

Leq + X

Lärmexposition, Ereignishäufigkeiten und Belästigung:

Re-Analyse von Daten zur Belästigung und Schlafstörung
durch Fluglärm an deutschen und Schweizer Flughäfen

Hauptbericht

Auftraggeber

Eidgenössisches Departement für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Umwelt BAFU
Abt. Lärm und NIS
CH-3003 Bern

Projektbearbeitung

Ruhr-Universität
D- 44780 Bochum

Rainer Guski

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstr. 10, D-37073 Göttingen

Ullrich Isermann
Rainer Schmid

Empa
Überlandstr. 129,
CH-8600 Dübendorf

Beat Schäffer
Jean Marc Wunderli

ZEUS GmbH,
Zentrum für angewandte Psychologie,
Umwelt- und Sozialforschung
Sennbrink 46, D-58093 Hagen

Julia Haubrich
Sarah Benz
Dirk Schreckenber

Leq +X – Re-Analyse von Daten zur Belästigung und Schlafstörung durch Fluglärm an deutschen und Schweizer Flughäfen

Autorinnen und Autoren:

Julia Haubrich
Sarah Benz
Ullrich Isermann
Beat Schäffer
Rainer Schmid
Dirk Schreckenberg
Jean Marc Wunderli
Rainer Guski

Veröffentlicht im Dezember 2020 unter:

Haubrich, J., Benz, S., Isermann, U. Schäffer, B. Schmid, R., Schreckenberg, D., Wunderli, J.-M. und Guski, R. : Leq+X - Lärmexposition, Ereignishäufigkeiten und Belästigung: Re-Analyse von Daten zur Belästigung und Schlafstörung durch Fluglärm an deutschen und Schweizer Flughäfen. Hauptbericht, Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2020, DOI: 10.46586/rub.164.139.

Dazu gehört ein Band mit Anhängen.



Dieser Text unterliegt der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 4.0. Er darf unter folgenden Bedingungen geteilt werden:
Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen.

Hinweis: Das Thema dieser Studie wurde von der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung EKLB, Bern, Schweiz, aufgegriffen. Bezuschusst wurde die Studie durch Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Schweiz, und Ruhr-Universität Bochum, Deutschland.

Abstract

At a glance

In this study, part of the data sets from 4 large Swiss and German aircraft noise impact studies are re-analysed using logistic multi-level regression models. The aim is to investigate the assumptions that the prediction of a) the percentage of persons highly annoyed by aircraft noise or b) the percentage of persons highly sleep disturbed by aircraft noise can be improved if (i) instead of the energy-equivalent continuous noise level alone, either additional or alternative, more frequency-based aircraft noise metrics and (ii) also airport-specific characteristics are used as predictors. The results support both assumptions; both regarding the percentage of persons highly annoyed and regarding the percentage of persons highly sleep disturbed.

Aircraft noise annoyance is one of the most common negative aspects for residents living in the vicinity of an airport, and it is related to various health impairments and financial losses. It is a complex psychological response to aircraft noise, comprising behavioural, emotional-attitudinal, and cognitive-perceptual components.

A conventional measure of the annoyance of the population due to aircraft noise is the percentage of persons annoyed (*percentage annoyed, % A*) or the percentage of persons *highly* annoyed (*percentage highly annoyed, % HA*) by aircraft noise.

Several studies show that % *HA* has increased in recent years – at comparable aircraft noise levels – compared to past decades, and that it is also higher than it would be expected according to the common generalized exposure-response curves. This observation is discussed under the term "annoyance trend."

Air traffic has changed over the same time period to the effect that both the individual aircraft generally operates at lower noise levels and that the continuous sound levels – i.e., the aircraft-related sound pressure levels averaged over a certain period of time – have decreased in total. However, the number of flight movements has increased.

For this seemingly inconsistent observation – a trend towards more % *HA* with quieter aircraft and lower continuous noise levels – several possible causes are presented in this study, including methodological reasons, a changed attitude of airport residents, and, in particular, the increase in flight movements, the fleet mix, and the change rate at each airport. In this study, the fleet mix is operationalised by the ratio of noise equivalent to real movements, where noise equivalent movements means the number of aircraft movements of aircraft types that produce on average a sound exposure level ΔL decibel higher/lower than that of the reference aircraft type A320/B737. Higher ratio values (> 1) indicate an airport with more 'heavier' aircrafts, i.e. aircrafts with higher sound exposure levels than the level of the reference aircraft type. With regard to the change rate, "high rate change airports", HRC - where major changes such as the construction of a new runway are taking place or under discussion at the time of the survey –, and "low rate change airports", LRC - where there are no changes beyond those normally occurring at the airport at the time of the survey – are distinguished.

Based on these considerations, it is examined whether the prediction quality for % *HA* can be improved if a) instead of the energy-equivalent continuous sound level L_{Aeq} alone, additional or alternative predictors are taken into account – in particular measures of the noise frequency ($\log(NAT)$ -values), the continuous sound level with different halving parameters and the maximum level ($L_{AS,max}$) – and if b) certain airport-specific characteristics related to the respective survey year are added.

In addition, the prediction quality for the percentage of highly sleep disturbed persons due to aircraft noise (% *HSD*) is examined analogously as a further focal criterion in (aircraft) noise impact research and a key value in noise action planning.

For the analyses, data from 2 Swiss studies (LS2000, SiRENE) and 2 German studies (RDF, NORAH) with individual annoyance scores and reported sleep disturbance measures, as well as address-specific aircraft noise exposure variables from a total of $N = 37,701$ residents near 7 airports were re-analysed.

From the studies mentioned above, L_{Aeq} and L_{den} values were available as acoustic measures. Values for the non-energy equivalent metrics $L_{Aeq,24h,k=20}$ and $L_{Aeq,24h,k=30}$, in which the number of noise events are weighted more strongly, were approximated. As additional acoustic predictors, the logarithmic number of aircraft noise events above certain $L_{p,AS,max}$ threshold values (“number above threshold,” $\log(NAT)$), were used in combination with either L_{Aeq} , with L_{den} , or with $L_{p,AS,max,ari,LS}$, i.e., the arithmetically weighted mean maximum level above certain threshold values. The acoustic measures were examined either as single predictors (L_{den} , $L_{Aeq,24h,k=10}$, $L_{Aeq,24h,k=20}$, $L_{Aeq,24h,k=30}$) or in combinations of two (L_{den} with different $\log(NAT_{LS})$, L_{Aeq} with different $\log(NAT_{LS})$, and different $L_{p,AS,max,ari,LS}$ with $\log(NAT_{LS})$). Altogether, the different acoustic measures and their combinations resulted in 16 different predictive models. These were analysed – separately for % *HA* and % *HSD* – using logistic multilevel regressions.

- a) The following airport-specific characteristics (that were determined for each respective survey year) were investigated as 2.-level-predictors: the total number of annual flight movements at the airport,
- b) the proportion of night flights,
- c) the 5-year trend in flight movements,
- d) the fleet mix, and
- e) the change rate at the airport (*HRC* vs. *LRC*, see above).

Results show that the inclusion of airport-specific characteristics improves the predictive quality for % *HA* as well as for % *HSD*.

Regarding % *HA*, the 'fleet mix' stands out among the airport-specific characteristics in the survey year, as it shows a significant interaction effect with the acoustic predictors. The effect of the acoustic predictors increases with low fleet mix values, while it decreases with high fleet mix values. Therefore, the 'fleet mix' has a significantly stronger additional effect on % *HA* in connection with low sound level values than in connection with high sound level values.

Regarding % *HSD*, each of the examined airport-specific characteristics turns out to be significant. Here, the number of nocturnal flight movements per year stands out in particular: An increase by one unit on this variable is associated with a 21.73-fold increase in the probability of *HSD*. In addi-

tion, the change status (*HRC* instead of *LRC*) exerts a positive effect, and the 5-year trend of nocturnal flight movements per year, the night flight rate and the fleet mix exert negative effects on *HSD*.

Concerning the acoustic predictors, the predictive quality of L_{den} is superior to that of the other L_{Aeq} variants (with $k = 10$, $k = 20$, and $k = 30$) regarding % *HA*; chi-square difference tests show, however, that it is further improved by using 2 acoustic predictors combined. In this case, the combination of the L_{Aeq} with $\log(NAT_{24h,70})$ proves the best predictive quality of the investigated models for the available data.

Regarding % *HSD*, the model with $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ and $\log(NAT_{22-06h,80})$ as joint predictors entails the best predictive quality - both compared to the other 2-predictor models as well as compared to the best 1-predictor model with $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ as the sole predictor. Altogether, the assumptions underlying this study – that the use of more frequency-related acoustic predictors and the inclusion of airport-specific characteristics improve the predictive quality – are supported by the results, both with regard to annoyance (with % *HA* as a criterion) as well as with regard to (sleep) disturbances (with % *HSD* as a criterion).

Zusammenfassung

Auf einen Blick

In dieser Studie wird ein Teil der Datensätze von 4 großen Schweizer und deutschen Fluglärmwirkungsstudien mit Hilfe von logistischen Mehrebenenmodellen re-analysiert. Ziel ist die Untersuchung der Annahmen, dass die Vorhersage a) des Anteils durch Fluglärm hoch belastigter Personen und b) des Anteils durch Fluglärm hoch schlafgestörter Personen verbessert werden kann, wenn (i) statt des energieäquivalenten Dauerschallpegels alleine entweder zusätzliche oder alternative, stärker häufigkeitsbasierte Flugverkehrsgeräuschparameter und (ii) zusätzlich spezifische Flughafencharakteristika als Prädiktoren genutzt werden. Diese Annahmen werden durch die Ergebnisse unterstützt, sowohl bezogen auf den Anteil hoch belastigter Personen, als auch bezogen auf den Anteil hoch schlafgestörter Personen

Fluglärmbelästigung ist einer der häufigsten negativen Aspekte für Anwohnerinnen und Anwohner in der Nähe von Flughäfen und steht sowohl mit verschiedenen gesundheitlichen wie auch mit ökonomischen Einbußen in Zusammenhang. Es handelt sich dabei um eine komplexe psychologische Reaktion auf Flugverkehrsgeräusche, die behaviorale, emotionale und kognitive Komponenten umfasst.

Üblicherweise wird als Maß zur Beschreibung der Belästigung der Bevölkerung durch Fluglärm der Prozentanteil durch Fluglärm belastigter Personen (*percentage annoyed, % A*) oder der Prozentanteil durch Fluglärm *hoch* belastigter Personen (*percentage highly annoyed, % HA*) als maßgebliches Kriterium herangezogen.

Verschiedene jüngere Untersuchungen zeigen, dass % HA in den letzten Jahren bei vergleichbaren Flugverkehrsgeräuschpegeln höher ist als in vergangenen Jahrzehnten und auch höher, als es nach den bisher üblichen generalisierten Expositions-Wirkungs-Kurven zu erwarten wäre. Diese Beobachtung wird unter der Bezeichnung „Belästigungstrend“ diskutiert.

Der Flugverkehr hat sich in demselben Zeitraum dahingehend verändert, dass sowohl die einzelnen Verkehrsflugzeuge selber gemeinhin geräuschärmer sind, als auch die Dauerschallpegel – also die über einen bestimmten Zeitraum gemittelten Luftfahrt-bezogenen Schalldruckpegel – insgesamt niedriger sind, während der Luftverkehr (im Sinne der Anzahl von Flugbewegungen) zugenommen hat.

Für diese inkonsistent erscheinende Beobachtung – ein Trend zu mehr % HA bei leiseren Flugzeugen und niedrigeren Dauerschallpegeln – werden in dieser Untersuchung zunächst verschiedene mögliche Ursachen vorgestellt, darunter neben methodischen Gründen und einer veränderten Einstellung von Flughafen-Anwohnern/-innen insbesondere die Zunahme der Flugbewegungen, der Flottenmix und die Änderungsrate eines Flughafens. Der Flottenmix wird in dieser Studie durch das Verhältnis von lärmäquivalenten zu realen Bewegungen operationalisiert, wobei lärmäquivalente Bewegungen die Anzahl von Flugbewegungen von Flugzeugtypen bedeuten, die im Mittel einen um ΔL Dezibel höheren/niedrigeren Schallexpositionspegel als den des Referenzflugzeugtyps A320/B737 erzeugen. Höhere Verhältniswerte (> 1) bedeuten einen Flughafen mit häufigeren Flugbewegungen „schwerer“ Flugzeuge, d.h. Flugzeuge mit einem höheren Schallexpositionspegel als dem des Referenzflugzeugtyps. Bei der Änderungsrate werden Flughäfen mit hoher Änderungsrate, „High-Rate-Change-Airports“, HRC – wo größere Veränderungen wie der Bau einer neuen Start- oder Landebahn zur Zeit

der Erhebung stattfinden oder diskutiert werden und Flughäfen mit geringer Änderungsrate, "Low-Rate-Change-Airports", *LRC* – wo es zur Zeit der Erhebung keine über das am jeweiligen Flughafen übliche Maß hinausgehenden Änderungen gibt – unterschieden.

Basierend auf diesen Überlegungen wird untersucht, ob die Vorhersagegüte für % *HA* verbessert werden kann, a) wenn hierfür statt des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{Aeq} alleine zusätzliche oder alternative Prädiktoren berücksichtigt werden, insbesondere Maße der Geräuschhäufigkeit ($\log(NAT)$ -Werte), des Dauerschallpegels mit verschiedenen Halbierungsparametern und des Maximalpegels ($L_{AS,max}$), sowie b), wenn bestimmte auf das jeweilige Erhebungsjahr bezogene Flughafen-spezifische Charakteristika berücksichtigt werden.

Zudem wird analog die Vorhersagegüte für den Prozentanteil durch Fluglärm hoch schlafgestörter Personen (*percentage highly sleep disturbed, % HSD*) untersucht als einem weiteren zentralen Kriterium in der (Flug-)Lärmwirkungsforschung und Zielgröße in der Lärmaktionsplanung.

Für die Analysen werden die Daten mit individuellen Belästigungs- und berichteten Schlafstörungs-Maßen und adressgenauen Fluglärm-Belastungs-Variablen von insgesamt $N = 37701$ Anwohnern/-innen von 7 Flughäfen aus 2 Schweizer Studien (LS2000, SiRENE) und 2 deutschen Studien (RDF, NO-RAH) re-analysiert.

Als akustische Maße standen L_{Aeq} - und L_{den} -Werte aus allen o. g. Studien zur Verfügung. Werte für die nicht energieäquivalenten Maße $L_{Aeq,24h,k=20}$ und $L_{Aeq,24h,k=30}$, in denen die Anzahl von Lärmereignissen stärker gewichtet werden, wurden approximiert. Als weitere Prädiktoren dienten die logarithmierte Anzahl der Fluglärmereignisse oberhalb bestimmter Schwellenwerte, $\log(NAT)$, in Kombination mit L_{Aeq} , mit L_{den} oder mit $L_{p,AS,max,ari,LS}$, also mittleren Maximalpegeln oberhalb bestimmter Schwellenwerte. Die akustischen Maße wurden teilweise als einzelne Prädiktoren untersucht (L_{den} , $L_{Aeq,24h,k=10}$, $L_{Aeq,24h,k=20}$, $L_{Aeq,24h,k=30}$) und ebenso in 2er-Kombinationen (L_{den} mit verschiedenen $\log(NAT_{LS})$, L_{Aeq} mit verschiedenen $\log(NAT_{LS})$ sowie verschiedene $L_{p,AS,max,ari,LS}$ mit $\log(NAT_{LS})$); insgesamt ergaben sich auf Basis der akustischen Maße und deren Kombinationen 16 verschiedene Vorhersagemodelle, die – jeweils getrennt für % *HA* und % *HSD* – mit logistischen Mehrebenenmodellen analysiert wurden.

Hierbei wurden folgende spezifische Flughafencharakteristika als 2.-Level-Prädiktoren modelliert (die jeweils in Bezug auf das jeweilige Erhebungsjahr bestimmt wurden):

- a) die jährliche Anzahl der Flugbewegungen am Flughafen insgesamt,
- b) der Nachtfluganteil,
- c) der 5-Jahrestrend in den Flugbewegungen,
- d) der Flottenmix sowie
- e) der Änderungsrate des jeweiligen Flughafens (*HRC* vs. *LRC*, siehe oben).

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einbezug von Flughafencharakteristika die Vorhersagegüte sowohl für % *HA* als auch für % *HSD* verbessert.

Bezogen auf *HA* ist unter den Flughafencharakteristika im Erhebungsjahr der ‚Flottenmix‘ von Bedeutung, der einen Interaktionseffekt mit den akustischen Prädiktoren ausübt. Bei niedrigen Flottenmix-Werten steigt der Effekt der akustischen Prädiktoren, während er bei hohen Flottenmix-Werten sinkt. Die Variable ‚Flottenmix‘ übt also im Bereich niedriger Pegelwerte einen deutlich stärkeren zusätzlichen Effekt auf *HA* aus als im Bereich hoher Pegelwerte.

Bezogen auf *HSD* erweist sich jedes der untersuchten Stichprobencharakteristika als signifikant. Hier sticht die Anzahl nächtlicher Flugbewegungen pro Jahr besonders hervor: Ein Anstieg um eine Einheit auf dieser Variablen ist mit einer 21,73-fach erhöhten Wahrscheinlichkeit für *HSD* verbunden. Darüber hinaus wirken sich der Änderungsstatus (*HRC* statt *LRC*) positiv sowie der 5-Jahrestrend nächtlicher Flugbewegungen pro Jahr, der Nachtfluganteil und der Flottenmix negativ Effekte auf *HSD* aus.

