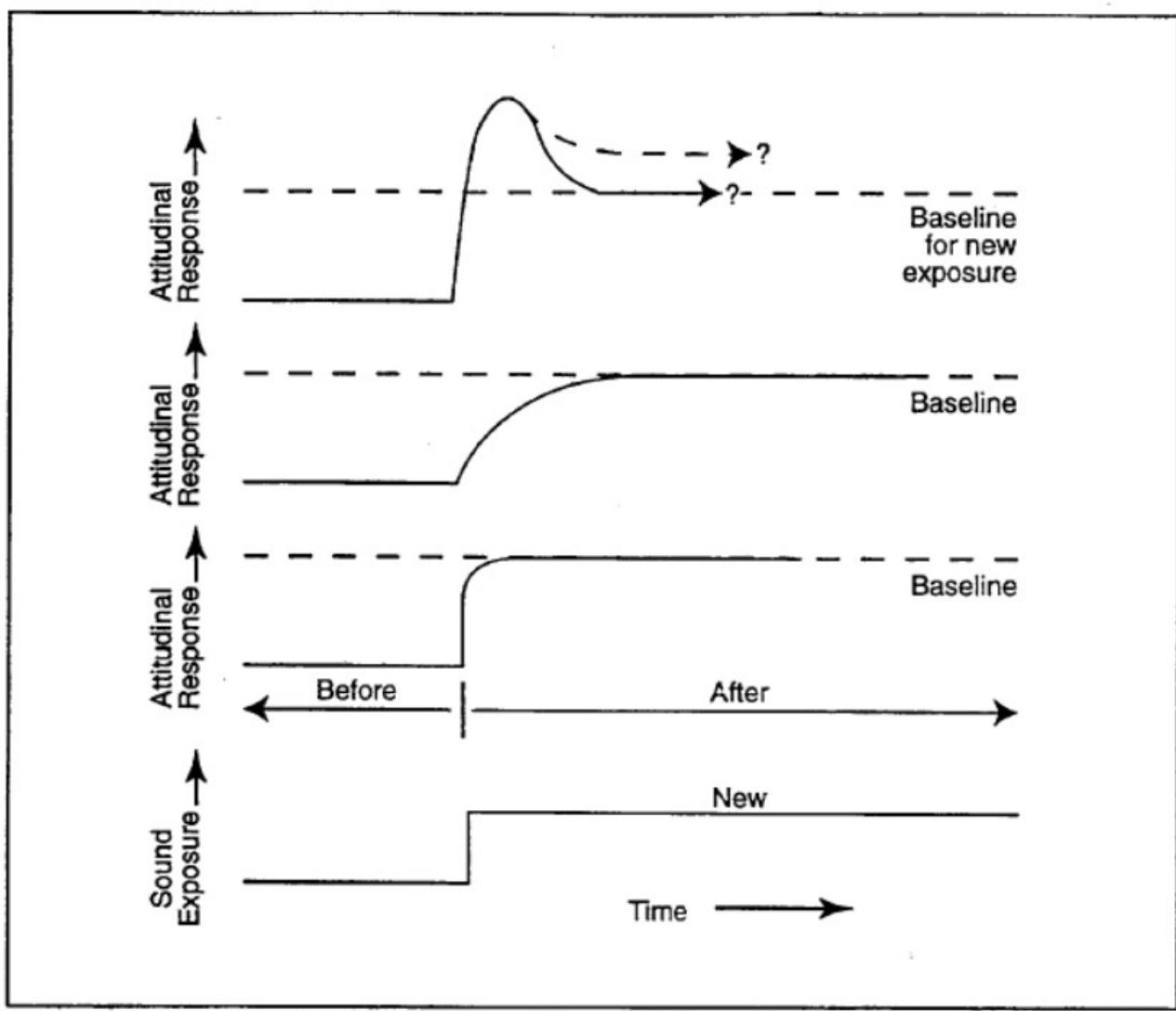
Horonjeff & Robert (1997) haben in Bezug auf Flughafen-Änderungen darauf hingewiesen, dass der Flugbetrieb auch ohne gezielte Änderungen von Tag zu Tag und je nach Saison schwanken kann und somit langfristige Änderungen von den Betroffenen erst dann entdeckt werden können, wenn die Änderungen signifikant und dauerhaft die ohnehin bestehenden Schwankungen überschreiten.

Janssen & Guski (im Druck) gehen bei ihrer Änderungsdefinition von der Wirkungsseite aus. Sie stellen zunächst fest, dass sich die systematisch per Befragung erhobenen Belästigungswerte an Flughäfen schon dann ändern, wenn der Flughafenbetreiber nur ankündigt, den Flughafen erweitern zu wollen. Bei einer Erweiterung – und sei es nur die Vergrößerung eines bestehenden Passagier-Terminals – gehen die Anrainer in der Regel davon aus, dass die Flugbewegungszahlen steigen. Da sich die Flugbewegungszahlen an den meisten Verkehrsflughäfen (zumindest bis 2009) von Jahr zu Jahr auch ohne bauliche Änderungen um einige Prozentpunkte erhöhen bzw. erhöht haben, schlagen die Autoren vor, zwischen Flughäfen mit geringerer Änderungsrate (low rate change, LRC) und solchen mit hoher Änderungsrate (high rate change, HRC) der Flugbewegungen zu unterscheiden. Als Flughäfen mit geringer Änderungsrate werden solche Flughäfen definiert, die weder eine veröffentlichte Planung zur abrupten und langfristigen Erhöhung der Flugbewegungszahl innerhalb der nächsten 3 Jahre nach Veröffentlichung, noch eine realisierte abrupte Änderung der Flugbewegungszahlen in den vergangenen 3 Jahren aufweisen. Flughäfen mit hoher Änderungsrate werden definiert entweder durch die Veröffentlichung der Planung zur abrupten und langfristigen Erhöhung der Flugbewegungszahlen oder durch die Durchführung einer baulichen oder betrieblichen Änderung, die eine signifikante Abweichung von dem an diesem Flughafen beobachtbaren Trend der Flugbewegungen über die vergangenen 5 Jahre zur Folge hatten.

Nach dieser Definition ist der Flughafen Düsseldorf seit Veröffentlichung der Pläne zur Erhöhung der Flugbewegungszahlen ein Flughafen mit hoher Änderungsrate – auch wenn die Änderung noch nicht durchgeführt wurde.

## 5.2. Was sind typische Reaktionen auf hohe Lärm-Änderungsraten?

Die Erforschung der Auswirkungen von Änderungen beim Verkehrslärm ist noch nicht sehr weit gediehen. Sie ist auch methodisch aufwändiger als die übliche Querschnittsstudie mit einmaliger Erhebung bestimmter Lärmwirkungen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Änderungen im erlebten Verkehrslärm auf sehr unterschiedliche Weise erreicht werden können – im Fall des Fluglärms durch Änderung der Flotten-Zusammensetzung, Veränderung der Flugbewegungszahlen generell, Veränderung der Flugbewegungszahlen zu bestimmten Zeitpunkten, Verlegung von Flugrouten und weitere betriebliche Maßnahmen. Insofern ist es schwierig, Ergebnisse aus unterschiedlichen Untersuchungen miteinander zu vergleichen.



**Figure 2-4. Potential Annoyance Chronologies Resulting from Rapid Noise Exposure Increase**

Abb. 14 (Figure 2-4 aus Horonjeff & Robert; 1997): Modell der Belästigungs-Entwicklung vor, während und nach einem dauerhaften Lärmbelastungs-Anstieg mit hoher Änderungsrate.

Horonjeff & Robert (1997) haben die ersten systematischen Änderungs-Untersuchungen zu Verkehrslärm in einem Modell der Belästigungs-Änderung zusammengefasst (vgl. Abb.

14). Danach kommt es oft zu einer spezifischen „Änderungs-Reaktion“: Das Ausmaß der Belästigung steigt bei Anwohnerinnen und Anwohner einer anhaltend und abrupt (d.h. mit hoher Änderungsrate) in Richtung auf höhere Lärmbelastung geänderten Maßnahme schon vor der physikalischen Durchführung der Maßnahme steil an, hält sich nach Durchführung der Maßnahme eine Zeit lang auf sehr hohem Niveau und fällt dann wieder etwas ab – wobei offen bleibt, ob jemals das Ausgangsniveau der Belästigung wieder erreicht wird. Es sei angemerkt, dass das Modell auch analog für den Fall der abrupten Änderung in Richtung auf Minderung der Belastung gilt: Auch hier werden zumindest bei Einführung der Maßnahme Änderungsreaktionen verzeichnet (engl.: „excess responses“ oder „change responses“, im Deutschen teilweise auch „Überschuss-Reaktionen“ genannt). In diesem Fall sind die Belästigungsichten zunächst deutlich geringer, als es durch die Pegelminderung allein vorhergesagt werden kann.

Die wenigen Befunde zur Belästigungswirkung von Änderungen in der Fluglärmexposition (u.a. Fidell et al., 2002; Breugelmans et al., 2007; Brink, Wirth, Thomann et al., 2008) sind zumindest mit dem Modell von Horonjeff & Robert (1997) insofern kompatibel, als hier jeweils eine „übermäßige“ Reaktion diagnostiziert wurde, die kaum durch Expositionskurven bei niedriger Änderungsrate vorhergesagt werden kann. Im Belästigungsteil der NORAH-Studie (Schreckenberg et al. 2015) konnte teilweise ein Zusammenhang zwischen der Höhe der relativen Pegeländerung nach der Betriebsänderung und der Höhe der Änderungsreaktion am Flughafen Frankfurt (2011-2012) festgestellt werden.

### **5.3. Wie lange halten „Änderungsreaktionen“ an?**

Aus dem Bereich des Autolärms gibt es Hinweise darauf, dass Änderungsreaktionen teilweise noch 2-9 Jahre nach der Änderung der Infrastruktur anhalten (vgl. Griffiths & Raw 1989; Kastka et al., 1995). Brown & Van Kamp (2009a, p. 3018) schreiben sogar: „Further, there appears to be little, if any, adaptation of this excess response with time.“

Solche Ergebnisse sind im Bereich des Fluglärm nicht zu finden. Das liegt überwiegend daran, dass es augenscheinlich noch keine Fluglärm-Untersuchung gibt, die Messwiederholungen an Fluglärm-Betroffenen über zwei Jahre hinaus fortgeführt hat. Hinzu kommt, dass der Flugbetrieb auch an Flughäfen mit geringer Änderungsrate Schwankungen unterliegt, die sich dem menschlichen Gedächtnis entziehen. Aus den wenigen Untersuchungen zu Fluglärm-Änderungen (s.o.) lässt sich der Schluss ziehen, dass ein Änderungseffekt Monate lang anhalten kann und noch zwei Jahre nach ausbaubedingter Belastungsänderung nachweisbar ist. Über zeitlich darüber hinaus gehende Effekte ist im Fluglärmreich nichts bekannt, da in den vorliegenden Untersuchungen dazu kein längerer Zeitraum betrachtet wurde.