Mit Blick auf die akustischen Prädiktoren zeigt sich, dass bezogen auf % *HA* die Vorhersagegüte auf Basis des L_{den} verschiedenen anderen L_{Aeq} -Varianten (mit $k = 10$, $k = 20$ und $k = 30$) überlegen ist; Chi Quadrat-Differenzentests zeigen jedoch, dass sie durch die Nutzung von insgesamt 2 akustischen Prädiktoren weiter verbessert wird. Hier erweist sich die Kombination des L_{Aeq} mit $\log(NAT_{24h,70})$ für die vorliegenden Daten als dasjenige der untersuchten Modelle mit der besten Vorhersagegüte.

Bezogen auf % *HSD* ist das Modell mit den gemeinsamen Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ das mit der besten Vorhersagegüte - sowohl im Vergleich zu den anderen 2-Prädiktor-Modellen, als auch im Vergleich zum besten 1-Prädiktor-Modell mit $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ als alleinigem Prädiktor.

Insgesamt werden somit die Ergebnisse die dieser Studie zugrundeliegenden Annahmen, dass die Nutzung stärker häufigkeitsbezogener akustischer Prädiktoren und der Einbezug von Flughafencharakteristika die Vorhersagegüte verbessern, sowohl im Bereich der Belästigung (bzw. mit % *HA* als Kriterium), als auch im Bereich der (Schlaf)Störungen (bzw. mit % *HSD* als Kriterium) unterstützt.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	12
1 Motivation	14
1.1 Mögliche Ursachen für die erhöhte Fluglärmbelästigung in jüngeren Untersuchungen	15
1.2 Ereignishäufigkeiten und Belästigung	18
1.3 Annahmen	26
2 Verfügbare sozio-akustische Datensätze	27
3 Akustische Analysen	30
3.1 Akustische Analysen durch das DLR	30
3.1.1 Ermittelte akustische Kenngrößen	30
3.1.2 Charakterisierung der im Rahmen der deutschen Studien untersuchten Flughäfen	33
3.2 Akustische Analysen durch die Empa	39
3.2.1 Ermittelte akustische Kenngrößen	39
3.2.2 Charakterisierung der im Rahmen der Schweizer Studien untersuchten Flughäfen	43
3.3 Akustische Daten aus Deutschland und der Schweiz: Vergleichbarkeit und Unsicherheiten	50
3.3.1 Vergleichbarkeit der akustischen Immissionsdaten	50
3.3.2 Berechnungsunsicherheiten	52
4 Befragungsdaten	54
5 Statistische Analysen	56
6 Ergebnisse	57
6.1 Geschlechts- und Altersverteilung	57
6.2 Pegelverteilung pro Studie und pro Flughafen und Jahr	58
6.3 Korrelationsanalysen pro Flughafen und Jahr	60
6.3.1 Korrelationen zwischen Dauerschallpegeln und weiteren akustischen Maßen	60
6.3.2 Korrelationen zwischen Belästigung, Schlafstörung und akustischen Maßen pro Flughafen und Jahr	67
6.4 Logistische Mehrebenenanalysen	72
6.4.1 Kriterien	72
6.4.2 Prädiktoren	73
6.4.3 Modelle	74
6.4.4 Vorgehensweise bei den Mehrebenenanalysen	75

Modell ALqN70 (akustische Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$)	79
Modell ALqN80 (akustische Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,80})$)	79
Modell AMN50 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,50}$ und $\log(NAT_{24h,50})$)	79
Modell AMN60 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,60}$ und $\log(NAT_{24h,60})$)	79
Modell AMN70 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,70}$ und $\log(NAT_{24h,70})$)	80
Modell AMN80 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,80}$ und $\log(NAT_{24h,80})$)	80
Modell ALd (akustischer Prädiktor L_{den})	80
Modell ALq10 (akustischer Prädiktor $L_{Aeq,24h}(k = 10)$)	80
Modell ALq20 (akustischer Prädiktor $L_{Aeq,24h}(k = 20)$)	80
Modell ALq30 (akustischer Prädiktor $L_{Aeq,24h}(k = 30)$)	80
7 Diskussion und Schlussfolgerung.....	107
8 Literatur	110

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1. Zusammenhänge zwischen L_{den} und % HA (% Highly Annoyed) bei Fluglärm.....	15
Abbildung 1-2. Zusammenhänge zwischen L_{den} und % HA (% Highly Annoyed) bei Fluglärm.....	17
Abbildung 1-3. Re-Analyse von Daten aus Rylander und Björkman (1997)	20
Abbildung 1-4. Zusammenhang zwischen (logarithmierter) Flugbewegungszahl und mittlerer Belästigung in der älteren ANIS-Studie	21
Abbildung 1-5. Zusammenhang zwischen der Kombination aus Maximalpegel (L_{av}) und logarithmierter Flugbewegungszahl ($\log N_{av}$) einerseits und mittlerer Belästigung andererseits.	22
Abbildung 1-6. Zusammenhang zwischen "Community Tolerance Level" (CTL) und jährlicher (logarithmierter) Flugbewegungszahl	23
Abbildung 3-1. Maximalpegelverteilung und die daraus abgeleitete Summenhäufigkeitsfunktion	31
Abbildung 3-2. Pistensystem am Flughafen Basel.....	45
Abbildung 3-3. Pistensystem am Flughafen Genf	46
Abbildung 3-4. Pistensystem am Flughafen Zürich	48
Abbildung 6-1. Häufigkeitsverteilungen über Klassen des L_{den}	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1. Korrelationen zwischen Fluglärmbelastigung (Rohwert) und akustischen Prädiktoren in verschiedenen Studien.	19
<i>Tabelle 1-2. Modellgüte linearer Regressionen zur Fluglärmbelastigung insgesamt und berichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen.....</i>	<i>25</i>
Tabelle 2-1. Verfügbare Stichproben und Bezeichnungen der Stichproben in diesem Bericht.	29
Tabelle 3-1. Lärmäquivalente für die Flugzeuggruppen nach AzB, bezogen auf die Flugzeuggruppe S5.2.	34
Tabelle 3-2. Verkehrsanalyse für den Flughafen Frankfurt/Main für die Jahre 2000 – 2013.....	35
Tabelle 3-3. Verkehrsanalyse für den Flughafen Berlin Schönefeld für die Jahre 2007 – 2012.	36
Tabelle 3-4. Verkehrsanalyse für den Flughafen Köln-Bonn für die Jahre 2008 – 2013.....	37
Tabelle 3-5. Verkehrsanalyse für den Flughafen Stuttgart für die Jahre 2008 – 2013.	38
Tabelle 3-6. Beispiel von Maximalpegelverteilungen.....	40
Tabelle 3-7. Verkehrsanalyse für den Flughafen Basel für die Jahre 2010–2015.....	45
Tabelle 3-8. Flugbetriebsrichtungen in die vier Quadranten Q1–Q4 für den Flughafen Basel	46
Tabelle 3-9. Verkehrsanalyse für den Flughafen Genf für die Jahre 2010–2015.	47
Tabelle 3-10: Flugbetriebsrichtungen in die vier Quadranten Q1–Q4 für den Flughafen Genf	47
Tabelle 3-11. Verkehrsanalyse für den Flughafen Zürich für die Jahre 1997–2003 und 2010–2015.	49
Tabelle 3-12. Flugbetriebsrichtungen in die vier Quadranten Q1–Q4 für den Flughafen Zürich	50
Tabelle 4-1. In den Studien erhobene fluglärmbedingte Belästigung und Schlafstörung.	54
Tabelle 6-1. Stichprobenverteilung nach Geschlecht und Alter in den Fluglärmwirkungsstudien.....	57
Tabelle 6-2. Korrelationen der Dauerschallpegel	61
Tabelle 6-3. Korrelationen der Dauerschallpegel	64
Tabelle 6-4. Korrelationen akustischer Maße der Luftverkehrsgeräuschbelastung mit der Fluglärmbelastigung und der berichteten Schlafstörung durch Fluglärm	68
Tabelle 6-5. Korrelationen akustischer Maße der Luftverkehrsgeräuschbelastung mit der Fluglärmbelastigung und der berichteten Schlafstörung durch Fluglärm	70
Tabelle 6-6 - Ausprägungen der Stichproben auf den Stichprobencharakteristika (bzw. auf den Level-2-Prädiktoren der Mehrebenenmodelle).....	74

Tabelle 6-7. Überblick über die Prädiktoren und Prädiktor-Kombinationen der Modelle für die Mehrebenenanalysen.....	75
Tabelle 6-8. Ergebnisse der Modellvergleichstests der eingeschränkten Modelle (CIM) mit den jeweiligen beiden erweiterten Zwischenmodellen (AIM1 und AIM2) für HA.....	78
Tabelle 6-9. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HA</i> für Modelle der Modellgruppe L_{den} & $\log(NAT)$	82
Tabelle 6-10. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HA</i> für Modelle der Modellgruppe L_{Aeq} & $\log(NAT)$	84
Tabelle 6-11. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HA</i> für Modelle der Modellgruppe $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$	86
Tabelle 6-12. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HA</i> für Modelle der Modellgruppe Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq}	88
Tabelle 6-13. Ergebnisse des Chi-Quadrat-Differenzentests für die Modelle mit der besten Anpassungsgüte für das Kriterium HA	91
Tabelle 6-14. Odds ratios für die Effekte des Modells mit den Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$ für HA.....	92
Tabelle 6-15. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HSD</i> für Modelle der Modellgruppe L_{den} & $\log(NAT)$	96
Tabelle 6-16. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HSD</i> für Modelle der Modellgruppe L_{Aeq} & $\log(NAT)$	98
Tabelle 6-17. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HSD</i> für Modelle der Modellgruppe $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$	100
Tabelle 6-18. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für <i>HSD</i> für Modelle der Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq}	102
Tabelle 6-19. Ergebnisse des Chi-Quadrat-Differenzentests für die Modelle mit der besten Anpassungsgüte für das Kriterium HSD	104
Tabelle 6-20. Odds ratios für die Effekte des Modells mit den Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ für <i>HSD</i>	106

1 Motivation

Seit dem Jahr 2004 sind mehrere Veröffentlichungen erschienen, die nahelegen, dass sich die Fluglärmbelastung der Anwohnerinnen und Anwohner von Verkehrsflughäfen im Verlauf der Jahre geändert hat, zumindest ist der Prozentanteil hoch belastigter Personen (*percentage highly annoyed, % HA*) bei vergleichbaren Fluglärm-Dauerschallpegeln in jüngeren Untersuchungen meist höher, als die generalisierten Kurven von Miedema und Oudshoorn (2001) angeben. Diese Feststellung bestätigen u. a. die Veröffentlichungen von van Kempen und van Kamp (2005), Janssen und Vos (2009), Guski (2017) sowie Brink et al. (2019). Abbildung 1-1 zeigt Datenpunkte und geschätzte Expositions-Wirkungsbeziehungen für % HA und L_{den} (Tag-Abend-Nacht-Pegel, *day-evening-night level*) von 12 Fluglärm-Untersuchungen aus den Jahren 2003 – 2011, die im Evidenz-Review zur Belästigung durch Umgebungslärm Guski, Schreckenbergs und Schuemer (2017) im Auftrag der Weltgesundheitsorganisation (*World Health Organization, WHO*) untersucht wurden, zusammen mit den Vergleichskurven aus den Re-Analysen von Miedema und Oudshoorn (2001) sowie Janssen und Vos (2009). Dabei ist erkennbar, dass % HA in den jüngeren Fluglärm-Untersuchungen ab $L_{den} = 45$ dB teilweise deutlich höher liegen, als es der Kurve von Miedema und Oudshoorn (2001) für Fluglärm entspricht. Aus formalen Gründen konnten im WHO-Review die Daten der NORAH-Studie (Noise-Related Annoyance, Cognition, and Health; Schreckenbergs, Faulbaum, Guski, Ninke, Peschel, Spilski & Wothge, 2015) nicht einbezogen werden; hier ist der Unterschied zur Kurve von Miedema und Oudshoorn (2001) noch größer.

Solange die die Belästigungs- und Störungsurteile nicht auf bestimmte Tageszeiten eingeschränkt werden, kann der L_{den} – abgesehen von grundsätzlichen Problemen der Gewichtung der verschiedenen Tageszeiten in gewichteten 24-Stunden-Maßen – für Belästigungs- und Störungsurteile als geeigneter Prädiktor betrachtet werden. Das gilt insbesondere für die Belästigungsfrage im ICBen/ISO-Format (Fields et al., 2001; ISO/TS 15666, 2003): Hier wird die Frage auf die letzten 12 Monate bezogen und dabei nicht für eine bestimmte Tageszeit spezifiziert.

Nichtsdestoweniger bedarf das in den letzten Jahren beobachtete Ansteigen von % HA bei gleichem Dauerschallpegel einer Erklärung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich im Laufe der Jahrzehnte die Charakteristika von Fluglärm in der Nähe von Verkehrsflughäfen geändert haben. Die Geräuschpegel der einzelnen Flugzeuge sind bei vergleichbarem Betrieb im Laufe der Zeit meist geringer geworden, allerdings hat die Zahl der Flugbewegungen stark zugenommen. Vereinfacht gesagt: Die Flugzeuge sind leiser geworden, dafür fliegen sie aber häufiger. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob äquivalente Dauerschallpegel wirklich der optimale Ansatz sind, um Fluglärmwirkungen im Voraus zu schätzen. Möglicherweise sind die den Dauerschallpegeln zu Grunde liegenden Größen *Maximalpegel*, *Geräuschdauer* und *Geräuschhäufigkeit* bei anderer Verknüpfung besser mit der Belästigungs- und Störwirkung korreliert.

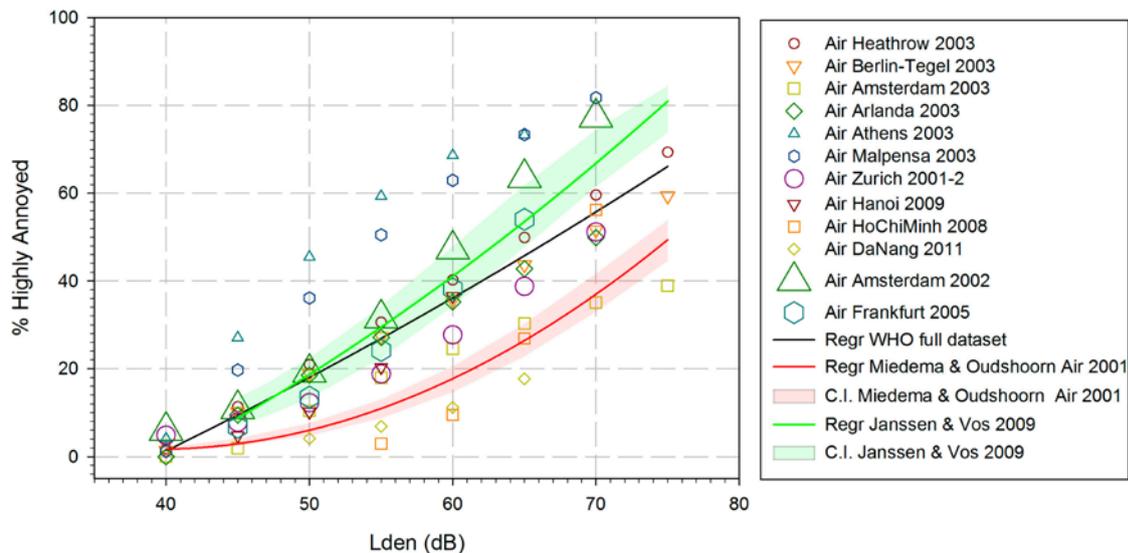


Abbildung 1-1. Zusammenhänge zwischen L_{den} und % HA (% Highly Annoyed) bei Fluglärm. Die Abbildung stammt aus dem WHO-Evidence Review for Environmental Noise Annoyance (Guski et al. 2017). Die schwarze Linie zeigt den entsprechend der Samplegröße gewichteten Mittelwert aus 12 Untersuchungen, in denen der L_{den} direkt berechnet wurde; die rote Linie zeigt die Kurve aus der Re-Analyse von Miedema und Oudshoorn (2001) und die grüne Linie zeigt die Schätzungen von Janssen und Vos (2009) anhand von 7 jüngeren Fluglärm-Untersuchungen.

1.1 Mögliche Ursachen für die erhöhte Fluglärmbelästigung in jüngeren Untersuchungen

Die Frage nach den Ursachen des *Belästigungstrends* für Fluglärm kann bislang nur teilweise beantwortet werden. In der Vergangenheit wurden v. a. methodische Gründe, der Änderungskontext am Flughafen zum Zeitpunkt der Untersuchung und der Anstieg der Flugbewegungen diskutiert. Darüber hinaus können auch eine Veränderung in der Zusammensetzung der Luftflotte und Veränderung der Einstellungen von Flughafenanwohnern gegenüber dem Flugverkehr einen Einfluss haben. Diese 5 möglichen Ursachen werden in diesem und im folgenden Abschnitt 1.2 erörtert.

Hinsichtlich **methodischer Unterschiede** zwischen älteren und jüngeren Fluglärm-Untersuchungen haben Janssen, Vos, van Kempen, Breugelmans und Miedema (2011) die Studienmerkmale von 34 Untersuchungen zwischen 1967 und 2005 auf Basis der im niederländischen Forschungsinstitut 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 Stunden) und Fensterisolation als individuelle Moderatorvariablen berücksichtigt, und Studienjahr, Kontaktart, Response-Rate sowie Art der Belästigungsskala als Gruppen-Moderatorvariablen (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 % tendenziell einen erhöhenden Einfluss auf die mittlere Belästigung hatten. Nur der Skalen-Effekt war dabei statistisch signifikant, aber mit dem Studienjahr konfundiert, da alle Untersuchungen ab 1996 im TNO-Datensatz die 11-Punkte-Skala nutzten. Somit fallen nach dieser Analyse methodische Unterschiede zwischen den Fluglärm-Untersuchungen weitgehend aus, denn da der

Belästigungstrend auch in älteren Untersuchungen auftritt, die überwiegend 4- oder 5-Punkte-Skalen benutzten, scheint die Antwortskala keinen wesentlichen Einfluss zu haben.