Die NORAH-Panelstudie wurde auch nur über 3 Jahre am Frankfurter Flughafen durchgeführt. Hier zeigte sich zwar ein kleiner Änderungseffekt im ersten Jahr (2012) nach Eröffnung der NW-Landebahn (2011), der in seiner Höhe teilweise mit der Höhe der Belastungsänderung korrespondierte und im Jahr 2013 etwas zurückging, ohne das Niveau von 2011 wieder zu erreichen. Allerdings ist die Phase der hohen Änderungsrate nach der Definition von Janssen & Guski (im Druck) in Frankfurt noch nicht zu Ende, und es ist fraglich, ob sie an diesem Flughafen jemals zu Ende sein wird.

## **5.4. Können „Änderungsreaktionen“ prognostiziert werden?**

Guski (2004) und Brown & Van Kamp (2008) haben darauf hingewiesen, dass die Prognose der Bevölkerungsbelästigung in Änderungssituationen nicht auf der Grundlage von Expositionen/Wirkungsbeziehungen in „Bestandssituationen“ geleistet werden kann, weil die geplante oder durchgeführte Änderung selbst auf die Belästigung wirkt, d.h. allenfalls aus der Kombination von Wirkungs-Schätzungen aus Bestandssituationen plus Schätzungen der Höhe der Änderungsreaktion geleistet werden könnte. Hinzu kommt beim Fluglärm, das sich die Expositionen/Wirkungsbeziehungen für die Belästigung der Bevölkerung im Laufe der Jahre verändert haben (4.1.1), und wenn dieser Trend anhält, müsste eine Prognose zusätzlich den zeitlichen Trend der Belästigung berücksichtigen.

Daraus folgt, dass eine Prognose der Belästigungswirkungen an sog. „Bestandsflughäfen“ (d.h. Flughäfen mit geringer Änderungsrate) auf der Basis von Expositionen/Wirkungsbeziehungen aus Untersuchungen an „Bestandsflughäfen“ möglich ist, wenn der zeitliche Trend der Belästigung berücksichtigt wird. Dagegen erfordert die Prognose der Belästigungswirkung in Änderungssituationen eine zusätzliche Berücksichtigung des Änderungseffekts, über dessen Höhe und Dauer jedoch zur Zeit keine verlässlichen Angaben gemacht werden können – sicher ist zur Zeit nur, dass die Höhe des Änderungseffekts teilweise mit der Höhe der Belastungsänderung korrespondiert.

## **6. Können Belästigungsdaten zur Prognose von medizinisch erfassbaren Gesundheitsrisiken dienen?**

Die auffälligsten Effekte des Fluglärmes zeigen sich im Bereich der systematisch erhobenen Belästigung der von Fluglärm betroffenen Bevölkerung. Hier gibt es relativ klare und monotone Expositionen-Wirkungsbeziehungen, die eine deutliche Zunahme der Belästigung mit zunehmenden Dauerschallpegeln und zunehmender Anzahl von Flugbewegungen zeigen (vgl. 4.1 und 4.3). Obwohl die starke (oder erhebliche) Belästigung sowohl bei der Weltgesundheitsorganisation (WHO, z.B. 2011) als auch im deutschen Bundes-Immissionschutzgesetz (BlmSchG, 2011, s. §3) als schädlich für Menschen angesehen wird, neigt unsere Gesellschaft oft dazu, medizinisch erfassbare Gesundheitseffekte ernster zu nehmen als starke Belästigungen. Eingriffe in die körperliche Gesundheit werden als Gefährdung betrachtet, erhebliche Belästigungen werden eher mit „erheblichen Nachteilen“ gleichgesetzt.

Medizinisch erfassbare Gesundheits- und Erkrankungsrisiken auf Grund von Fluglärm sind allerdings seltener untersucht und zudem wesentlich geringer ausgeprägt bzw. noch stärker durch individuelle Faktoren (wie z.B. Bewegungsmangel, Sozialstatus und Vorbelastungen) beeinflusst als die Fluglärmbelästigung. Angesichts der wenig befriedigenden Datenlage in Bezug auf Erkrankungsrisiken und ihren Zusammenhang mit Fluglärm ist zu fragen, ob die relativ gute Datenlage der Belästigung genutzt werden kann, um Prognosen für Erkrankungsrisiken zu ermöglichen, denen ja in unserer Gesellschaft und in unserem Rechtssystem meist eine höhere gesundheitliche Relevanz zugesprochen wird als erheblichen bzw. starken Belästigungen.

Darauf gibt es bisher keine eindeutige Antwort, weil die statistischen Beziehungen zwischen Belästigung und Erkrankungsrisiko selten untersucht wurden. Immerhin gibt es

die Untersuchung von Beutel et al. (2016), die eine Querschnittsstudie an 14.635 Teilnehmerinnen und Teilnehmern der „Gutenberg Health Study (GHS)“ durchführten. Die GHS ist eine bevölkerungsbezogene prospektive Kohorten-Untersuchung im Rhein/Main-Gebiet mit Personen im Alter von 35 bis 74 Jahren. Bei einer Response-Rate von 60,3% beantworteten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer einen Fragebogen zur Belästigung innerhalb und außerhalb des Hauses, sowie zur Belästigung durch verschiedene Lärmquellen am Tage und in der Nacht, wobei Frageformulierung und Antwortformat näherungsweise dem ICBEN/ISO-Standard entsprachen. Gleichzeitig wurde u.a. das Ausmaß der Depression mit Hilfe des „Patient Health Questionnaire“ (PHQ-9) erhoben. In diesem Fragebogen wird die Häufigkeit des Auftretens von 9 diagnostischen Kriterien für Depression in den vergangenen 2 Wochen erfasst, und das Kriterium „Depression liegt vor“ galt als erreicht, wenn der Summenwert des Fragebogens mehr als 9 von 27 Punkten erreichte. In den statistischen Analysen zeigte sich erstens, dass die Fluglärm-Belästigung unter den Teilnehmern höher war als die Belästigung durch andere Lärmquellen, und dass es einen statistisch signifikant positiven Zusammenhang zwischen Lärmbelästigung und Depression bzw. Angst gab (s. Abb. 15).