In Abbildung 1-1 wird nicht zwischen Untersuchungen an sog. *Bestandsflughäfen* und Untersuchungen an sog. *Änderungsflughäfen* differenziert. Das entspricht dem Vorgehen von Miedema und Oudshoorn (2001) und Janssen und Vos (2009). Dieses Vorgehen wird in der wissenschaftlichen Literatur gelegentlich unter der Annahme kritisiert, dass die Erhöhung der Belästigung bei Änderungsflughäfen ein vorübergehender Effekt ist und somit die generelle Expositions-Wirkungskurve nach oben verzerrt (vgl. Gjestland, Gelderblom, Fidell & Berry, 2015). Entsprechend fanden Gelderblom, Gjestland, Fidell und Berry (2017) keinen Trend der Belästigung, ausgedrückt als *Community Tolerance Level (CTL)*, (siehe weiter unten) in Abhängigkeit vom (Studien-) Jahr, wenn zwischen Änderungs- und Bestandsflughäfen unterschieden wird. Allerdings gibt es weder eine allgemein akzeptierte Definition der Bestands- oder Änderungssituation an Flughäfen, noch genaue Erkenntnisse über die Dauer erhöhter Fluglärmelastigung an Änderungsflughäfen und etwaige Gewöhnungsprozesse. 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 Fluglärm-Schutz-Gesetz (Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2007) 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 belastigter Personen in systematischen Befragungen führen kann.

Janssen und Guski (im Druck) haben vorgeschlagen, sowohl Änderungen im Trend der Flugbewegungszahlen als auch die öffentlich verbreitete Planung der langfristigen Erhöhung von Flugbewegungen und Verlegung von Flugrouten als Kriterien zur Definition der **Änderungssituation eines Flughafens** zu machen, und folglich alle Flughäfen mit statistisch signifikanter Änderung der Flugbewegungszahlen und/oder bis zu 3 Jahre nach Ankündigung der Änderung und nach dem Ende der öffentlichen Diskussion über diese Änderungen bzw. Änderungsabsichten als „*High-Rate-Change*“ (*HRC*)-Flughäfen zu klassieren, alle anderen als „*Low-Rate-Change*“ (*LRC*)-Flughäfen. 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. Nach welcher Zeit und in welchem Maße die Werte zurückgehen, d.h. eine Gewöhnung stattfindet, ist in der Lärmwirkungsforschung noch nicht abschließend geklärt. Die von Janssen und Guski vorgeschlagenen 3 Jahre sind 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. Griffiths und Raw (1989) haben einen Änderungseffekt bis zu 9 Jahre im Fall des Straßenverkehrs beobachtet.

Werden die in Abbildung 1-1 dargestellten Untersuchungen nach dem Vorschlag von Janssen und Guski (im Druck) hinsichtlich *LRC* und *HRC* klassiert (wobei 2 Untersuchungen wegen Unklarheiten in der *HRC/LRC*-Frage ausgeschlossen werden müssen), so zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Gruppen (siehe Abbildung 1-2).

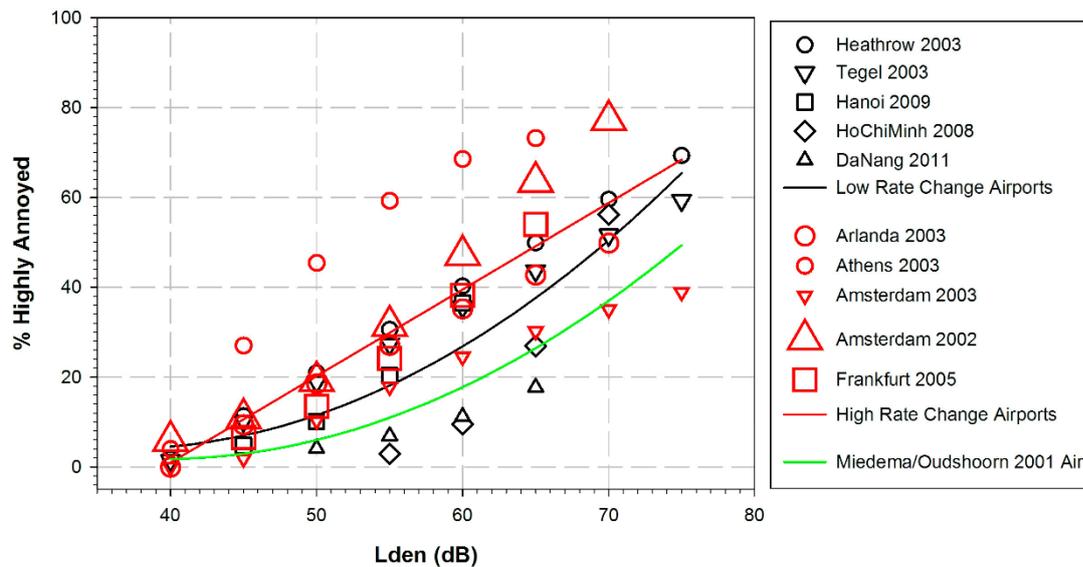


Abbildung 1-2. Zusammenhänge zwischen L_{den} und % HA (% Highly Annoyed) bei Fluglärm. Die Abbildung stammt aus dem WHO Evidence Review for Environmental Noise Annoyance (Guski et al. 2017). Die rote Linie zeigt eine nach Samplegröße gewichtete quadratische Regressionskurve durch die roten Datenpunkte aus 5 Studien an HRC-Flughäfen, die schwarze Linie die entsprechende Regressionskurve durch die schwarzen Datenpunkte aus 5 Studien an LRC-Flughäfen. Die grüne Linie zeigt die Kurve der Re-Analyse von Miedema und Oudshoorn (2001).

Allerdings liegen auch die % HA-Werte der LRC-Untersuchungen deutlich über der generalisierten Kurve von Miedema und Oudshoorn (2001); beispielsweise sind 25% der Betroffenen an LRC-Flughäfen schon bei dem gewichteten Dauerschallpegel von $L_{den} = 58$ dB hoch belästigt. In HRC-Untersuchungen finden wir 25 % HA bei einem L_{den} von ca. 53 dB.

Es ist mithin festzustellen, dass der Änderungskontext eines Flughafens einen Einfluss auf die Fluglärmbelästigung hat, der jedoch als alleinige Erklärung für die Belästigungs-Erhöhung bei vergleichbaren Dauerschallpegeln nicht ausreicht. So stellen auch die NORAH-Ergebnisse (Schreckenberget al. 2015) zum Vergleich der Flughäfen Frankfurt, Berlin-Schönefeld, Köln/Bonn und Stuttgart die Bedeutung des Änderungskontexts als Hauptursache für den Belästigungstrend in Frage: Die Flughäfen Köln/Bonn und Stuttgart können beide zum Zeitpunkt der NORAH-Befragungen (2013) als LRC-Flughäfen angesehen werden. Auch dort ergaben sich Belästigungskurven, die deutlich oberhalb der Kurve von Miedema und Oudshoorn (2001) 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. Insgesamt sprechen die NORAH-Daten zwar für einen die Belästigung beeinflussenden Effekt der Änderungssituation am Flughafen, aber dieser Einfluss ist nicht dominierend und kann nicht als Hauptursache für den Belästigungstrend gelten.

Aber auch andere auf die Flughafenregion bezogenen Kontextfaktoren können eine Erklärung für den Belästigungsanstieg über die Zeit sein:

Eine Veränderung in der Zusammensetzung der Luftflotte – der **Flottenmix**: Die Luftfahrtindustrie sucht ständig nach Möglichkeiten, ihre Flotten effizienter und wirtschaftlicher zu betreiben. Bei-

spielsweise führen die Fluggesellschaften Flugzeuge mit geringerem Treibstoffverbrauch und geänderten geometrischen Merkmalen in ihre Flotten ein, und sie können dieselbe Passagiermenge mit wenigen großen, lauten Flugzeugen oder mehr kleineren, weniger lauten Flugzeugen transportieren. Solche technischen Änderungen an der Flotte können sich mehr oder weniger deutlich auf die Art und Zusammensetzung der Fluggeräusch-Verteilung über den Tag auswirken. Ein recht einfacher Indikator für die Zusammensetzung der Flotte ist der Anteil großer (und schwerer) Flugzeuge. Coittin, Sizov & Hileman, 2016 benutzten das Verhältnis von leichten zu schweren Flugzeugen, um den Flugzeugflotten-Mix anzugeben. Auch wenn die Wirkung dieses Parameters auf die Belästigung der Flughafenanrainer zur Zeit noch unklar ist, erscheint es lohnend, den Trend der Fluglärmbelästigung im Laufe der Zeit in Bezug auf den Flottenmix eines Flughafens als Ganzes oder sogar unter bestimmten Flugwegen zu untersuchen.

Eine **Veränderung der Einstellungen von Flughafenwohnern gegenüber dem Flugverkehr**: In politischen Kontexten ist manchmal zu hören, dass die Menschen in den letzten Jahren möglicherweise empfindlicher auf Lärm reagiert haben. Was auch immer dieser Ausdruck genau bedeuten mag, es gibt in früheren Lärmumfragen keinen Hinweis darauf, dass die persönliche Lärmempfindlichkeit im Allgemeinen im Laufe der Zeit zugenommen hat. Allerdings wissen wir, dass das Ausmaß des Misstrauens der Lärmbetroffenen gegenüber den Verantwortlichen für Lärm und Lärmschutz in mehreren Untersuchungen (z. B. in NORAH) mit der Lärmbelästigung korreliert, und es ist denkbar, dass es einen parallelen zeitlichen Trend der Misstrauens und der Lärmbelästigung gibt. Diese Annahme kann im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden. Eine ausführlichere Diskussion zum möglichen Effekt der Veränderung der Einstellungen von Flughafenwohnern auf die Veränderung in der Belästigung findet sich in Guski (2017).

Der Kontextfaktor **Ereignishäufigkeiten bzw. Anstieg der Flugbewegungen** wird im folgenden Abschnitt ausführlich behandelt.

1.2 Ereignishäufigkeiten und Belästigung

Die meisten Untersuchungen zur Fluglärmbelästigung analysieren hauptsächlich den Zusammenhang zwischen zeitlich gewichteten oder zeitlich ungewichteten Dauerschallpegeln und Belästigung (bzw. hoher Belästigung). Wenn zusätzlich Auswertungen zum Zusammenhang zwischen Ereignishäufigkeiten und Belästigung durchgeführt werden, zeigen sich in der Regel auch systematische statistische Zusammenhänge in ähnlicher Höhe (vgl. Tabelle 1-1).

Ereignishäufigkeiten von Flugbewegungen werden üblicherweise als NAT_x („Number above Threshold“; Häufigkeit der Überschreitung der Schwelle X dB) angegeben. Hierbei handelt es sich um eine sehr grobe Variable, weil sie keine Information über die jeweilige Pegelhöhe der Überschreitungen enthält. Beispielsweise kann $NAT_{69} = 10$ jeden beliebigen Pegel oberhalb von 69 dB bedeuten, d.h. es kann sich um 10 x 70 dB, aber auch 10 x 100 dB handeln, um nur zwei von endlos vielen Beispielen zu nennen.

Ein älteres Beispiel für den Zusammenhang zwischen der Anzahl von lauten Überflügen mit maximalen A-bewerteten Schalldruckpegeln $L_{AS,max}$ (außen, hier kurz *Maximalpegeln* genannt) über 69 dB (hier NAT_{69} genannt) und % A und % HA zeigt die Untersuchung von Rylander und Björkman (1997) an 3 kleineren schwedischen Flughäfen (8 Untersuchungsgebiete, $N = 513$). In der Originalarbeit werden zwar die „Hochbelästigten“ (HA, *highly annoyed*) definiert als jene Personen, die die oberen bei-

den Punkte der 4-Punkt-Antwortskala benutzt haben (das entspricht einem einem cut-off-Wert für die Definition von *HA* von 50 % 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 (cut-off-Wert für *HA* = 74 %). Diese *HA*-Definition ähnelt eher der (bisher) international üblichen Definition von Miedema und Oudshoorn (2001; cut-off-Wert für *HA* = 72 %), und daraus wurde eine neue Abbildung zum Zusammenhang zwischen Überflughäufigkeit (NAT_{69}) und *HA* erzeugt (s. Abbildung 1-3).

Tabelle 1-1. Korrelationen zwischen Fluglärmbelastigung (Rohwert) und akustischen Prädiktoren in verschiedenen Studien.

Studie	Jahr Erhebung	$L_{Aeq,T}$	N (<i>NAT</i>)	log <i>N</i>	<i>NNI</i>	Design
McKinnell (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	<i>NNI</i>
Hede & Bullen (1982)	1980	(.36)	(.26)			(L)
Gjestland et al. (1990)	1989	.42				L
Brink et al. (2005): Lärmstudie 2000	2001	.31	(.32)		.32	R
Schreckenber & Meis (2006) (NAT_{70})	2005	.45	(.34)		.40	L
NORAH FRA ($NAT_{55,06-22h}$)	2011	.47	.37			L
NORAH FRA ($NAT_{55,06-22h}$)	2012	.47	.39			L
NORAH FRA ($NAT_{55,06-22h}$)	2013	.47	.40			L
NORAH BER ($NAT_{55,06-22h}$)	2012	.50	.49			L
NORAH CGN ($NAT_{55,06-22h}$)	2013	.42	.31			L
NORAH STR ($NAT_{55,06-22h}$)	2013	.59	.56			L

Anmerkungen.

() = nicht vollständig vergleichbar. L = Stichproben-Stratifizierung nach Pegeln; R = Random-Design (keine Stratifizierung nach Pegel oder Bewegungshäufigkeit); N = Stratifizierung nach 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 Schreckenber et al. (2015). $L_{Aeq,T}$ = Dauerschallpegel über die Tagesbezugszeit T; *NAT* = *Number above Threshold*; *NNI* = *Number Noise Index*.

Rylander & Björkman 1997 re-analysis

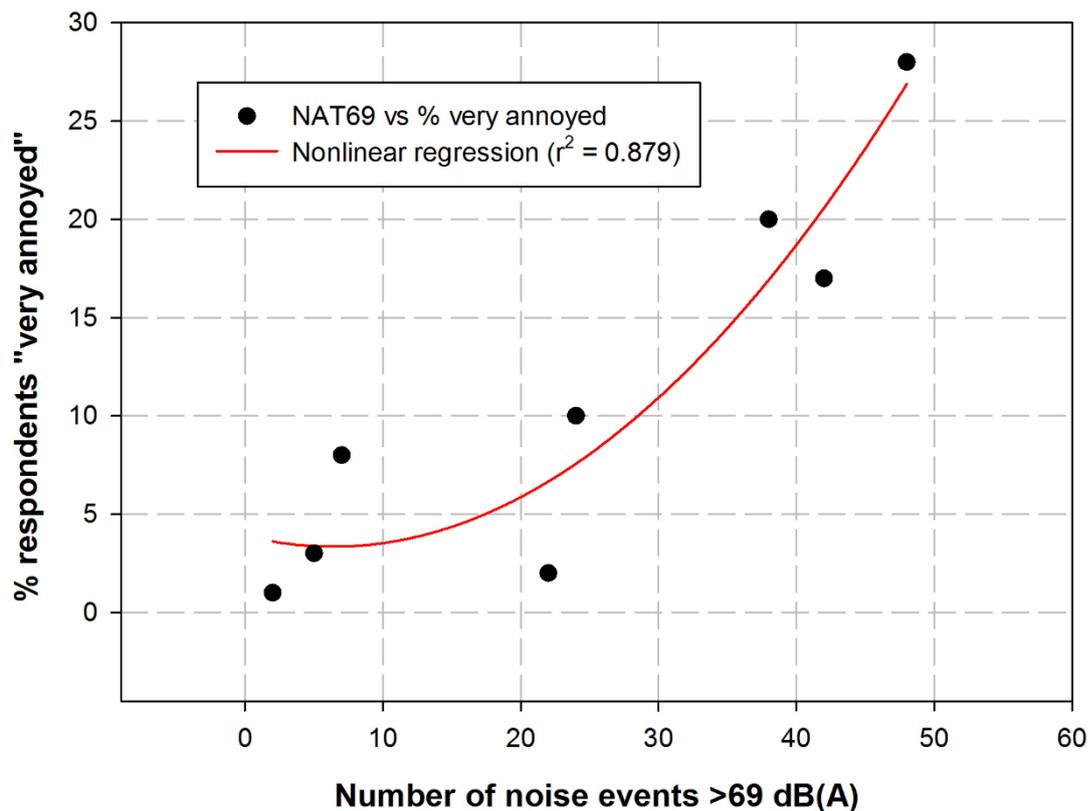


Abbildung 1-3. Re-Analyse von Daten aus Rylander und Björkman (1997) zum Zusammenhang zwischen der Anzahl von Fluglärmereignissen mit Maximalpegeln über 69 dB (NAT_{69}) und dem Prozentsatz hoch belastigter Untersuchungspersonen [Mittelwert pro Untersuchungsgebiet]. Die Grafik basiert auf den Tabellen 1 und 2 in Rylander und Björkman (1997).

In der Untersuchung von Rylander und Björkman (1997) zeigt sich ein deutlicher nichtlinearer Zusammenhang zwischen NAT_{69} und % HA ($R^2 = 0.879$), und dieser Zusammenhang ist stärker als der entsprechende Zusammenhang mit dem Fluglärmbewertungsmaß FBN ($R^2 = 0.485$), einem L_{Aeq} -basierten Dauerschallpegel, der 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 Maximalpegeln über 69 dB 25 % der Betroffenen hoch belastigt fühlten.

Ein jüngeres Beispiel für den Zusammenhang zwischen Belästigung und der Flugbewegungszahl findet sich in der Studie ANASE (Attitudes to Noise from Aviation Sources in England; MVA Consultancy, 2007), die im Jahre 2005 in insgesamt 76 Untersuchungsgebieten in der Nähe von 19 britischen Verkehrsflughäfen durchgeführt wurde. Da bei der Stichprobenziehung auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Maximalpegeln und Bewegungshäufigkeit (operationalisiert als Luftverkehrsgeräusch mit Maximalpegel > 65 dB, d.h. NAT_{65}) 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

mittleren Maximalpegeln und Belästigung als kleiner im Vergleich zum Zusammenhang zwischen Flugbewegungshäufigkeit und Belästigung. Ein Beispiel zeigt Abbildung 1-4, in der auch die Mittelwerte der älteren britischen ANIS-Studie (United Kingdom Aircraft Noise Index Study; Brooker, Critchley, Monkman & Richmond, 1985; 5 Flughäfen, Datenerhebung 1982) eingetragen sind.

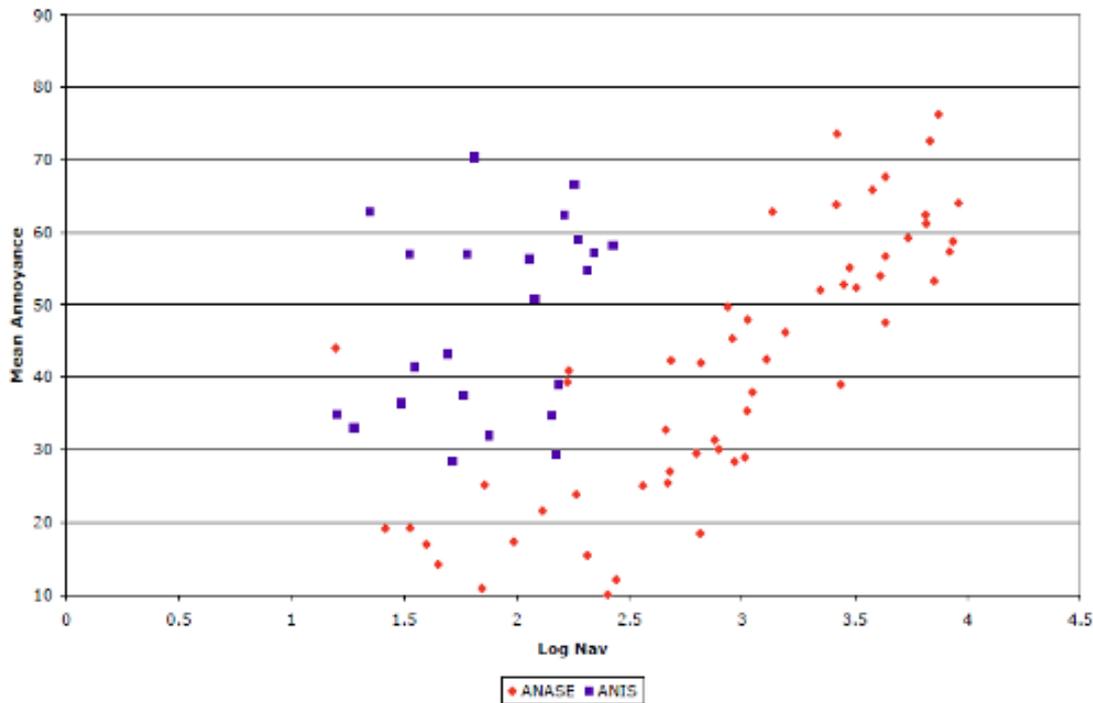


Figure 9.7 Mean Annoyance against Log Nav for ANIS and ANASE

Abbildung 1-4. 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; aus MVA Consultancy, 2007, S. 9.13).

Der Vergleich der älteren ANIS-Studie mit der jüngeren ANASE-Studie allein auf der Basis der Flugbewegungszahlen ist schwer interpretierbar, weil sich der Typenmix an Verkehrsflughäfen im Zeitraum 1985 – 2005 erheblich geändert hat: während die einzelnen Flugzeuge früher vergleichsweise lauter waren und seltener vorkamen, gibt es heute etwas leisere, dafür aber mehr Flugzeuge. Dies wird in Abbildung 1-5 berücksichtigt.

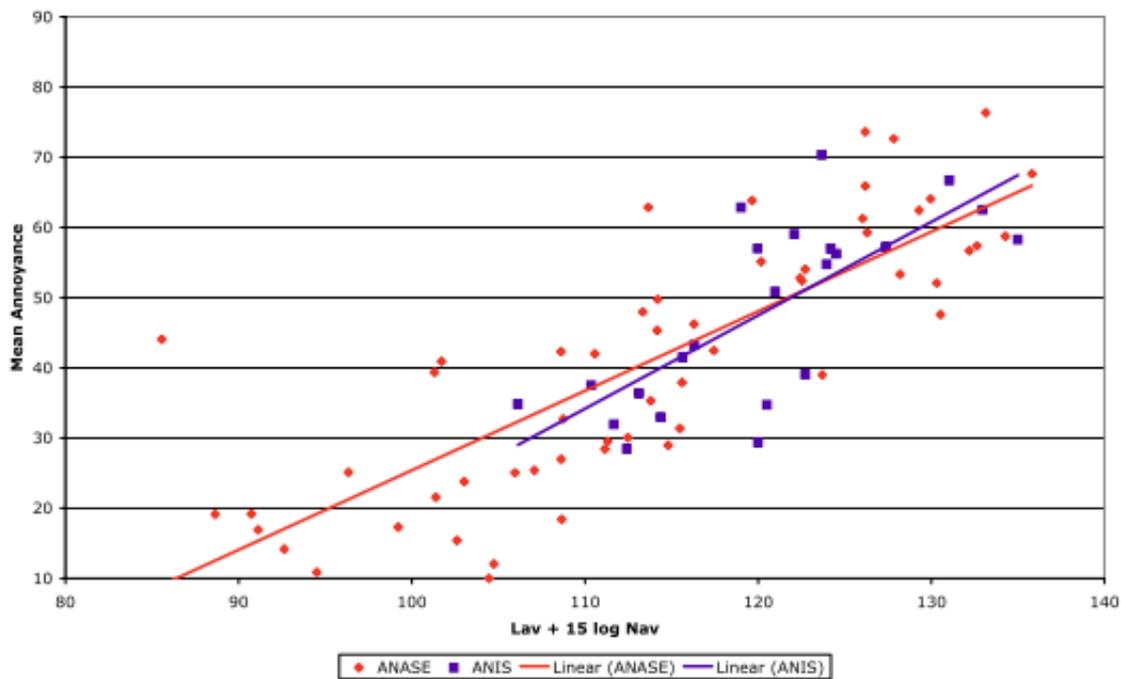


Figure 9.9 Mean Annoyance against Lav + 15 log Nav

Abbildung 1-5. Zusammenhang zwischen der Kombination aus Maximalpegel (Lav) und logarithmierter Flugbewegungszahl (log Nav) einerseits und mittlerer Belästigung andererseits. Kombinierte Darstellung der älteren ANIS-Ergebnisse (blaue Punkte; Brooker et al., 1985) und denen der jüngeren ANASE-Studie (rote Punkte; MVA Consultancy, 2007; aus MVA Consultancy, 2007, S. 9.16).

Die ANASE-Autoren geben keine Korrelationskoeffizienten auf Individualdatenbasis an, jedoch zeigt Abbildung 1-4 einen deutlichen linearen 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, S. 9.18; Übersetzung RG). Kombiniert man mittlere Maximalpegel und die Anzahl der Flugbewegungen in einer Form, die dem alten Number Noise Index (NNI) ähnelt (Abbildung 1-5), dann scheint kein Belästigungstrend zu existieren, zumindest verschwindet der Unterschied zwischen den Ergebnissen der älteren ANIS- und der jüngeren ANASE-Studie. Hier muss allerdings angeführt werden, dass die ANIS-Studie auf NNI-Werten und damit Perceived Noise Level-Werten aufsetzte. Zur Umrechnung wurde eine vergleichsweise grobe Näherungsbeziehung verwendet. Außerdem wurden die Maximalpegel bei ANIS logarithmisch gemittelt, während bei ANASE ein arithmetischer Mittelwert betrachtet wurde.

Die derzeit neueste Veröffentlichung zum Zusammenhang zwischen Fluglärmelastung und Gesamtzahl der Flugbewegungen eines Flughafens stammt von Gjestland und Gelderblom (2017). Die

Autoren nutzten Daten von 39 Fluglärm-Untersuchungen (1973 bis 2015) und berechneten die sog. *CTL*-Werte (*Community Tolerance Level*) für jede Untersuchung. Der *CTL* ist definiert als derjenige *DNL*-Wert (*Day-Night Level*), bei dem 50 % der Befragten hoch belästigt sind (Fidell et al., 2011). Das Kriterium für hohe Belästigung ist zwar beim *CTL*-Ansatz generell nicht genau definiert, jedoch geben Gjestland und Gelderblom (2017) an, dass die meisten der von ihnen herangezogenen Untersuchungen Belästigungsangaben oberhalb von 72 % der Skalenlänge als *hoch belästigt* (*HA*) ansehen. Die Autoren bringen die *CTL*-Werte aller 39 Untersuchungen in einen Zusammenhang mit den jährlichen Flugbewegungen zum Zeitpunkt der Untersuchungen und kommen zu dem Schluss, dass die *CTL*-Werte mit zunehmender Flugbewegungszahl tendenziell sinken, d.h. mit steigender Flugbewegungszahl die *DNL*-Werte, die mit 50 % Hochbelästigten verbunden sind, tendenziell kleiner werden (s. Abbildung 1-6). Der *CTL*-Ansatz aggregiert mit Hilfe spezieller Annahmen Daten aus einer ganzen Untersuchung, d.h. es gibt keine Information über die individuellen Fluglärm-Belastungen und Belästigungen der einzelnen Befragten, auch nicht über den jeweiligen Typenmix an den untersuchten Flughäfen, aber die hier vorgelegten Ergebnisse können als Hinweis darauf interpretiert werden, dass die Fluglärmbelastung auch in jüngeren Untersuchungen tendenziell mit zunehmender Flugbewegungszahl steigt.

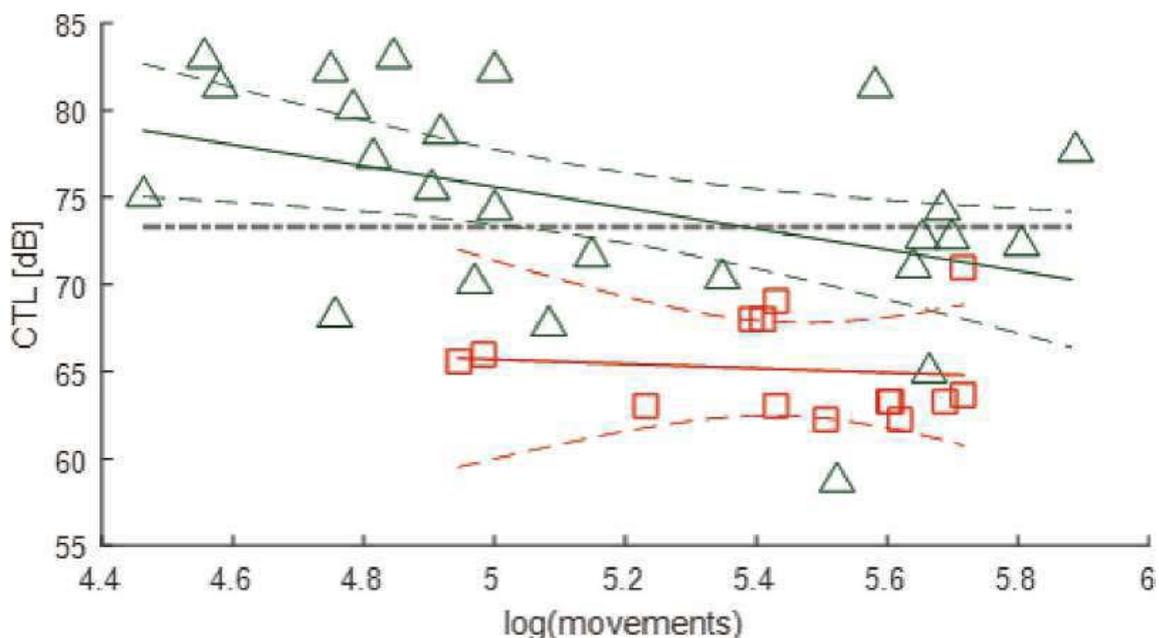


Abbildung 1-6. Zusammenhang zwischen "Community Tolerance Level" (CTL) und jährlicher (logarithmierter) Flugbewegungszahl in 39 Fluglärm-Untersuchungen (aus Gjestland & Gelderblom 2017, Fig. 3). Rote Quadrate beziehen sich auf Daten an HRC-Flughäfen, grüne Dreiecke auf Daten LRC-Flughäfen. Die grüne Linie bezieht sich auf LRC-Dreiecke, die rote auf HRC-Quadrate und die schwarze gestrichelte Linie auf die Kurve der Re-Analyse von Miedema & Oudshoorn (2001).

Gjestland und Gelderblom (2017) haben darüber hinaus die 39 Fluglärm-Untersuchungen entsprechend dem Vorschlag von Janssen und Guski (im Druck) hinsichtlich der Änderungsrate in *HRC* und *LRC* klassiert und herausgefunden, dass der statistische Zusammenhang zwischen *CTL* und Flugbewegungszahl im Fall von *LRC*-Flughäfen deutlich größer ist als im Fall vom *HRC*. Die Autoren interpretie-

ren dies als einen Hinweis darauf, dass die physikalischen Determinanten hoher Belästigung bei Flughäfen mit hoher Änderungsrate weniger wichtig sind als die (sozialen und administrativen) Umstände, unter denen sich der jeweilige Flughafen ändert. Allerdings ist anzumerken, dass die statistische Spannweite der Flugbewegungszahl bei den analysierten *HRC*-Flughäfen deutlich kleiner ist als bei den *LRC*-Flughäfen. Da eine geringere Spannweite meist mit geringeren Chancen für höhere Korrelationen verbunden ist, kann der festgestellte Unterschied zwischen *HRC*- und *LRC*-Flughäfen auch methodische Ursachen haben.

Im Rahmen des NORAH-Projekts wurden Anwohnerinnen und Anwohner der Flughäfen Frankfurt (FRA), Köln/Bonn (CGN), Stuttgart (STR) und Berlin-Schönefeld (bzw. Berlin-Brandenburg, BER) interviewt, und ihre individuelle akustische Belastung durch Fluglärm u. a. hinsichtlich der Dauerschallpegel und Überschreitungshäufigkeit für bestimmte Pegelschwellen (z. B. NAT_{55} , NAT_{70}) beschrieben. Bisher wurden die Belästigungswerte nur hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit Dauerschallpegeln ausführlich analysiert (vgl. Schreckenberget al., 2015).

Für die Kombination eines Maximalpegel- und *NAT*-Kriteriums wurden in der NORAH-Studie Sensitivitäts-Regressionsanalysen zur Vorhersage des Grades der Fluglärmbelastung auf der 5-stufigen ICBEN-Skala (Fields et al., 2001) und berichteter Schlafstörungen im Wertebereich von 1 bis 5 durch die Kombination von NAT_{55} und dem Maximalpegel $L_{AS,max}$ für die Tages- (06-22 Uhr) bzw. Nachtzeit (22-06 Uhr) durchgeführt und die Güte dieser Modelle mit der Vorhersage durch den Dauerschallpegel für die Tages- bzw. Nachtzeit verglichen (Anhang 3.1 zum Endbericht von Schreckenberget al., 2015). Als Maximalpegel wurde der $L_{AS,max,06-22h}$ für den Tag bzw. der $L_{AS,max,06-22h}$ für die Nacht verwendet (hier: der höchste Maximalpegel, der von mindestens 6 Flugereignissen erreicht wird). Als *NAT*-Kriterium wurde der $NAT_{55,06-22h}$ für den Tag und der $NAT_{55,22-06h}$ für die Nacht verwendet. Die Modellgüte wurde anhand des Akaike Informationskriteriums *AIC* sowie des Bayesian informationskriteriums *BIC* bestimmt (vgl. Burnham & Anderson, 2004; Fahrmeir, Kneib & Lang, 2009).

Tabelle 1-2 zeigt, dass die Fluglärmbelastung an den untersuchten vier Flughäfen, vorhergesagt durch den Dauerschallpegel für den Tag, eine geringfügig bessere Modellgüte aufweist als bei Vorhersage durch die Kombination aus Maximalpegel und *NAT*-Kriterium. Sie zeigt aber auch, dass die Unterschiede gering sind, d.h. dass auch die Modelle mit Maximalpegel und *NAT*-Kriterium als Prädiktoren eine Modellgüte vergleichbarer Größenordnung wie die Modelle mit dem Dauerschallpegel als Prädiktor aufweisen.

Weiterhin ist der Tabelle 1-2 zu entnehmen, dass die berichteten Schlafstörungen meist geringfügig besser durch die Kombination von Maximalpegel und *NAT*-Kriterium erklärt werden als durch den Dauerschallpegel für die Nacht allein. Wenn wir davon ausgehen, dass die berichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen auch zum Urteil über die Fluglärmbelastung beitragen, die „insgesamt“ erhoben wurde, d.h. ohne Einschränkung auf den Tag oder die Nacht, dann können wir weiterhin postulieren, dass die Wirkung des nächtlichen Fluglärms auf die Fluglärmbelastung etwas besser (im Sinne einer höheren Modellgüte) durch die Kombination von Maximalpegel und Ereignishäufigkeit – bezogen auf 24 Stunden – als durch den Dauerschallpegel beschrieben wird. Zudem ist festzustellen, dass die Sensitivitätsanalysen für andere Schwellenwerte als 55 dB bisher nicht durchgeführt wurden, die vorliegenden Daten der Maximalpegelverteilung von < 50 dB bis 120 dB allerdings eine Re-Analyse mit weiteren Schwellenwerten zulassen.