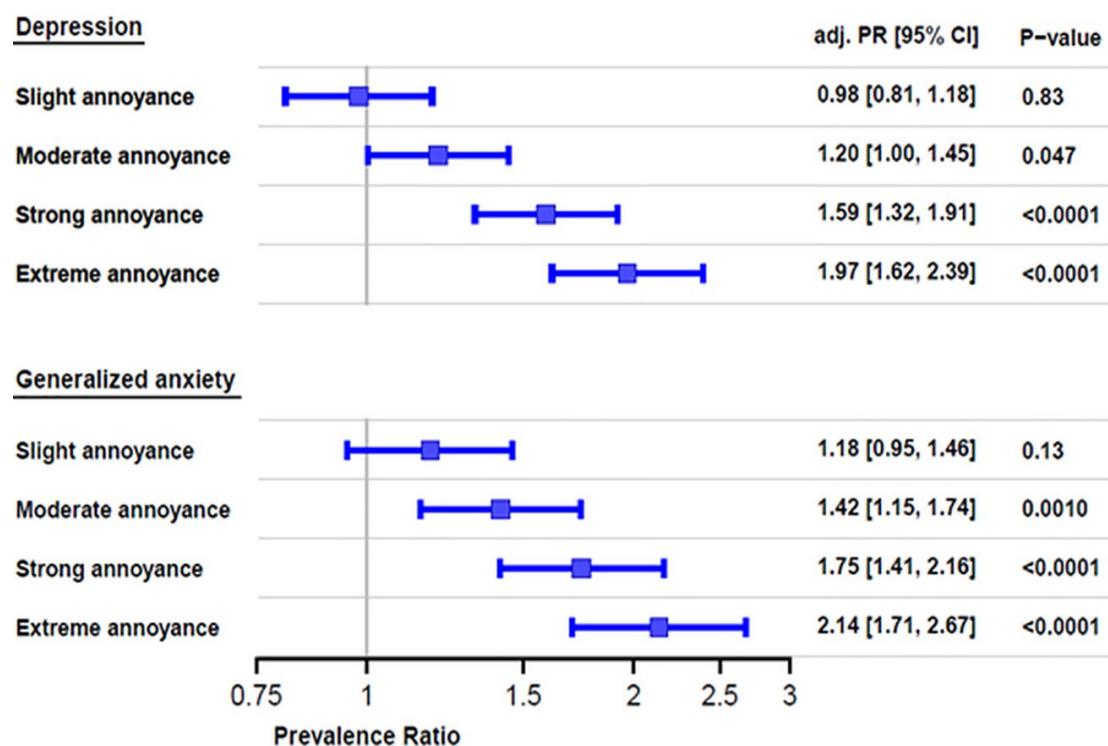


Abb. 15 (Fig. 1 aus Beutel et al., 2016): Zusammenhang zwischen Belästigungsangaben und Prävalenz von Depression (oben) und Angst (unten) in der GHS-Untersuchung im Rhein-Main-Gebiet.

Leider gibt es für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer dieser Untersuchung keine adressbezogenen Daten für die Lärmbelastung, aber die Autoren weisen darauf hin, dass die Stärke der statistischen Assoziation zwischen Lärm und Depression bzw. Angst vergleichbar sei mit den früher in der Literatur berichteten Zusammenhängen zwischen Depression und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Bislang können wir nur spekulieren, wie der Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zwischen Belästigung, Depression und kardiovaskulären Erkrankungen genau aussieht, aber es ist wahrscheinlich, dass der Lärm neben direkten Wirkungen auf kardiovaskuläre Erkrankungsrisiken auch eine indirekte

Wirkung über die Belästigung hat.

## 7. Fazit

Die Flughafen Düsseldorf GmbH plant u.a. eine Erhöhung der Anzahl von Flugbewegungen auf bis zu 60 in den Spitzenstunden des Tages. Dabei bleibt unklar, was der Begriff „Spitzenstunden“ hier genau meint, und welcher Zusammenhang mit der ebenfalls geplanten „flexibleren Nutzung der Nordbahn“ genau besteht. Die Flexibilität mag ein ökonomischer Standortvorteil sein; für Lärm betroffene wird sie zum Nachteil, wenn sie nicht an der Planung beteiligt sind und/oder nicht genau vorher wissen, wie der Flugbetrieb in den nächsten Tagen und Wochen aussehen wird.

Das vorliegende Gutachten bietet neben einer Einführung in akustische Kenngrößen und nicht-akustische Parameter eine Übersicht über Zusammenhänge zwischen akustischen Kenngrößen und Lärmwirkungen, getrennt nach Leq-basierten Kenngrößen, Maximalpegel-basierten Kenngrößen und Ereignishäufigkeiten. Darüber hinaus wird zur Frage der Gewöhnung an Lärm sowie zu speziellen Änderungseffekten bei betrieblichen Änderungen Stellung genommen.