Tabelle 1-2. Modellgüte linearer Regressionen zur Fluglärmbelastigung insgesamt und berichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen. *Modell 1: L_{pAeq} (für Tag bzw. Nacht) als Prädiktor. Modell 2: $L_{pAmax,06-22h}$ und NAT_{55} (jeweils für Tag bzw. Nacht) als Prädiktoren (aus Schreckenberget al., 2015, Anhangsband).*

Flughafen Erhebungsjahr	Modell 1				Modell 2			
	Akustischer Kennwert für Fluglärmexposition							
	L_{pAeq}				$L_{pAmax} + NAT_{55}$			
	df	Chi-Q.	Chi-Q./df	AIC	df	Chi-Q.	Chi-Q./df	AIC
Abhängige Variable: Fluglärmbelastigung								
FRA 2011	9.240,00	13.047,40	1,41	29.424,77	9.239,00	13.339,65	1,44	29.631,52
FRA 2012	4.863,00	6.487,15	1,33	15.216,33	4.862,00	6.560,72	1,35	15.273,21
FRA 2013	3.505,00	4.759,93	1,36	11.033,86	3.504,00	4.837,62	1,38	11.092,67
BER	6.037,78	5.545,00	1,09	16.221,90	6.079,11	5.544,00	1,10	16.261,74
CGN	4.281,95	2.951,00	1,45	9.487,76	4.407,42	2.950,00	1,49	9.575,07
STR	2.222,70	1.976,00	1,12	5.853,99	2.260,43	1.975,00	1,14	5.889,29
Abhängige Variable: Fluglärmbedingte Schlafstörungen								
FRA 2011	9.229,00	13.075,43	1,42	29.420,56	9.228,00	12.986,57	1,41	29.359,61
FRA 2012	4.852,00	6.254,06	1,29	15.015,29	4.851,00	6.068,43	1,25	14.871,00
FRA 2013	3.502,00	4.329,70	1,24	10.695,40	3.501,00	4.211,68	1,20	10.600,53
BER	5.448,18	5.534,00	0,98	15.631,79	5.427,21	5.533,00	0,98	15.612,43
CGN	4.428,81	2.948,00	1,50	9.580,64	4.498,14	2.947,00	1,53	9.628,48
STR	1.406,62	1.972,00	0,71	4.942,54	1.379,35	1.971,00	0,70	4.905,87

Anmerkungen.

df = Freiheitsgrad; Ch-Q = Chi-Quadrat; AIC = Akaike Informationskriterium; FRA = Frankfurt; BER = Berlin-Brandenburg; CGN = Köln/Bonn; STR = Stuttgart.

Angesichts der Ähnlichkeit der Ergebnisse des bisherigen Modellvergleichs ist zu fragen, ob sich der Aufwand einer Re-Analyse der Daten verschiedener greifbarer Studien lohnt. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass alle in den obigen Vergleichen benutzten Stichproben aus NORAH nach einem L_{Aeq} -Kriterium stratifiziert wurden, und somit schon aus statistischen Gründen für L_{Aeq} -bezogene akustische Maße eine höhere Chance für signifikante Zusammenhänge mit Belastigungsvariablen besteht als für andere akustische Maße. Insofern ist es bemerkenswert, dass auch die Kombination aus Maximalpegel und NAT als Prädiktor in dieser Stichprobe ähnlich hohe Zusammenhänge mit der Belastigung erbringt wie der L_{Aeq} . Die Korrelation zwischen Tages- L_{Aeq} und Tages- NAT_{55} beträgt im FRA-Panel (2011) $r = 0.80$ – entsprechend sind ähnlich hohe Korrelationen zwischen Tages- L_{Aeq} und Belastigung einerseits und Tages- NAT_{55} und Belastigung andererseits zu erwarten. Die Korrelation zwischen Tages-Maximalpegel und Tages- NAT_{55} beträgt $r = 0.62$; für die Nacht sind die Korrelationen leicht höher. In der Stichprobe des Flughafens STR korrelieren die entsprechenden akustischen Werte um $r = 0.90$. Geringere Korrelationen sind v.a. dann zu erwarten, wenn die Stichproben nicht speziell nach einem bestimmten akustischen Kriterium stratifiziert wurden.

Diese kurze Darstellung der Zusammenhänge zwischen auf Ereignishäufigkeiten bezogene akustische Parameter einerseits und Belastigungs-Variablen andererseits zeigt zwar, dass die Hinzuziehung von Ereignishäufigkeiten zu energetischen Dauerschallpegeln und Maximalpegeln unter bestimmten Umständen eine bessere Vorhersage von Belastigungs- und Störungswirkungen bringen kann, jedoch

bleibt unklar, wieweit solche Verbesserungen abhängig vom jeweiligen Flugbetrieb (z. B. Typenmix) und der Stichprobenziehung sind.

1.3 Annahmen

In diesem Forschungsprojekt werden verschiedene mögliche Ursachen für den Fluglärmbelästigungstrend empirisch untersucht. Im Zentrum der Betrachtung stehen dabei die Anzahl der Flugbewegungen und Flughafen-spezifische Charakteristika. Speziell wird angenommen, dass der Fluglärmbelästigungstrend teilweise dadurch bedingt ist, dass die Anzahl der Flugbewegungen für die Belästigungsurteile eine beträchtliche Rolle spielt und im energie-äquivalenten Dauerschallpegel nicht wirkungsäquivalent berücksichtigt wird. Eine weitere Annahme bezieht sich auf Flughafencharakteristika, die die spezifischen Merkmale eines bestimmten Flughafens zu einem bestimmten Zeitpunkt oder während einer bestimmten Zeitperiode darstellen. Es wird angenommen, dass diese Charakteristika, die teilweise ebenfalls die Anzahl der Flugbewegungen abbilden oder mit diesen zusammenhängen, ebenfalls systematisch mit erhöhten Belästigungs- und Störungsurteilen zusammenhängen, jedoch durch rein akustische Deskriptoren nicht ausreichend repräsentiert werden.

Darauf aufbauend werden folgende Annahmen und Untersuchungsziele postuliert:

1. *Einbezug stärker an der Häufigkeit von Flugbewegungen orientierten akustischen Prädiktoren:* Die Vorhersageleistung eines am L_{Aeq} oder am Maximalpegel orientierten akustischen Deskriptors als Prädiktor für Belästigungen bzw. Störungen steigt, wenn zusätzlich ein Häufigkeitsterm N (z. B. NAT_x) oder ein komplexeres Maß hinzugefügt wird, das möglichst genau die Anzahl der hörbaren Überflüge an einer Wohnadresse beschreibt.
2. *Einbezug von Flughafencharakteristika:* Die Vorhersageleistung eines oder mehrerer akustischer Deskriptoren als Prädiktoren für Belästigungen bzw. Störungen steigt, wenn die spezifischen Merkmale eines bestimmten Flughafens zu einer bestimmten Zeit (Flughafencharakteristika) hinzugefügt werden.

Beide Annahmen werden anhand der zentralen Kennwerte der Fluglärmwirkungsforschung und Lärmaktionsplanung – % HA als Kriterium für hohe Belästigung und % HSD als Kriterium für starke Schlafstörungen – untersucht.

2 Verfügbare sozio-akustische Datensätze

Die Annahmen werden an bereits bestehenden Datensätzen mit individuellen Belästigungs- und Störungsurteilen und adressbezogenen akustischen Belastungsvariablen untersucht.

Es liegen Datensätze aus zwei Schweizer und zwei deutschen Studien vor, in denen die Belästigungs- und Störungswirkungen von Fluglärm untersucht wurden. Wie im Folgenden näher dargelegt wird, gehen insgesamt Daten aus Studien von 7 verschiedenen Flughäfen (3 Schweizer – Basel, Genf und Zürich, sowie 4 deutsche – Berlin-Brandenburg, Frankfurt, Köln/Bonn und Stuttgart) in unsere Re-Analyse ein, die in den Jahren 2001 bis 2015 erhoben wurden. Diese stammen aus 12 unterschiedlichen „Stichproben“, wobei wir eine Stichprobe in diesem Bericht verstehen als eine bestimmte und eindeutige Kombination aus Untersuchungsflughafen und Erhebungszeitraum. Das heißt, an jedem der untersuchten Flughäfen kann mehr als eine Stichprobe erhoben worden sein. Wir bezeichnen jede der 12 Stichproben in diesem Bericht durch ein 7-stelliges Kürzel aus dem IATA-Code des Flughafens plus dem (ersten) Erhebungsjahr der jeweiligen Stichprobe (z.B. *FRA2013*). Diese Kürzel, die im weiteren Verlauf dieses Berichts als Bezeichnungen für die verschiedenen Stichproben verwendet werden, sind in der letzten Spalte von Tabelle 2-1 aufgeführt. Insgesamt ergibt sich für diese Re-Analyse über alle 12 Stichproben eine Gesamtstichprobengröße von $N = 37701$ (darunter 17802 bzw. 51.99 % weiblich). Die Untersuchungsteilnehmer/-innen waren zum Zeitpunkt der jeweiligen Erhebung 17 – 100 Jahre alt ($M = 55.2$, $SD = 16.3$).

- Die ursprünglichen Studien, denen die 12 Stichproben entnommen sind, werden in der folgenden Auflistung dargestellt: *Lärmstudie (LS) 2000* (Brink, Wirth, Schierz, Thomann & Bauer, 2008): Eine Random-Stichprobe aus der Umgebung des Flughafens Zürich: Stichprobe **ZRH2001** ($n = 1816$) und Stichprobe **ZRH2003** ($n = 1719$, davon 394 Personen (23 %), die an der Befragung in 2001 teilgenommen haben).
- *SiRENE-Studie (Short and Long Term Effects of Transportation Noise Exposure; Brink et al., 2019)*: Eine nach Flug-, Straßen- und Schienenlärm- L_{Aeq} sowie Intermittenz (vgl. Wunderli et al. 2015) stratifizierte Stichprobe an den Flughäfen Basel (**BSL2014**; $n = 348$), Genf (**GVA2014**; $n = 742$) und Zürich (**ZRH2014**; $n = 2035$). Befragung in vier Wellen über die Jahre 2014 und 2015.
- *RDF-Studie (Studie im Auftrag des Regionalen Dialogforum Flughafen Frankfurt, RDF; Schreckenberger, Meis, Kahl, Peschel & Eikmann, 2010)*: Querschnittsstudie am Flughafen Frankfurt 2005 ($n = 2312$; Stichprobe **FRA2005**); die Stichprobe wurde stratifiziert nach Luftverkehrs-Tagesdauerschallpegelklassen gezogen.
- *NORAH-Studie (Schreckenberger, Faulbaum, Guski, Ninke, Peschel, Spilski & Wothge, 2015)*: Die Studie wurde an mehreren deutschen Flughäfen durchgeführt (Frankfurt, Berlin-Schönefeld, Köln/Bonn, Stuttgart; in Frankfurt in mehreren Teilstudien und in einer Teilstudie in mehreren Erhebungswellen) und beinhaltet mehrere Stichproben:
 - Zwei Querschnittsstudien mit Fluglärm- und Straßenverkehrslärm- L_{Aeq} (FRA-Straße, $n = 3172$) und Schienenverkehrslärm- L_{Aeq} (FRA-Schiene, $n = 3307$)

und eine Querschnittsstudie, für die Wohngebiete gewählt wurden, in denen der 24-Stunden Dauerschallpegel für Luft- und Straßenverkehrsgeräusche bzw. Luft- und Schienenverkehrsgeräusche in die jeweils gleiche 2.5 dB- $L_{Aeq,24h}$ -Klasse fiel (FRA-Kombi, $n = 634$).

- Anzumerken ist, dass bei den beiden NORAH-Teilstudien „FRA Straße“ und „FRA Schiene“ Personen untersucht wurden, bei denen Fluglärm überwiegend nicht die dominante Quelle ist. In diesem Vorhaben werden allerdings nur die auf Fluglärm bezogenen Daten analysiert. In Tabelle 2-1 sind die Teilstudien „FRA Straße“, „FRA-Schiene“ und „FRA-Kombi“ zu einer Stichprobe (**FRA2012**) zusammengefasst worden.
- Die Querschnittsstudien fanden im Änderungskontext statt. Im Oktober 2011 wurde eine neue, vierte Landebahn in Betrieb genommen sowie ein Nachtflugverbot von 23 bis 5 Uhr eingeführt. Die Erhebungen fanden im Jahr danach, 2012, statt.

Fünf nach Fluglärm- L_{Aeq} stratifizierte Zufallsstichproben aus der Umgebung der Flughäfen Frankfurt (FRA), Berlin-Schönefeld (BER), Köln/Bonn (CGN) und Stuttgart (STR): **FRA2011** (NORAH Panelstudie, 1. Welle, $n = 9244$), **FRA2013** (NORAH Neurekruitierte, $n = 2400$), **BER2012** (NORAH, $n = 5.548$), **CGN2012** (NORAH, $n = 2955$) und **STR2013** (NORAH, $n = 1979$).

Tabelle 2-1 fasst die verfügbaren Stichproben zusammen.

Hinweis: Diskrepanzen zwischen den hier angegebenen Stichprobengrößen und denen in den jeweiligen Originalstudien ergeben sich aufgrund fehlender Werte einzelner oder mehrerer Probanden und Probandinnen bei für dieses Projekt zentralen Variablen.

Tabelle 2-1. Verfügbare Stichproben und Bezeichnungen der Stichproben in diesem Bericht.

Studie	Flughafen (IATA-Code)	Jahr der Erhebung	N	Stratifizierung	Stichproben-Bez.
LS2000	Zürich (ZRH)	2001	1816	Zufallsziehung	ZRH2001
		2003	1719 ¹		ZRH2003
SiRENE	Basel (BSL)	2014, 2015	348	Zufallsziehung geschichtet nach L_{Aeq} für Luft-, Straßen- und Schienenverkehr sowie nach Intermittenz	BSL2014
	Genf (GVA)		742		GVA2014
	Zürich (ZRH)		2035		ZRH2004
RDF	Frankfurt (FRA)	2005	2312 (1609) ²	Zufallsziehung geschichtet nach L_{Aeq} -Klassen für Luftverkehr	FRA2005
NORAH	Berlin-Brandenburg (BER)	2012	5548	Zufallsziehung geschichtet nach L_{Aeq} -Klassen für Luftverkehr	BER2012
	Köln/Bonn (CGN)	2013	2955		CGN2013
	Stuttgart (STR)	2013	1979		STR2013
	Frankfurt (FRA)	2011	9244	Zufallsziehungen geschichtet nach L_{Aeq} -Klassen für Luft- bzw. Straßen- und Schienenverkehr	FRA2011
	- FRA Panel, 1. Welle				
- FRA Straße/Schiene/Kombi	2012	7113	FRA2012		
- Neurekruitierte (Kontrollgruppe zum Panel)	2013	2400	FRA2013		
Gesamt			37701		

Anmerkungen.

Stichproben-Bez.: Bezeichnung bzw. Kürzel der jeweiligen Stichprobe in diesem Bericht.

¹ Von den 1719 Personen hatten 394 Personen (23 %) bereits an der Befragung im Jahr 2001 teilgenommen.

² Kontrollberechnungen zu den Daten der RDF-Studie auf einem 100 m x 100 m Raster der äquivalenten Dauerschallpegel $L_{Aeq,Tag}$, $L_{Aeq,Nacht}$ und $L_{Aeq,24h}$ führten in Wohngebieten nordwestlich des Flughafens zu nicht erklärba- ren Abweichungen im Vergleich zu den Berechnungen in der ursprünglichen Studie. Zur Klärung dieser Abwei- chungen stehen die dafür nötigen Informationen nicht mehr zur Verfügung. Daher wurden für diese Gebiete keine Neuberechnungen ergänzender akustischer Maße (Maximalpegel, NAT-Kriterien, äquivalenten Dauer- schallpegel mit $k = 20$ und $k = 30$) vorgenommen. Dies betrifft 703 Personen.

3 Akustische Analysen

Im Folgenden werden die akustischen Kenngrößen und die jeweilige Datenaufbereitung für die durchzuführenden Analysen durch das DLR (Abschnitt 3.1) und die Empa (Abschnitt 3.2) dargestellt.

3.1 Akustische Analysen durch das DLR

3.1.1 Ermittelte akustische Kenngrößen

Das DLR (Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Göttingen, D) arbeitete die akustischen und operationellen Parameter für die deutschen Studien RDF (Schreckenberget al., 2010) und NOR-AH (Schreckenberget al., 2015) auf und stellte sie bereit. Für die zu re-analysierenden Studien sollten die folgenden akustischen Kenngrößen ermittelt werden:

- Die Anzahl der Fluggeräusche mit A-bewerteten Maximalschallpegeln oberhalb einer Schwelle von L_S Dezibel (*Number above Threshold*, NAT_{L_S}) für Schwellenwerte $L_S \geq 50$ dB,
- die arithmetisch gemittelten A-bewerteten Maximalschallpegel ($\overline{L_{AS,max,ari,L_S}}$) oberhalb dieser Schwellen,
- die logarithmisch gemittelten A-bewerteten Maximalpegel ($\overline{L_{AS,max,log,L_S}}$) oberhalb dieser Schwellen,
- äquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq}(k)$ für den Tag (06-22h), die Nacht (22-6h) und 24 Stunden für verschiedene Äquivalenzparameter k sowie
- die in der EU-Umgebungslärmrichtlinie (Richtlinie 2002/49/EG) definierten Größen L_{den} (Tag-Abend- Nacht-Pegel) und L_{night} (der dem $L_{Aeq,Nacht}(k = 10)$ entspricht).