**Hinsichtlich der Leq-basierten Kenngrößen** wurde deutlich, dass der Lärmschutz am Flughafen Düsseldorf schon heute – d.h. ohne Änderung – teilweise nicht mehr den gesundheitlichen Anforderungen entspricht, auch wenn er dem bestehenden Fluglärmgesetz genügt, weil die Fluglärmwirkung „Starke Belästigung“ heute deutlich höher ist als zur Zeit der Etablierung der EU-Standardkurven. Heute sind etwa 37% der Betroffenen bei 60 dB L<sub>den</sub> hoch belästigt. Die für gesellschaftspolitische Diskussionen oft benutzten 25% Hochbelästigten werden heute schon bei ca. 53 dB L<sub>den</sub> erreicht. Das bedeutet, dass auch die im deutschen FluglärmSchutzGesetz von 2007 festgelegten Werte für baulichen Schallschutz längst nicht mehr ausreichen, um die Bevölkerung vor erheblichen Belästigungen zu schützen. Hier müssen aktive Schallschutzmaßnahmen ergriffen werden. Bei den medizinisch erfassten Gesundheitsrisiken des Fluglärm sind v.a. das Herzinfarkt-Risiko bei ca. 60 dB L<sub>DN</sub> und Wohndauer über 15 Jahre, der signifikante Anstieg der stationären Aufnahmen wegen einer ischämischen Herzerkrankung (3,5% Risiko-Anstieg pro 10 dB Anstieg des L<sub>DN</sub>), der lineare Anstieg des Herzinsuffizienz-Risikos mit zunehmendem 24-Stunden-Dauerschallpegel (1,6% Risiko-Anstieg pro 10 dB Anstieg des L<sub>pAeq,24h</sub>) und v.a. der Anstieg der diagnostizierten Depressionen von 8,9% pro 10 dB Pegelanstieg im L<sub>pAeq,24h</sub>. Bemerkenswert erscheint, dass frühere Untersuchungen signifikante Risiko-Erhöhungen erst bei sehr hohen Fluglärmpegeln feststellten. Dagegen zeigten sich im NORAH-Projekt signifikante Risiko-Anstiege teilweise schon ab 45 dB L<sub>pAeq,24h</sub>. Auch in der NORAH-Kinderstudie wurden statistisch signifikante Lern-Beeinträchtigungen schon ab ca. 45 dB L<sub>pAeq,06-14h</sub> Fluglärm festgestellt.

**Die Maximalpegel-basierten Kenngrößen** werden heute überwiegend hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit nächtlichen Schlafstörungen und medizinisch erfassbaren Gesundheitsrisiken untersucht. Hinsichtlich der Schlafstörungen zeigt die NORAH-Schlafstudie zwar eine geringere Aufwachhäufigkeit am Flughafen Frankfurt (mit Kernruhezeit zwischen 23 und 05 Uhr) gegenüber dem Kölner Flughafen (mit erheblichen Nachtfluganteilen), allerdings wird auch deutlich, dass der mit einer Kernruhezeit verbundene verstärkte morgendliche Einsatz des Flugverkehrs konträr zu den Schlafgewohnheiten der Europäer ist: um 5 Uhr morgens befinden sich 97 % der

Bevölkerung noch im Bett, wollen schlafen, und werden im Schlaf so stark gestört, dass sie in der Regel nicht wieder einschlafen können. Um 6 Uhr befinden sich immer noch 85 % der Bevölkerung im Bett; mithin steht auch die am Flughafen Düsseldorf bestehende Nachtflugbeschränkung von 23-06 Uhr (für planmäßige Landungen) in Konflikt mit den Schlafgewohnheiten der Anwohnerinnen und Anwohner – ganz abgesehen von den aus gesundheitlicher Sicht zu großzügigen Regelungen für die „Home-Base Carrier“ sowie die Off-Block-Zeit und Verspätungen. Eine weitere Erhöhung der Flugbewegungszahl wäre insbesondere in den Nachrandzeiten gesundheitlich sehr bedenklich.

**Häufigkeits-basierte Kenngrößen** (z.B. NAT-Werte) sind aus Sicht der Belästigungsforschung ebenso wichtig wie Leq-basierte akustische Kennwerte. Folgt man den Interpretationen der ANASE-Studie, dann erklären die über die vergangenen 20 Jahre gestiegenen Flugbewegungszahlen an vielen Verkehrsflughäfen einen Großteil der gleichzeitig gestiegenen Belästigung bei vergleichbaren Dauerschallpegeln. Im NORAH-Projekt zeigte sich, dass an allen untersuchten Flughäfen ein systematischer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Flugbewegungen (gemessen am NAT55 tagsüber) und dem Anteil hoch belästigter Personen besteht. Die gesundheitspolitisch wichtige Marke von 25% Hochbelästigten wird am kleinsten untersuchten Flughafen (Stuttgart) bei ca. 56 Flugbewegungen am Tag erreicht. Berücksichtigt man, dass der NAT55 nur ca. 70% aller Flugbewegungen reflektiert, und überträgt die Stuttgarter Ergebnisse auf den Flughafen Düsseldorf mit den Referenz- und Prognoseszenarien, so ergibt sich rechnerisch eine Hochbelästigten-Rate von über 50% in beiden Szenarien. Diese Raten sind im Hinblick auf die Gesundheit der Anwohnerinnen und Anwohner schon heute zu erwarten und eine weitere Steigerung keineswegs vertretbar.

Bei der Frage, **ob man sich an Lärm gewöhnen** kann, muss man zunächst klären, was hier mit „gewöhnen“ gemeint ist. Die vorliegenden Ergebnisse zur Steigerung der Erkrankungsrisiken mit zunehmender Wohndauer und die anhaltenden Proteste der Bevölkerung an Flughäfen weisen darauf hin, dass diese Frage generell verneint werden muss.

Bei **geplanten Änderungen an einem Flughafen**, insbesondere bei geplanter Erhöhung der Flugbewegungszahlen, muss berücksichtigt werden, dass neben dem zeitlichen Trend zu einer Erhöhung der Belästigung bei vergleichbaren Dauerschallpegeln, der auch bei sog. „Bestandsflughäfen“ besteht, ein Effekt der geplanten oder durchgeführten Änderung selbst berücksichtigt werden muss. Über die Höhe und Dauer dieses Änderungseffekts können jedoch zur Zeit keine verlässlichen Angaben gemacht werden – sicher ist zur Zeit nur, dass die Höhe des Änderungseffekts teilweise mit dem Ausmaß der geplanten oder durchgeführten Belastungsänderung korrespondiert.

Aus gesundheitlicher Perspektive muss vor dem weiteren Ausbau der Flughafens Düsseldorf gewarnt werden, weil die jüngeren Ergebnisse der Lärmwirkungsforschung darauf hinweisen, dass der Flughafen schon jetzt erhebliche Risiken für Teile der Lärmgefährdeten darstellt. Zudem bleibt in dem Antrag sehr offen, wie die geplante Erhöhung der Flugbewegungszahlen konkret umgesetzt werden soll. Eine Erhöhung der Bewegungszahlen in den frühen Morgenstunden wäre auf jeden Fall für die Anlieger gesundheitsgefährdend – auch angesichts der undurchsichtigen und den Luftverkehr sehr begünstigenden bestehenden Nachtregelung. Sollten die Ausbaupläne dazu führen, dass die Anzahl der Flugbewegungen insbesondere zwischen 16 und 22 Uhr steigt, ist zumindest mit einer überproportionalen Zunahme der Belästigung zu rechnen.

## Literatur:

- Arbeitsgemeinschaft-für-sozio-psychologische-Fluglärmuntersuchungen. (1973). Untersuchungen über den Fluglärm und seine Wirkungen im Gebiet von drei Schweizer Zivilflughäfen 1971/72. Bern (CH): Eidgenössisches Luftamt.
- Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gehrlich, A., Luks, N., Maaß, N., Mawet, L., Müller, E.-W., Müller, U., Plath, G., Quehl, J., Rey, E., Samel, A., Schulze, M., Vejvoda, M. & Wenzel, J. (2004). *Nachtfluglärmwirkungen* (Band 1): Zusammenfassung. Köln: DLR.
- Basner, M., Isermann, U. & Samel, A. (2005). Die Umsetzung der DLR-Studie in einer nachtmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 52, 109-123.
- Basner, M., Müller, U. & Elmenhorst, E.-M. (2011). Single and Combined Effects of Air, Road, and Rail Traffic Noise on Sleep and Recuperation. *Sleep*, 34(1), 11-23.
- Basner, M., Müller, U., Elmenhorst, E.-M., Kluge, G. & Griefahn, B. (2008). Aircraft noise effects on sleep: a systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations. *Physiological Measurement*, 29, 1089-1103.
- Beutel, M. E., Jünger, C., Klein, E. M., Wild, P., Lackner, K., Blettner, M., Binder, H., Michal, M., Wiltink, J., Brähler, E. & Münzel, T. (2016). Noise Annoyance Is Associated with Depression and Anxiety in the General Population - The Contribution of Aircraft Noise. *PLoS ONE*, 11(5), e0155357. doi: doi:10.1371/journal.pone.0155357.
- Breugelmans, O., Houthuijs, D., Van Kamp, I., Stellato, R., Van Wiechen, C. & Doornbos, G. (2007). Longitudinal effects of a sudden change in aircraft noise exposure on annoyance and sleep disturbance around Amsterdam airport. Paper presented at the 19th International Congress on Acoustics (ICA 2007), Madrid (E).
- Brink, M., Lercher, P., Eisenmann, A. & Schierz, C. (2008). Influence of slope of rise and event order of aircraft noise events on high resolution actimetry parameters. *Somnologie*, 12, 118-128.
- Brink, M., Wirth, K., Rometsch, R. & Schierz, C. (2005). Lärmstudie 2000. Zusammenfassung. Teil 1: Die Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Flughafens Zürich (Bevölkerungsbefragungen der Jahre 2001 und 2003). Teil 2: Der Einfluss von abendlichem und morgendlichem Fluglärm auf Belästigung, Befindlichkeit und Schlafqualität von Flughafenwohnern (Feldstudie). Zurich: ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften.
- Brink, M., Wirth, K., Thomann, G., Bauer, G. & Schierz, C. (2008). Annoyance responses to stable and changing aircraft noise exposure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 2930-2941.
- Brooker, P., Critchley, J. B., Monkman, D. J. & Richmond, C. (1985). United Kingdom Aircraft Noise Index Report. Civil Aviation Authority, Department of Transport. Report DR 8402. London (UK).
- Brown, A. L. & van Kamp, I. (2009a). Response to a change in transport noise exposure: a review of evidence of a change effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(5), 3018-3029. doi: 10.1121/1.3095802.
- Brown, A. L. & van Kamp, I. (2009b). Response to a change in transport noise exposure: Competing explanations of change effects. *Journal of the Acoustical Society of America*,

125(2), 905-914.

Correia, A. W., Peters, J. L., Levy, J. I., Melly, S. & Dominici, F. (2013). Residential exposure to aircraft noise and hospital admissions for cardiovascular diseases: multi-airport retrospective study. *BMJ*, 347(f5561). doi: 10.1136/bmj.f5561.

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). (1974). *Fluglärmwirkungen. Eine interdisziplinäre Untersuchung über die Auswirkungen des Fluglärms auf den Menschen.* Forschungsbericht, 3 Bände. Boppard (D): Harald Boldt.

Deutscher Bundestag (2011). *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (BimSchG).*

Eikmann, T., Zur Nieden, A., Lengler, A., Harpel, S., Ziedorn, D., Bürger, M., Pons-Kühnemann, J., Römer, K., Hudel, H. & Spilski, J. (2015). Wirkung chronischer Lärmbelastung auf den Blutdruck bei Erwachsenen. In Umwelthaus gGmbH (Ed.), NORAH Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Vol. 5, pp. 336). Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.