Diese Kenngrößen werden im Folgenden beschrieben. Sie waren z. T. schon in den Studien erhoben worden. Ansonsten wurden sie auf der Basis der über die Studien vorliegenden Daten nachberechnet. Dies war allerdings nicht in allen Fällen möglich. Daher musste z. T. auf Näherungslösungen zurückgegriffen werden (siehe Anhang). In einigen Fällen musste auf eine Bereitstellung dieser Daten vollständig verzichtet werden (siehe Abschnitte 3.1.1.4 und 3.1.1.5).

3.1.1.1 Maximalschallpegel-Überschreitungshäufigkeiten

Für eine vorgegebene, in i_{max} Pegelklassen eingeteilte Maximalpegelverteilung (Abbildung 3-1) ist die Überschreitungshäufigkeit der Pegelschwelle L_S definiert als

$$NAT_{L_S} = \sum_{i=L_S}^{i_{max}} N_i . \quad (1)$$

Der Ausdruck NAT leitet sich vom englischen Ausdruck *Number Above Threshold* ab.

3.1.1.2 Mittlere Maximalschallpegel

Der arithmetisch gemittelte A-bewerteten Maximalpegel oberhalb der Schwelle L_S wird für eine solche Pegelverteilung berechnet als

$$L_{AS,max,ari,L_S} = \frac{1}{NAT_{L_S}} \cdot \sum_{i=i_{L_S}}^{i_{max}} N_i \cdot L_{AS,max,i} \quad (2)$$

Dabei ist i_{L_S} die Pegelklasse, die dem Wert L_S zugeordnet ist, i_{max} die höchste auftretende Pegelklasse. N_i ist die Anzahl der in die Pegelklasse i fallenden Werte. Für die Pegel $L_{AS,max,i}$ werden die Intervallmittenwerte angesetzt – also im Intervall 50 dB bis 51 dB der Wert 50.5 dB.

Entsprechend wird der logarithmisch (bzw. energetisch) gemittelte A-bewertete Maximalpegel berechnet als:

$$L_{AS,max,log,L_S} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{NAT_{L_S}} \cdot \sum_{i=i_{L_S}}^{i_{max}} N_i \cdot 10^{L_{AS,max,i}/10} \right) \quad (3)$$

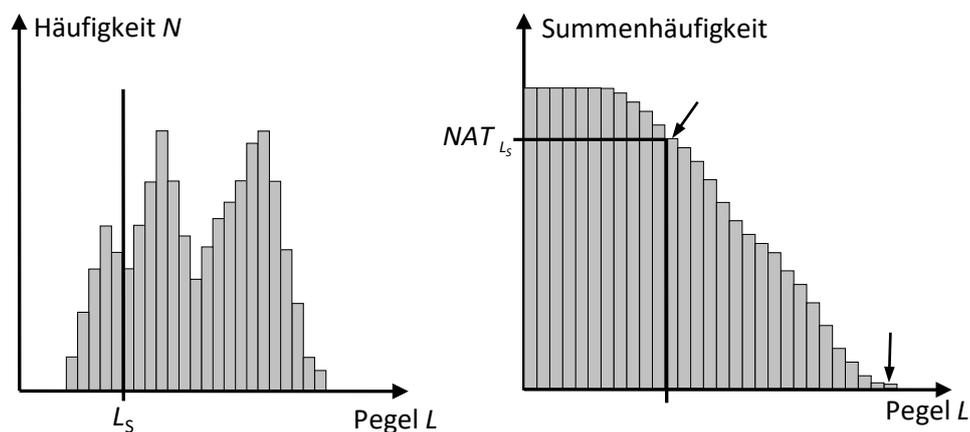


Abbildung 3-1. Maximalpegelverteilung und die daraus abgeleitete Summenhäufigkeitsfunktion (rechts), aus der sich die Überschreitungshäufigkeit NAT für eine Pegelschwelle L_S direkt ablesen lässt.

3.1.1.3 Äquivalente Dauerschallpegel

Der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq}(k)$ für einen Äquivalenzparameter k ist definiert als

$$L_{Aeq,T}(k) = k \cdot \lg \left(\frac{t_0}{T} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Ae,i}(k)/k} \right) \quad (4)$$

Man summiert also den Schallexpositionspegel $L_{Ae}(k)$ über alle N Geräusche im Bezugszeitraum T energetisch auf und normiert mit der Länge des Bezugszeitraums (86400/57600/28800 sec für $L_{Aeq,24h}/L_{Aeq,Tag}/L_{Aeq,Nacht}$. t_0 ist eine Normierungszeit von 1 sec. Hat k den Wert 10, so spricht man von einem energieäquivalenten Dauerschallpegel.

Der Tag-Abend-Nacht-Pegel nach EU-Umgebungslärmrichtlinie (Richtlinie 2002/49/EG) ist definiert als

$$L_{\text{den}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{12 \cdot 10^{L_{\text{day}}/10} + 4 \cdot 10^{(L_{\text{evening}}+5)/10} + 8 \cdot 10^{(L_{\text{eq,night}}+10)/10}}{24} \right) . \quad (5)$$

Dabei sind L_{day} , L_{evening} und L_{night} die energieäquivalenten, A-bewerteten Dauerschallpegel für die Tages-/Abend-/Nachtperioden von 12/4/8 Stunden Dauer.

3.1.1.4 Datengrundlage für die Re-Analyse der RDF-Studie

Für die RDF-Studie wurden insgesamt 2312 Immissionspunkte untersucht. Für diese Punkte lagen lediglich Werte des energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{\text{Aeq}}(k = 10)$ vor. Die anderen benötigten Größen mussten neu berechnet werden. Diese Berechnung erfolgte – wie in der Originalstudie – auf der Basis der AzB aus dem Jahre 1975 (Der Bundesminister des Inneren, 1975) mit der Datengrundlage aus dem Jahr 1999 (Umweltbundesamt, 1999). Als Grundlage für die Berechnung wurde seitens ZEUS ein Datenerfassungssystem (DES) der Fraport AG für das Untersuchungsjahr 2005 zur Verfügung gestellt.

Aus Datenschutzgründen wurden die Geokoordinaten der Wohngebäude der RDF-Probanden nur mit einer Genauigkeit von 100 m bereitgestellt. Dadurch war zum Einen eine ausreichende Anonymisierung, zum Anderen eine ausreichende Genauigkeit bei der Ermittlung der Immissionswerte gewährleistet.

Ein Vergleich der der äquivalenten Dauerschallpegel $L_{\text{Aeq,Tag}}$, $L_{\text{Aeq,Nacht}}$ und $L_{\text{Aeq,24h}}$ zwischen den Originaldaten der RDF-Studie und den Ergebnissen der Neuberechnung führte in den Bereichen nordwestlich des Flughafens zu nicht erklärbaren Abweichungen. Die zu einer Klärung dieser Abweichungen benötigten Informationen standen nicht mehr zur Verfügung. Daher wurden für diese Gebiete keine Neuberechnungen ergänzender akustischer Maße (Maximalpegel, NAT-Kriterien, äquivalente Dauerschallpegel mit $k = 20$ und $k = 30$) vorgenommen. Dadurch reduzierte sich der untersuchte Datensatz auf 1608 Immissionsorte.

3.1.1.5 Datengrundlage für die Re-Analyse der NORAH-Studie

Für die zu untersuchende Immissionsorte der NORAH-Studie lagen Verteilungen des A-bewerteten Maximalpegels mit Klassenbreiten von 1 dB für den Tag (06-22 h) bzw. die Nacht (22-06 h) sowie die energieäquivalenten Dauerschallpegel für Tag, Nacht und 24 Stunden vor. Aus den Pegelverteilungen ließen sich die benötigten Werte für die mittleren Maximalpegel und die Überschreitungshäufigkeiten NAT_{L_s} ermitteln.

Eine Neuberechnung der nicht-energieäquivalenten Dauerschallpegel war nicht möglich, da die dazu benötigten Datenerfassungssysteme nicht zur Verfügung gestellt werden konnten. Aus diesem Grund wurde ein Näherungsverfahren entwickelt, mit dem die Dauerschallpegel $L_{\text{Aeq}}(k \neq 10)$ aus den energieäquivalenten Dauerschallpegeln $L_{\text{Aeq}}(k = 10)$ und den mittleren, A-bewerteten Maximalpegeln ermittelt werden können (siehe Anhang).

3.1.2 Charakterisierung der im Rahmen der deutschen Studien untersuchten Flughäfen

3.1.2.1 Das Konzept der Lärmäquivalenten Bewegungen

Die reine Angabe einer Anzahl von Flugbewegungen ist zur Beschreibung der Lärmsituation im Umfeld eines Flughafens nicht ausreichend, da sich die Lärmemissionen eines Flugzeuges bedingt durch Triebwerksart und Masse deutlich unterscheiden können. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des im Luftfahrt-Forschungsprogramms abgewickelten Projekts MODAL (Isermann, König, Pott-Pollenske, Schmid, R. & Siller, 2015) der Begriff „Lärmäquivalente Bewegung“ eingeführt:

Ein Flugzeugtyp X erzeuge im Mittel einen um ΔL Dezibel höheren/niedrigeren Schallleistungspegel als ein Referenzflugzeugtyp. Dann kann man schreiben

$$10^{L_{Ae,TypX}/10} = 10^{(L_{Ae,TypRef} + \Delta L)/10} = 10^{\Delta L/10} \cdot 10^{L_{Ae,TypRef}/10} = N_{eq} \cdot 10^{L_{Ae,TypRef}/10} \quad (6)$$

Die Größe $N_{eq} = 10^{\Delta L/10}$ bezeichnet man als auf den Referenztyp bezogene „Lärmäquivalente Bewegung“. Ist also $\Delta L = 10$ dB, so strahlt eine Bewegung des Typs die gleiche Schallenergie an einem Immissionsort ein wie 10 Bewegungen des Referenztyps.

Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht über die Lärmäquivalente, die sich für die Flugzeuggruppen der AzB ergeben. Als Referenz dient die Gruppe S5.2, in die die Flugzeugmuster der Baureihen A320 und B737 fallen. Diese Flugzeuge bestimmen an fast allen deutschen Flughäfen den erzeugten Lärm. Die Äquivalente basieren auf einer Analyse der Immissionen (Schallleistungs- und Maximalpegel) im Abstand von bis zu 20 km vom Startpunkt bzw. der Landeschwelle.

3.1.2.2 Der Flughafen Frankfurt-Main (FRA)

Der Flugbetrieb am Frankfurter Flughafen wurde für die Jahre 2000 bis 2013 ausgewertet (siehe Tabelle 3-2). Er nahm bis zur Bankenkrise im Jahr 2008 tendenziell zu und brach dann für etwa 2 Jahre ein. Ende 2011 wurde die Nordwest-Bahn eröffnet und das Nachtflugverbot (23:00 – 05:00 Uhr) trat in Kraft. Der bis dahin relativ konstante Nachtfluganteil von etwa 10% ging bis zum Jahr 2013 auf 6.8 Prozent herunter.

Eine Analyse der Lärmäquivalenten Bewegungen zeigt, dass der Verkehr am Flughafen Frankfurt durch größeres bzw. lauterer Fluggerät dominiert wird. Tendenziell geht das Verhältnis von lärmäquivalenten zu realen Bewegungen trotz steigender Bewegungszahlen aber zurück. Es wird also zunehmend moderneres und leiseres Gerät eingesetzt. Auffällig ist das Jahr 2002. Hier wurde ein sehr hoher Anteil an Militärverkehr von der Rhein-Main-Airbase verzeichnet, der insbesondere durch die Gruppen S3.2-B (C-17 Globemaster) und S4-B (C5A Galaxy) bestritten wurde.

Die Betriebsrichtungsverteilung gilt nur für zwei (seit Ende 2011 drei) Parallelbahnen, auf denen zwar alle Landungen, aber nur ca. 40 % der Starts abgewickelt werden.

Da die Bewegungsdaten nicht nach Start und Landung separiert waren, wurde jeweils ein Anteil von 50 % der Gesamtbewegungen angenommen. Das ist streng nur für 24 h gültig – in der Nacht finden tendenziell mehr Landungen statt. Insofern geben die Tages- und Nachtwerte für das Verhältnis N_{eq}/N_{real} nur Tendenzen wider.

Tabelle 3-1. Lärmäquivalente für die Flugzeuggruppen nach AzB, bezogen auf die Flugzeuggruppe S5.2. P-Gruppen haben Propellerantrieb, S-Gruppen haben Strahlantrieb.

AzB-Gruppe	ΔL_{Start} [dB]	$N_{\text{eq,Start}}$	$\Delta L_{\text{Landung}}$ [dB]	$N_{\text{eq,Landung}}$	Charakt. Typen
P2.1	-3.9	0.4	1.1	1.3	Dash-8, ATR 72
P2.2	3.6	2.3	1.1	1.3	HS 748
S1.0	-0.5	0.9	-0.7	0.8	ältere Businessjets
S1.1	11.8	15.3	2.9	2.0	DC-9-50
S1.2	9.1	8.2	2.4	1.7	B737-200
S1.3	13.8	24.0	3.9	2.5	B727-200
S2	13.3	21.6	7.9	6.2	ältere B727, B737
S3.1-A	7.3	5.4	7.0	5.0	ältere DC-10
S3.1-B	13.6	22.9	7.0	5.0	ältere DC-10
S3.2-A	11.2	13.3	7.0	5.0	ältere B747, C-17 Globemaster
S3.2-B	17.4	55.0	7.0	5.0	ältere B747, C-17 Globemaster
S4-A	17.1	51.6	12.3	17.0	B707, C5A Galaxy
S4-B	21.5	142.5	12.3	17.0	B707, C5A Galaxy
S5.1	-4.1	0.4	-3.0	0.5	ARJ- /CRJ-Regionaljets
S5.2	0.0	1.0	0.0	1.0	A318...A321, B737-300...800
S5.3	6.9	4.9	0.2	1.0	MD81...MD88
S6.1	0.6	1.2	2.5	1.8	A300, A330, B767, B777
S6.2-A	3.2	2.1	5.0	3.2	MD-11
S6.2-B	7.6	5.7	5.0	3.2	MD-11
S6.3	10.4	10.9	1.0	1.3	A340
S7-A	9.7	9.3	5.5	3.5	B747-200, B747-400
S7-B	13.6	22.7	5.5	3.5	B747-200, B747-400
S8-A	5.7	3.7	3.5	2.2	A380
S8-B	9.6	9.0	3.5	2.2	A380

Anmerkungen.

Die Kennungen –A und –B bezeichnen unterschiedliche Abflugmassen. Bei der Landung wird nicht nach Masse differenziert.

Tabelle 3-2. Verkehrsanalyse für den Flughafen Frankfurt/Main für die Jahre 2000 – 2013.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Verhältnis N_{eq}/N_{real} .			Betriebsrichtung	
			Tag	Nacht	24 h	BR 07 ⁽¹⁾	BR 25 ⁽²⁾
2000	457571	9.8 %	1.99	3.07	2.09	15.3 %	84.7 %
2001	456877	10.1 %	2.08	3.04	2.17	23.3 %	76.7 %
2002	463831	10.0 %	2.33	4.72	2.57	26.5 %	73.5 %
2003	471108	10.0 %	1.97	3.24	2.10	33.1 %	66.9 %
2004	486442	10.3 %	1.99	3.09	2.10	26.8 %	73.1 %
2005	494483	10.8 %	1.91	2.85	2.01	29.6 %	70.4 %
2006	488416	10.3 %	1.82	2.86	1.92	29.3 %	70.7 %
2007	491665	10.1 %	1.80	2.73	1.89	25.7 %	74.3 %
2008	484901	10.0 %	1.81	2.75	1.90	26.6 %	73.4 %
2009	462253	9.3 %	1.77	2.84	1.87	28.7 %	71.3 %
2010	463317	9.9 %	1.80	2.76	1.90	29.1 %	70.9 %
2011	486505	9.4 %	1.76	2.66	1.84	27.8 %	72.2 %
2012	481630	7.6 %	1.64	2.64	1.72	24.2 %	75.8 %
2013	472232	6.8 %	1.59	2.63	1.66	34.2 %	65.8 %

Anmerkungen.⁽¹⁾ $M = 27.2 \%$, $SD = 4.4 \%$ ⁽²⁾ $M = 72.8 \%$, $SD = 4.4 \%$

3.1.2.3 Der Flughafen Berlin-Schönefeld (BER)

Für den Flughafen Berlin-Schönefeld (BER¹) wurden die Verkehrsdaten der Jahre 2007-2008 analysiert (siehe Tabelle 3-3). Schönefeld ist ein Flughafen, an dem im Wesentlichen Flugzeugmuster aus der Referenzgruppe verkehren. Der Nachtfluganteil variiert zwischen 10 und 15 Prozent, die Bewegungszahlen und auch der Nachtfluganteil waren seit 2011 rückläufig. Der Betrieb erfolgt zu etwa 2/3 in Westrichtung.

Tabelle 3-3. Verkehrsanalyse für den Flughafen Berlin Schönefeld für die Jahre 2007 – 2012.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Verhältnis N_{eq}/N_{real}			Betriebsrichtung	
			Tag	Nacht	24 h	BR 07 ⁽¹⁾	BR 25 ⁽²⁾
2007	57817	16.2 %	0.99	0.99	0.99	31.2 %	68.8 %
2008	61232	15.3 %	0.98	1.06	0.99	34.4 %	65.6 %
2009	65995	13.7 %	0.95	0.97	0.95	37.7 %	62.3 %
2010	70562	15.0 %	0.94	0.97	0.94	37.2 %	62.8 %
2011	69077	12.5 %	0.93	0.98	0.94	31.3 %	68.7 %
2012	67467	11.2 %	0.93	1.07	0.94	30.1 %	69.9 %

Anmerkungen.

⁽¹⁾ $M = 33.7 \%$, $SD = 3.0 \%$

⁽²⁾ $M = 66.3 \%$, $SD = 3.0 \%$

¹ In der NORAH-Studie sollte die Wirkung des Fluglärms vor und nach Erweiterung des Flughafens Berlin-Schönefeld (IATA-Code SXF) zum Flughafen Berlin-Brandenburg (IATA-Code BER) untersucht werden. Da der erweiterte Flughafen bislang noch nicht eröffnet wurde, bezieht sich die ermittelte Luftverkehrsgeräuschbelastung und deren Wirkung auf den Flugverkehr des (ursprünglichen) Flughafens Berlin-Schönefeld. Aufgrund der Zielsetzung in der NORAH-Studie wird nachfolgend wie auch in den Publikationen zur NORAH-Studie die Abkürzung "BER" zur Bezeichnung des Flughafens Berlin-Schönefeld verwendet.

3.1.2.4 Der Flughafen Köln-Bonn (CGN)

Tabelle 3-4 zeigt die Verkehrsanalyse für den Flughafen Köln-Bonn für die Jahre 2008 – 2013. Da für diese Jahre keine Aufteilung in Flugzeuggruppen vorlag, wurden ergänzend Informationen aus den Jahren 2014 und 2015 herangezogen.

Tabelle 3-4. Verkehrsanalyse für den Flughafen Köln-Bonn für die Jahre 2008 – 2013.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Verhältnis N_{eq}/N_{real}			Betriebsrichtung			
			Tag	Nacht	24h	BR06 ⁽³⁾	BR4 ⁽⁴⁾	BR14 ⁽⁵⁾	BR32 ⁽⁶⁾
2008	141678	24.6 %				1.5 %	10.4 %	55.1 %	33.0 %
2009	132173	24.5 %				2.0 %	8.4 %	52.1 %	37.6 %
2010	134323	25.1 %				1.5 %	8.4 %	46.7 %	43.4 %
2011	130928	26.0 %				1.0 %	10.5 %	53.0 %	35.5 %
2012	125337	28.1 %				1.5 %	11.9 %	50.2 %	36.4 %
2013	120388	28.9 %	1.09 ⁽¹⁾	1.55 ⁽¹⁾	1.23 ⁽¹⁾	1.9 %	13.4 %	51.4 %	33.2 %
2014			1.05 ⁽²⁾	1.51 ⁽²⁾	1.19 ⁽²⁾				
2015			1.09 ⁽²⁾	1.36 ⁽²⁾	1.17 ⁽²⁾				

Anmerkungen.

⁽¹⁾ Werte für die 6 verkehrsreichsten Monate

⁽²⁾ Werte wurden aus den Flugplananalysen des Projekts MODAL ermittelt

⁽³⁾ $M = 1.5 \%$, $SD = 0.4 \%$

⁽⁴⁾ $M = 10.5 \%$, $SD = 2.0 \%$

⁽⁵⁾ $M = 51.4 \%$, $SD = 2.8 \%$

⁽⁶⁾ $M = 35.5 \%$, $SD = 3.8 \%$

Köln-Bonn ist ein insofern ein Sonderfall, als er als Drehkreuz für die Frachtfluggesellschaften UPS und FedEx dient und daher einen sehr hohen Anteil an Nachtflügen hat (ca. 25-30 %). Für die Analyse der Lärmäquivalente lagen lediglich für das Jahr 2013 Informationen aus dem Projekt MODAL vor. Daher wurden ergänzend die MODAL-Informationen für 2014 und Informationen für die sechs verkehrsreichsten Monate des Jahres 2015 ausgewertet. Diese sind laut Aussage des Flughafens aber auch charakteristisch für die Jahre 2008 – 2012.

Während der Flughafen tagsüber im Wesentlichen Bewegungen von Flugzeugen der Referenzklasse abwickelt, kommt nachts auch schwereres Gerät (insbesondere der Gruppen S6.1 und S6.2) zum Einsatz. Dadurch erhöht sich das Verhältnis von lärmäquivalenten zu realen Bewegungen gegenüber dem Tag um etwa 50 %.

Die Betriebsrichtungsverteilung zeigte in den untersuchten Jahren nur geringe Schwankungen. Etwa 12 % der Bewegungen wurden auf der Querbahn 06/24 abgewickelt, der Rest fiel auf die beiden Bahnen in Richtung 14/32.

3.1.2.5 Der Flughafen Stuttgart (STR)

Auch für den Flughafen Stuttgart wurden die Jahre 2008 – 2013 analysiert (siehe Tabelle 3-5). Die Bewegungszahlen waren in betrachteten Jahren rückläufig, der Nachtfluganteil lag in der Größenordnung von 6.0 – 6.5 %. Der Flughafen hat kein Nachtflugverbot, aber eine Nachtflugbeschränkung für zivile Strahlflugzeuge (Starts bzw. Landungen sind von 23:00 bzw. 23:30 bis 06:00 Uhr nicht er-

laubt). Von den der Tabelle ausgewiesenen Nachtbewegungen fanden etwa 20 % innerhalb dieses Zeitraums statt. Diese verfügten fast durchweg über eine Sondergenehmigung.

Tabelle 3-5. Verkehrsanalyse für den Flughafen Stuttgart für die Jahre 2008 – 2013.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Verhältnis N_{eq}/N_{real}			Betriebsrichtung	
			Tag	Nacht	24h	BR 07 ⁽¹⁾	BR 25 ⁽²⁾
2008	160239	6.1 %				64.4 %	35.6 %
2009	141570	5.8 %			0.95 ⁽³⁾	60.8 %	39.2 %
2010	135331	6.6 %			0.99 ⁽³⁾	61.5 %	38.5 %
2011	136576	6.3 %			1.02 ⁽³⁾	59.0 %	41.0 %
2012	131516	6.5 %			1.04 ⁽³⁾	64.1 %	35.9 %
2013	124581	6.6 %			1.04 ⁽³⁾	65.0 %	35.0 %

Anmerkungen.

⁽¹⁾ $M = 37.5 \%$, $SD = 2.2 \%$

⁽²⁾ $M = 62.5 \%$, $SD = 2.2 \%$

⁽³⁾ Daten wurden aus dem Fluglärmbericht (Verteilung auf Lärmkategorien) näherungsweise ermittelt

Die Verteilung der Flugbewegungen auf AzB-Gruppen konnte nicht bereitgestellt werden, so dass die lärmäquivalenten Bewegungen nicht nach dem in Abschnitt 3.1.2.1 beschriebenen Verfahren erfolgen konnte. Alternativ wurde hier auf die Verteilung der Flugzeuge in die Lärmkategorien für die Landeentgelte zurückgegriffen. Die ausgewiesenen Verhältnisse N_{eq}/N_{real} sind daher nicht direkt mit den Werten für die anderen Flughäfen vergleichbar, dürften aber die Tendenz einer leichten Zunahme in Richtung größeren Fluggeräts richtig wiedergeben.

Der Flugbetrieb wird zu etwa 2/3 in Betriebsrichtung 07 abgewickelt, die Schwankungen sind gering.

3.2 Akustische Analysen durch die Empa

Die akustischen und operationellen Größen für die Schweizer Studien Lärmstudie 2000 am Flughafen Zürich (ZRH) (Brink et al., 2008) und SiRENE an den Flughäfen EuroAirport Basel Mulhouse Freiburg (BSL), Genf Cointrin (GVA) sowie Zürich (ZRH) (Brink et al., 2019) wurden von der Empa (Dübendorf, CH) soweit bereits verfügbar zusammengestellt. Wo nötig wurden sie auf Basis der aus Fluglärmrechnungen greifbaren Daten für das Projekt Leq+X neu ermittelt bzw. geschätzt. Alle Fluglärmrechnungen wurden mit dem Programm FLULA2 durchgeführt (Empa, 2010).

3.2.1 Ermittelte akustische Kenngrößen

Für die zu re-analysierenden Studien wurden folgende akustische Kenngrößen bereitgestellt:

- Detaillierte Maximalpegelverteilungen in 1dB-Klassen im Pegelbereich von 50–120 dB, für die Zeitperioden *Day* (06:00 – 18:00 h), *Evening* (18:00 – 22:00 h), *Night* (22:00 – 06:00 h) sowie 24 Stunden.
- Anzahl der Fluggeräusche mit A-bewerteten Maximalschallpegeln oberhalb einer Schwelle von L_S Dezibel (*Number above Threshold*, NAT_{L_S} mit $L_S = 65, 70$ und 80 dB), für die Zeitperioden *Day* (06:00 – 18:00 h), *Evening* (18:00 – 22:00 h), *Night* (22:00 – 06:00 h) sowie 24 Stunden.
- Logarithmisch (bzw. energetisch) gemittelter A-bewerteter Maximalschallpegel (L_{AS,max,log,L_S}) für verschiedene Schwellenwerte L_S (mit $L_S = 65, 70$ und 80 dB), für die Zeitperioden *Day* (06:00 – 18:00 h), *Evening* (18:00 – 22:00 h), *Night* (22:00 – 06:00 h) sowie 24 Stunden.
- Äquivalenter Dauerschallpegel $L_{Aeq}(k)$ für verschiedene Äquivalenzparameter k (mit $k = 10$, d.h. energieäquivalent; $k = 20$ und $k = 30$), für die Zeitperioden *Day* (06:00 – 18:00 h), *Evening* (18:00 – 22:00 h) und *Night* (22:00 – 06 h).

Obige Kenngrößen werden im Folgenden beschrieben. Aus diesen Daten wurden von der ZEUS GmbH, soweit für die Analysen benötigt, weitere, daraus abgeleitete Kenngrößen berechnet, namentlich (i) die NAT_{L_S} und $L_{Aeq}(k)$ für den Tag (06–22 h), (ii) der L_{den} aus den energieäquivalenten $L_{Aeq}(k = 10)$ gemäß Anhang I der EU-Umgebungslärmrichtlinie (Richtlinie 2002/49/EG), sowie (iii) die NAT und L_{AS,max,log,L_S} für weitere Schwellenwerte L_S .

Es wurden nur die akustischen Kenngrößen für Großflugzeuge (maximales Abfluggewicht MTOM > 8618 kg) ermittelt. Die Kleinluftfahrzeuge wurden, wie auch in den Originalstudien (Brink et al., 2008; Brink et al., 2019) vernachlässigt. Deren akustischer Beitrag zur Gesamtbelastung ist gering und der Fehler somit vernachlässigbar.

3.2.1.1 Maximalschallpegel-Überschreitungshäufigkeiten

In einem ersten Schritt wurden aus bereits verfügbaren $\bar{L}_{AS,max,j}$ -Footprints (Resultate früherer Simulationen) Maximalpegelverteilungen in 1-dB-Schritten berechnet. Die $\bar{L}_{AS,max,j}$ -Footprints sind Gitterfiles, welche den logarithmisch gemittelten Maximalpegel eines bestimmten Flugzeugtyps auf einer vorgegebenen Flugroute unter bestmöglicher Berücksichtigung der vertikalen und horizontalen Streuung der Flugwege (aus Simulationen mit Einzelflügen, wo möglich aus Radardaten) enthalten. Die Footprints lassen sich als Erwartungswert einer Normalverteilung interpretieren. Die Standardabweichung der Verteilung wurde hier fix mit 2 dB vorgegeben, was der üblichen Setzung für die Berechnung von Maximalpegelhäufigkeiten nach Empa (2006) (S. 16ff) oder ECAC Doc.29 (European Civil Aviation Conference [ECAC], 2016, S. 50) entspricht. Die AzB hingegen verwendet meist 3 dB und

nur in wenigen Fällen 2 dB (1. FlugLSV; Der Bundesminister für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2008). Damit resultieren für jeden $\bar{L}_{AS,max,j}$ -Footprint Maximalpegeldichteverteilungen, welche mit den entsprechenden Typen- und Routen-spezifischen Bewegungszahlen gewichtet und über alle Typen und Routen zu vollständigen Maximalpegelverteilungen (bzw. Summenhäufigkeiten, d.h. kumulative NAT) aufsummiert werden. Details zum Vorgehen finden sich in Empa (2006).

Aus den resultierenden Summenhäufigkeiten lassen sich direkt die NAT in Abhängigkeit der Schwellenwerte L_S herauslesen (vgl. untenstehendes Beispiel, Tabelle 3-6). So entspricht beispielsweise am Empfängerpunkt E4 der NAT von 55 dB rund 11 Ereignissen.

Tabelle 3-6. Beispiel von Maximalpegelverteilungen (Summenhäufigkeiten, kumulative NAT) in 1dB-Schritten für 71 Pegelklassen ($L_{AS,max} = 50 - 120$ dB) und den Empfängerpunkte (E1-E_n).

Empfangs- punkt	Pegelklasse															
	50	51	52	53	54	55	56	57	...	67	68	69	70	...	119	120
E1	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
E2	63.2	60.1	56.4	51.6	45.3	37.6	28.9	20.2	...	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
E3	11.6	6.0	2.9	1.3	0.5	0.2	0.1	0.0	...	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
E4	70.8	57.9	44.0	30.7	19.5	11.2	5.8	2.8	...	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
E5	67.1	62.3	57.2	51.5	44.9	37.7	30.7	24.8	...	0.8	0.4	0.2	0.1	...	0.0	0.0
...
E _{n-1}	1.0	0.6	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
E _n	37.3	33.8	29.5	24.2	18.2	12.5	7.9	4.8	...	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0

Man beachte, dass die Berechnung ohne zusätzliche Korrektur für die logarithmisch gemittelten Werte der $\bar{L}_{AS,max,j}$ -Footprints durchgeführt wurde. Letztere resultieren in etwas höheren mittleren Maximalpegeln $L_{AS,max,log}$ als arithmetisch gemittelte Maximalpegel $L_{AS,max,ari}$ (Barry and Reagan, 1978). Der Unterschied ist jedoch gering (vgl. z. B. S. 18 in Empa, 2006).

3.2.1.2 Mittlere Maximalschallpegel oberhalb Schwellenwert L_S

Ausgehend von den oben berechneten Summenhäufigkeiten ($L_{AS,max} = 50 - 120$ dB, in 1-dB-Schritten) wurde für verschiedene Schwellen L_S der dazugehörige logarithmisch gemittelte A-bewertete Maximalpegel L_{AS,max,log,L_S} näherungsweise berechnet als

$$L_{AS,max,log,L_S} = 10 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=L_S}^n (N_i - N_{i+1}) \times 10^{L_{AS,max,i}/10}}{N_{i=L_S}} \right) \quad \text{für } L_{AS,max,log} \geq L_S, \quad (7)$$

wobei i = Index für Pegelklasse bei total n Pegel Klassen mit $L_{AS,max} \geq i = L_S$, N_i = Anzahl Ereignisse (Summenhäufigkeit) der Pegelklasse i (= gesamte Anzahl Ereignisse $\geq L_{AS,max,i}$) und N_{i+1} = Anzahl Ereignisse (Summenhäufigkeit) der nachfolgenden (höheren) Pegelklasse $i+1$. Die Differenz der Summenhäufigkeit $N_{i+1} - N_i$ entspricht der Anzahl Ereignisse der Pegelklasse i mit dem $L_{AS,max,i}$.

Mit dieser einfachen Berechnung ist L_{AS,max,log,L_S} direkt aus den Summenhäufigkeiten, aus welchen bereits die NAT stammen, für beliebige L_S ermittelbar.

Die Berechnung des L_{AS,max,log,L_S} ist eine Näherungsrechnung, welche nicht der Berechnungsvorschrift gemäß Schweizer Leitfaden Fluglärm entspricht (Bundesamt für Umwelt [BAFU], Bundesamt für Zivil-

luftfahrt [BAZL], Generalsekretariat des Eidgenössischen Departementes für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS [GS VBS], 2016). Für die vorliegende Studie ist dies jedoch nicht relevant. Außerdem zeigte sich, dass die Resultate gemäß offizieller Berechnungsvorschrift sehr sensitiv auf die methodische Implementierung reagieren, wenn eine genügend hohe Schwelle L_S (z. B. $L_S=68$ dB) gewählt wird (vgl. Anhang A). Die hier gewählte Berechnung ist robuster.

3.2.1.3 Äquivalente Dauerschallpegel

Energieäquivalenter Dauerschallpegel ($k = 10$): Im Gegensatz zu Fluglärmrechnungsprogrammen wie beispielsweise AEDT (U.S. Department of Transportation [DOT], 2017) basiert FLULA2 auf dem *Footprint*-Konzept (Empa, 2010; Schäffer, Bütikofer, Plüss & Thomann, 2011). An jedem Empfängerpunkt wird – neben den $\bar{L}_{AS,max,j}$ -*Footprints* (Abschnitt 3.2.1.1) – pro Flugzeugtyp und Flugroute je ein $\bar{L}_{AE,j}$ -*Footprint* berechnet, d.h. Gitterfiles, welche den logarithmisch gemittelten Ereignispegel L_{AE} (bezogen auf die Dauer von 1 Sekunde) eines bestimmten Flugzeugtyps auf einer vorgegebenen Flugroute enthalten (Mittelung über viele reale Flugbahnen, sofern Radardaten verfügbar; ansonsten Mittelung über eine Anzahl idealisierter Flugbahnen).