Fidell, S., Horonjeff, R., Teffeteller, S. & Persons, K. (1981). *Community sensitivity to changes in aircraft noise exposure* (Vol. NASA Contractor Report 3490). Langley Research Center: NASA.

Fidell, S., Silvati, L. & Haboly, E. (2002). Social survey of community response to a step change in aircraft noise exposure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(1), 200-209.

Floud, S., Blangiardo, M., Clark, C., de Hoogh, K., Babisch, W., Houthuijs, D., Swart, W., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Velonakis, M., Vigna-Taglianti, F., Cadum, E. & Hansell, A. (2013). Exposure to aircraft and road traffic noise and associations with heart disease and stroke in six European countries: a cross-sectional study. *Environmental Health*, 12(1), 89.

Flughafen-Düsseldorf-GmbH. (2015). *DUS Nachtflug-Report Quartal 3/2015*. Düsseldorf: Flughafen Düsseldorf GmbH.

[https://www.dus.com/~/media/fdg/dus\\_com/konzern/nachbarn/flugbetrieb/pdfs/dus\\_nachtflugreport\\_3\\_2015.pdf](https://www.dus.com/~/media/fdg/dus_com/konzern/nachbarn/flugbetrieb/pdfs/dus_nachtflugreport_3_2015.pdf).

Gjestland, T., Gellerblom, F. B., Fidell, S. A. & Berry, B. (2015). Temporal trends in aircraft noise annoyance. Paper presented at the Inter-Noise 2015, San Francisco (USA, CA).

Gjestland, T., Liasjø, K. H., Granøien, I. L. N. & Fields, J. M. (1990). Response to noise around Oslo Airport Fornebu. Report STF40 A90189. Trondheim (N): Elab-Runit Sintef Gruppen. Acoustics Research Center.

Griffiths, I. D. & Raw, G. J. (1989). Adaptation to Changes in Traffic Noise Exposure. *Journal of Sound & Vibration*, 132(2), 331-336.

Guski, R., Basner, M. & Brink, M. (2012). *Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Fluglärms: aktueller Wissensstand (Literaturoauswertung)*. Im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (pp. 76). Bochum / Düsseldorf (D): RUB, Fakultät für Psychologie / Land NRW. <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/laerm/fluglaerm/index.php>.

Guski, R., Schreckenberg, D. & Schuemer, R. (2016 submitted, 05.04.2016). WHO Systematic Evidence Review Concerning Noise Annoyance – Draft 9d. Bonn, Germany.

- Hansell, A. L., Blangiardo, M., Fortunato, L., Floud, S., Hoogh, K. d., Fecht, D., Ghosh, R. E., Laszlo, H. E., Pearson, C., Beale, L., Beevers, S., Gulliver, J., Best, N., Richardson, S. & Elliott, P. (2013). Aircraft noise and cardiovascular disease near Heathrow airport in London: small area study. *BMJ*, 347(f5432). doi: 10.1136/bmj.f5432.
- Hazard, W. R. (1971). Predictions of noise disturbance near large airports. *Journal of Sound and Vibration*, 15, 425-445.
- Hede, A. J. & Bullen, R. B. (1982). Aircraft noise in Australia: A survey of community response (Vol. Report. No. 88). Canberra (AUS): National Acoustic Laboratories.
- Hellbrück, J., Guski, R. & Schick, A. (2010). Schall und Lärm. In V. Linneweber, E. D. Lantermann & E. Kals (Eds.), *Enzyklopädie der Psychologie, Serie 9, Umweltpsychologie Bd. 2: Spezifische Umwelten und Umweltprobleme* (pp. 3-44). Göttingen: Hogrefe.
- Horonjeff, R. D. & Robert, W. E. (1997). Attitudinal responses to changes in noise exposure in residential communities. Hampton (VA, USA): NASA CR-97-205813
- Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., Röösli, M. for the Swiss National Cohort Study Group. (2010). Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction. *Epidemiology*, 21(6), 829-836.
- Hygge, S. & Kim, R. (2011). Environmental noise and cognitive impairment in children. In WHO (Ed.), *Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe* (pp. 45-53). Copenhagen (DK): World Health Organization.
- International-Standards-Organization. (2003). ISO TS 15666: Acoustics - Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. Geneva (CH): ISO.
- Janssen, S. A. & Guski, R. (in press). Aircraft noise annoyance. In S. A. Stansfeld, B. Berglund, S. Kephalaopoulos & M. Paviotti (Eds.), *Evidence Review on Aircraft Noise and Health*. Bonn (D): Directorate General Joint Research Center and Directorate General for Environment, European Union.
- Janssen, S. A. & Vos, H. (2009). A comparison of recent surveys to aircraft noise exposure-response relationships TNO Report (Vol. TNO-034-DTM-2009-01799, pp. 14).
- Janssen, S. A., Vos, H., Van Kempen, E., Breugelmans, O. & Miedema, H. M. E. (2011). Trends in aircraft noise annoyance: The role of study and sample characteristics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), 1953-1962.
- Jarup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadum, E., Dudley, M. L., Savigny, P., Seiffert, I., Swart, W., Breugelmans, O., Bluhm, G., Selander, J., Haralabidis, A., Dimakopoulou, K., Sourtzi, P., Velonakis, M. & Vigna-Taglianti, F. (2008). Hypertension and Exposure to Noise near Airports - the HYENA study. *Environmental Health Perspectives*, 116, 329-333.
- Job, R. F. S. (1988). Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 991-1001.
- Kastka, J., Buchta, E., Ritterstaedt, U., Paulsen, R. & Mau, U. (1995). The long term effect of noise protection barriers on the annoyance response of residents. *Journal of Sound and Vibration*, 184, 823-852.
- Klatte, M., Bergström, K. & Lachmann, T. (2013). Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children. *Frontiers in Psychology*, 4(578), 1-6. <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fpsyg.2013.00578/full>.

Klatte, M., Bergström, K., Spilski, J., Mayerl, J. & Meis, M. (2014). Wirkungen chronischer Fluglärmbelastung auf kognitive Leistungen und Lebensqualität bei Grundschulkindern. In Umwelthaus gGmbH (Ed.), NORAH (Noise Related Annoyance, Cognition, and Health). Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Vol. 1, pp. 329). Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.

Kodama, H. (1971). Psychological effect of aircraft noise upon inhabitants of an airport neighborhood. Paper presented at the 17th International Congress of Applied Psychology, Liège (B).

Lambert, J., Champelovier, P. & Vernet, I. (1998). Assessing the railway bonus: the need to examine the new infrastructure effect. Paper presented at the Inter-Noise '98, Christchurch (NZ).

LeMasurier, P., Flindell, I. H. & Schreckenberg, D. (2013). Aircraft Noise Assessment - Alternative Approaches. Paper presented at the Inter-Noise 2013, Innsbruck (A).

McKennell, A. C. (1963). Aircraft noise annoyance around Heathrow airport. London (UK): Her Majesty's Stationery Office.

Meyer, A. (2011). Comment on "A field study of the exposure-annoyance relationship of military shooting noise" [J. Acoust. Soc. Am. 127, 230122311 (2010)] (L). Journal of the Acoustical Society of America, 130(2), 677-678.

Miedema, H. M. E. & Oudshoorn, C. G. (2001). Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure Metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environmental Health Perspectives, 109, 409-416.

MIL Research (1971). Second survey of aircraft noise annoyance around London (Heathrow) Airport. London (UK): Office of Population Censuses and Surveys, Department of Trade and Industry, HMSO.

Müller, U., Aeschbach, D., Elmenhorst, E.-M., Mendolia, F., Quehl, J., Hoff, A., Rieger, I., Schmitt, S. & Littel, W. (2015). Fluglärm und nächtlicher Schlaf. In Umwelthaus-gGmbH (Ed.), NORAH (Noise Related Annoyance, Cognition, and Health). Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Vol. 4, pp. 191). Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.

Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. Sleep Medicine Reviews, 11, 135-142.

MVA-Consultancy. (2007). ANASE: Attitudes to Noise from Aviation Sources in England. Final Report. Woking / Norwich (UK): Queen's Printer and Controller of HMSO.

Passchier-Vermeer, W. & Passchier, W. F. (2000). Noise Exposure and Public Health. Environmental Health Perspectives, 108 (Supplement 1), 123-131.

Pearsons, K. S., Barber, D. S., Tabachnick, B. G. & Fidell, S. (1995). Predicting noise-induced sleep disturbance. Journal of the Acoustical Society of America, 97, 331-338.

Petz, M. (2016). Flughafen Düsseldorf, Planfeststellungsverfahren zur Kapazitätserweiterung. Flug- und Bodenlärmgutachten (Bericht ACB-0116-6050/17). Greifenberg (D): Accon GmbH.

Raw, G. J. & Griffiths, I. D. (1985). The effect of changes in aircraft noise exposure. Journal of Sound and Vibration, 101, 273-275.

Rohrmann, B. (1984). Psychologische Forschung und umweltpolitische Entscheidungen: das Beispiel Lärm. Opladen (D): Westdeutscher Verlag.

- Schick, A. (1990). Schallbewertung. Grundlagen der Lärmforschung. Berlin: Springer.
- Schreckenberg, D., Faulbaum, F., Guski, R., Ninke, L., Peschel, C., Spilski, J. & Wothge, J. (2015). Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität. In Umwelthaus gGmbH (Ed.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Vol. 3, pp. 639). Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.
- Schreckenberg, D. & Guski, R. (2005). Lärmbelästigung durch Straßen- und Schienenverkehr zu unterschiedlichen Tageszeiten. Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 10(2), 1-10.
- Schreckenberg, D. & Meis, M. (2006). Gutachten: Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Frankfurter Flughafens - Endbericht. Bochum und Oldenburg: ZEUS / Hörzentrum Oldenburg.
- Schweizerische Eidgenossenschaft. (1986). Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 (LSV) [SR 814.41]. Bern (CH): Schweizerischer Bundesrat.  
<http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.41.de.pdf>
- Seidler, A., Wagner, M., Schubert, M., Dröge, P. & Hegewald, J. (2015). Sekundärdatenbasierte Fallkontrollstudie mit vertiefender Befragung. In Umwelthaus gGmbH (Ed.), NORAH Noise-related annoyance, cognition and health. Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Vol. 6, pp. 317). Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.
- Tracor. (1971). Community reaction to airport noise. Vol. 1. Washington (USA, DC): NASA and Tracor Inc.
- Van Kamp, I. & Davies, H. (2008). Environmental noise and mental health: Five year review and future directions. Paper presented at the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN), Foxwoods (USA, CT).
- World Health Organization. (2011). Burden of disease from environmental noise : Practical guidance. Bonn (D): World Health Organization (WHO).
- Zweck, A., Holtmannspötter, D., Braun, M., Hirt, M., Kimpeler, S. & Warnke, P. (2015). Gesellschaftliche Veränderungen 2030. Ergebnisband 1 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II. In VDI Technologiezentrum GmbH (Ed.). Düsseldorf (D): VDI.