Der logarithmisch gemittelte $\bar{L}_{AE,j}$ -*Footprint* des Flugzeugtypen j berechnet sich aus den individuellen $L_{AE,ij}$ über die Anzahl m_j Fluglärmereignissen des Flugzeugtyps auf einer bestimmten Flugroute zu

$$\bar{L}_{AE,j} = 10 \times \lg \left(\frac{1}{m_j} \sum_{i=1}^{m_j} 10^{L_{AE,ij}/10} \right). \quad (8)$$

Hieraus kann der Gesamtenergiepegel $L_{AE,tot}$ für einen jährlichen Flugbetrieb, bestehend aus der Anzahl k verschiedener Flugzeugtypen mit der Anzahl n_j maßgeblichen Fluglärmereignissen pro Route der Flugzeugtypen j (aus Bewegungsstatistiken) und deren zugehörigen $\bar{L}_{AE,j}$ -*Footprints* berechnet werden (sog. Superposition) zu

$$L_{AE,tot} = 10 \times \lg \left(\sum_{j=1}^k n_j \times 10^{\bar{L}_{AE,j}/10} \right) \quad (9)$$

Aus dem $L_{AE,tot}$ schließlich berechnet sich der äquivalente Dauerschallpegel unter Berücksichtigung der Bezugsdauer (Mittelungszeit) T in Sekunden (und $t_0 = 1$ s) zu

$$L_{Aeq} = L_{AE,tot} + 10 \times \lg \left(\frac{t_0}{T} \right) \quad (10)$$

Nicht-energieäquivalenter Dauerschallpegel ($k \neq 10$): Das Vorgehen für die Berechnung nicht-energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{Aeq}(k \neq 10)$ erfolgt analog zur Berechnung der energieäquivalenten Dauerschallpegel (*Footprint*-Konzept, s.o.). Hier wird allerdings anstelle des Äquivalenzparameters $k = 10$ ein Wert von $k = 20$ bzw. $k = 30$ eingesetzt. Da jedoch keine nicht-energieäquivalenten *Footprints* zur Verfügung standen, wurde der nicht-energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq}(k)$ basierend auf den energieäquivalenten *Footprints* mit folgender Näherungslösung geschätzt (vgl. Anhang A):

$$L_{Aeq}(k) = k \times \lg \left(\sum_{j=1}^m n_j \times 10^{\left[\bar{L}_{AS,max,j} + \frac{1}{2} \times s_{L_{AS,max}}^2 \times \ln(10) \times \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{10} \right) + \frac{k}{10} \times (\bar{L}_{AE,j} - \bar{L}_{AS,max,j}) \right] / k} \right) + k \times \lg \left(\frac{t_0}{T} \right), \quad (11)$$

mit Äquivalenzparameter k (hier $k = 20$ oder 30 , bzw. $k = 10$ für energieäquivalente Superposition), Typen- und Routen-spezifischen Bewegungszahlen (n_j) gemäß Bewegungsstatistiken, Typen- und Routen-spezifischen energieäquivalenten *Footprints* ($\bar{L}_{AE,j}$ und $\bar{L}_{AS,max,j}$ mit $k = 10$), Standardabweichung der Maximalpegel $s_{LAS,max}$ (gesetzt zu $s_{LAS,max} = 2.0$ dB) und Bezugszeit T (in s) gemäß Zeitperiode (*Day, Evening, Night*), und $t_0 = 1$ s.

Es zeigt sich, dass diese Näherungslösung die exakte Lösung bei hohen Pegeln systematisch unterschätzt und somit mit erhöhter Unsicherheit behaftet ist. Außerdem liefern die Näherungslösungen des DLR und der Empa nicht exakt dieselben Resultate. (Zur Vergleichbarkeit der akustischen Immissionsdaten aus Deutschland und der Schweiz siehe auch Abschnitt 3.3).

3.2.1.4 Datengrundlage für die Re-Analyse der Lärmstudie 2000

Für die Lärmstudie 2000 (Brink et al., 2008) lagen Befragungen um den Flughafen ZRH folgender Jahre vor:

- Befragung 2001 (Mitte August bis 10. September)
- Befragung 2003 (Mitte August bis Mitte Oktober)

Ursprünglich wurden für die Lärmstudie 2000 die Belastungszustände der Jahre 2000 (Zeitraum Januar – Dezember) und 2003 (Januar – August) verwendet. Das Jahr 2000 statt 2001 war verwendet worden, da zur Zeit der Auswertung die Berechnungen für das Jahr 2001 noch nicht verfügbar waren. Für die vorliegende Untersuchung wurde anstelle des Zustandes 2000 der Zustand 2001 (Januar – August) gewählt, da dieser Betrieb die Zeit direkt vor der Befragung (August 2001) besser repräsentiert und sich der Flugbetrieb 2000 (mit Pistenschließung 10-28 vom 29.05. – 31.07.2000 mit Südstarts "Straight" am Tag) stark von demjenigen des Jahres 2001 unterscheidet. Für die Zustände 2001 und 2003 wurden somit nur je 243 Tage (Januar – August) ausgewertet. Ab September (nach den jeweiligen Befragungen) kam es zu großen Veränderungen im Flugbetrieb, infolge des Swissair Groundings und der Terroranschläge vom 11. September (Jahr 2001), sowie Einführung der Südanflüge auf ZRH (Jahr 2003).

Die Bewegungszahlen der in den Berechnungen nicht berücksichtigten 4 Vorjahresmonate (September–Dezember 2000 resp. 2002) waren in beiden Jahren (2001 und 2003) sehr vergleichbar mit den 8 verwendeten Monaten (Januar–August 2001 resp. 2003); die Monate danach brachen hingegen stark ab. Hätte man in den Berechnungen den Flugbetrieb der 12 statt 8 Monate vor den Befragungen verwendet (d.h. inkl. der 4 Vorjahresmonate), so wären die mittleren täglichen Bewegungszahlen marginal tiefer (2001) bzw. höher (2003) ausgefallen. Unter Annahme gleichen Flottenmixes, gleicher Routenbelegung und gleichen Tagesganges des Flugbetriebes auf ZRH in den 4 Vorjahresmonaten wie in den für die Berechnungen verwendeten 8 Monaten führte dies zu einer marginalen Überschätzung von +0.01 dB für das Jahr 2001 bzw. Unterschätzung von –0.06 dB für das Jahr 2003. Die Verwendung von nur 8 statt 12 Monaten zur Ermittlung der Jahresbelastungen 2001 und 2003 ist somit wegen des geringen Jahresganges der Flugbewegungen in diesen Jahren gerechtfertigt. Der hieraus resultierende Fehler in den Berechnungen ist vernachlässigbar. Für die Lärmstudie 2000 wurden akustische Kenndaten für insgesamt 3535 Immissionspunkte aufbereitet, nämlich 1816 (Befragung 2001) plus 1719 Immissionspunkte (Befragung 2003). Die akustischen Datengrundlagen stammen aus den Empa-Projekten Nr. 425592 (ZRH2001) und 433135 (ZRH2003). Die Simulationen zur Ermittlung der *Footprints* erfolgten mit der FLULA2 Version 002 und dem Quellendatensatz RC2001_01. Aus den

Berechnungen standen die *Footprints* ($\bar{L}_{AE,j}$ und $\bar{L}_{AS,max,j}$) sowie die Bewegungslisten zur Verfügung. Aus den Bewegungslisten wurden die Bewegungsstatistiken aufbereitet. Darauf basierend wurden die unter Abschnitt 3.2.1 aufgeführten akustischen Kenngrößen ermittelt. Die Daten L_d , L_e und L_n des Jahres 2003 aus der ursprünglichen Studie wurden nicht verwendet, da diese für die Zeitperioden 07-19-23 Uhr statt wie hier 06-18-22 Uhr berechnet worden waren.

3.2.1.5 Datengrundlage für die Re-Analyse der SiRENE-Studie

Für die SiRENE-Studie (Brink et al., 2019) lagen Befragungen in vier Wellen um die Flughäfen BSL, GVA und ZRH sowie den Militärflugplatz PAY folgender Jahre vor:

- Befragung 2014 (November)
- Befragung 2015 (Februar, Mai, August)

Ursprünglich wurde für die SiRENE-Studie der Belastungszustand des Jahres 2011 verwendet, da für die anderen Transportlärmarten (Eisenbahn- und Straßenlärm) schweizweit nur Daten für dieses Jahr verfügbar waren. Für die vorliegende Studie wurde für BSL ebenfalls der Belastungszustand 2011 verwendet, da keine aktuelleren Berechnungen verfügbar waren. Für GVA und ZRH wurden hingegen je nach Befragungsjahr die aktuelleren Zustände des Jahres 2014 und 2015 verwendet (2014 für erste drei Wellen und 2015 für letzte Welle). Im Gegensatz zur Lärmstudie 2000 wurden hier die ganzen Jahresbelastungen verwendet, da sich der Flugbetrieb in den Monaten nach den Interviews kaum vom Betrieb vor den Interviews unterschied. Die Befragungen um PAY wurden hier nicht berücksichtigt, da PAY ein Militärflugplatz ist, wo Kampffjets als Lärmquelle dominieren.

Für die SiRENE-Studie wurden akustische Kenndaten für insgesamt 3155 Immissionspunkte aufbereitet, nämlich 348 (Befragung BSL), 581 (Befragung GVA 2014), 191 (Befragung GVA 2015), 1552 (Befragung ZRH 2014) und 483 Immissionspunkte (Befragung ZRH 2015). Die Datengrundlagen stammen aus den Empa-Projekten Nr. 740319 und 740847 (*Footprints* BSL 1999), 5211.00810.100 (SiRENE-Studie, Aufbereitung der Bewegungsliste für BSL 2011), 5214.008763 (GVA 2014), 5214.011976 (GVA 2015), 5214.008708 und 5214.008333 (ZRH 2014), sowie 5214.011975 und 5214.012095 (ZRH 2015). Die Simulationen zur Ermittlung der *Footprints* erfolgten mit FLULA2 Version 001 und dem Quelldatensatz RC_91 (BSL) resp. mit der aktuellen FLULA2 Version 004 und dem Quelldatensatz RC2012_01 (GVA und ZRH 2014 und 2015) (Empa, 2010). Aus den Berechnungen standen die *Footprints* ($\bar{L}_{AE,j}$ und $\bar{L}_{AS,max,j}$) sowie die Bewegungslisten zur Verfügung. Aus den Bewegungslisten wurden die Bewegungsstatistiken aufbereitet. Darauf basierend wurden die unter Abschnitt 3.2.1 aufgeführten akustischen Kenngrößen ermittelt. Für GVA 2014 und 2015 war die energieäquivalenten L_d , L_e und L_n bereits verfügbar, und für ZRH 2014 und 2015 der L_n (aus Berechnungen zum Zürcher Fluglärm-Index ZFI). Für BSL 2011 waren die L_d , L_e und L_n im Rahmen von SiRENE zwar ebenfalls bereits berechnet worden, allerdings durch die Firma n-sphere AG. Die Empa berechnete diese Belastungen daher ebenfalls neu, damit der gesamte Datensatz auf denselben Berechnungsgrundlagen beruhte.

3.2.2 Charakterisierung der im Rahmen der Schweizer Studien untersuchten Flughäfen

Im Rahmen von Leq+X wurden folgende Flughafenkennwerte für die Schweizer Flughäfen ermittelt:

- Anzahl **Flugbewegungen** Tag (06–22 h), Nacht (06–22 h) und insgesamt (Tag und Nacht).
- **Betriebsrichtung**: Anteil Bewegungen pro Piste, separat für Starts und Landungen sowie für den Tag (06–22 h) und die Nacht (22–06 h). Für BSL 2010 sowie 2012–2015 sind die Informationen

nur für den Gesamt-Tag verfügbar, aus den den Umweltberichten des EuroAirport Basel Mulhouse Freiburg². Die Resultate finden sich im Anhang A. Im Folgenden wird die Flugbetriebsrichtung anhand der vier Quadranten Q1 (nordöstlicher Raum) bis Q4 (südöstlicher Raum) dargestellt (siehe unten, Abbildung 3-2 bis Abbildung 3-4), wobei die Bewegungen je nach Flugrichtung von/auf die Pisten der Flughäfen auf die vier Quadranten aufgeteilt werden. So werden beispielsweise für Basel die Starts ab Piste 15 und Landungen auf Piste 33 dem Quadranten Q2 zugeordnet.

- **Flottenmix:** Der Flottenmix wurde nur für die Start-Bewegungen über die 24 Stunden des ganzen Tages ausgewertet, da diese energetisch die Gesamtbelastung dominieren. Für BSL sind diese Informationen nur für das Berechnungsjahr 2011 verfügbar.
 - Bewegungsanteile Propeller- und Strahlflugzeuge
 - Bewegungsanteile „schwere“ (Großraumflugzeuge) und „leichte“ Flugzeuge (Standardrumpflugzeuge), vgl. z. B. (Martini, Manello & Scotti, 2013; Cointin et al., 2016). Für diese Einteilung wurde hier eine Massengrenze der maximalen Abflugmasse MTOM von 140 t gewählt.
 - Verhältnis der lärmäquivalenten zu realen Flugbewegungen $N_{eq}/N_{rea}L$
- **Bewegungen in der Nachtruhezeit:** Anzahl Bewegungen während des erlaubten Verspätungsabbaus, während der Sperrzeit, sowie insgesamt während der Nachtruhezeit (Verspätungsabbau plus Sperrzeit), unter Berücksichtigung der sich über die Jahre ändernden Nachtruhezeiten. Für BSL sind diese Informationen vollständig nur für das Jahr 2011 bekannt. Die Ergebnisse sind im Anhang A aufgeführt.

Das Konzept der **lärmäquivalenten Bewegungen** wurde im Abschnitt 3.1.2.1 eingeführt. Da der Quellendatensatz von FLULA2 nicht den AzB-Gruppen entspricht, wurde das Konzept analog auf den Quellendatensatz RC2001_01 bzw. RC2012_01 (Empa, 2010) angewendet. Als Referenz wurde hierfür der A320 verwendet, welcher der AzB-Gruppe S5.2 entspricht. Die Analysen wurden, je nach Berechnungsjahr (s.u.), unter Verwendung des RC-Datensatzes RC2001_01 (ZRH 1997 – 2003; BSL 2011) bzw. RC2012_01 (GVA und ZRH 2010 – 2015) durchgeführt.

Pro Erhebungsjahr der Lärmstudie 2000 sowie SiRENE-Studie (vgl. Abschnitt 3.2.1) wurde eine Zeitreihe von 5 Jahren zurück erarbeitet, um objektiv **High-Rate-Change- (HRC)** vs. **Low-Rate-Change (LRC)-Flughäfen** unterscheiden zu können. Somit ergaben sich folgende Jahre für die Charakterisierungen:

- **BSL 2010 – 2015** (Erhebungsjahr 2014: 2010 – 2014; Erhebungsjahr 2015: 2011 – 2015)
- **ZRH 1997 – 2003, 2010 – 2015** (Erhebungsjahr 2001; 1997 – 2001; Erhebungsjahr 2003: 1999 – 2003; Erhebungsjahr 2014: 2010 – 2014; Erhebungsjahr 2015: 2011 – 2015)
- **GVA 2010 – 2015** (Erhebungsjahr 2014: 2010–2014; Erhebungsjahr 2015: 2011–2015)

Für GVA und ZRH standen für alle Erhebungsjahre detaillierte Grundlagedaten zur Verfügung. Für BSL war dies nur für das Berechnungsjahr 2011 der Fall. Für die übrigen Jahre wurden die Kenndaten, soweit verfügbar, den Umweltberichten des EuroAirport Basel Mulhouse Freiburg entnommen³.

² Aktuelle Publikationen verfügbar unter <https://www.euroairport.com/de/euroairport/umwelt/luftverkehr-und-umwelt/publikationen.html>.

³ Aktuelle Publikationen sind online verfügbar unter <https://www.euroairport.com/de/euroairport/umwelt/luftverkehr-und-umwelt/publikationen.html>.

Wenn für BSL 2011 beide Quellen verfügbar waren (Umweltbericht sowie detaillierte Berechnungsgrundlagen) werden beide aufgeführt. Die Zahlen weichen teilweise etwas voneinander ab, was u. a. auf die Datenaufbereitung für die Fluglärmrechnung sowie auf unterschiedliche Definitionen der Flugzeuggruppen (z. B. Umweltberichte: "Gewerbliche Flüge" vs. Fluglärmrechnungen: "Großflugzeuge" mit MTOM > 8618 kg) zurückzuführen ist.

3.2.2.1 Der Flughafen Basel (BSL)

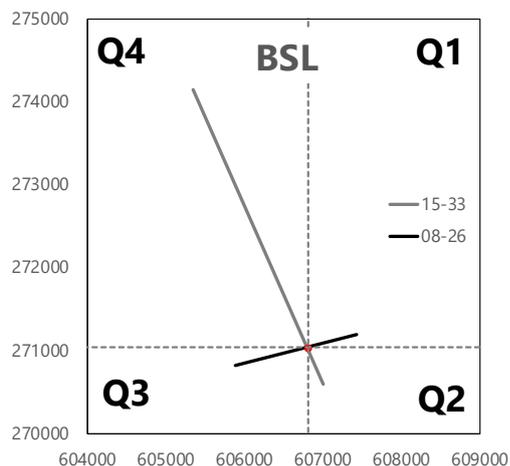


Abbildung 3-2. Pistensystem am Flughafen Basel (Pisten 08-26 und 16-34) mit Referenzpunkt (rot; 47° 35' 24'' N, 07° 31' 45'' O (WGS-84) bzw. 606810, 271037 (Schweizer Landeskoordinaten) gemäß AIP VFR Manual und Unterteilung des Raumes in die vier Quadranten Q1–Q4.

Am Flughafen BSL nahmen die Flugbewegungen von 2010 bis 2015 insgesamt deutlich um 25 % zu (Tabelle 3-7), wobei diese Zunahme am Tag mit 28 % stärker war als in der Nacht mit 8%. Der Nachtfluganteil lag bei 11 – 14 %. Der durchschnittliche jährliche Zuwachs der Flugbewegungen betrug 4,6 % (2010-2015). Der Flottenmix konnte nur für das Jahr 2011 charakterisiert werden. Für dieses Jahr, das aber auch für die anderen Jahre repräsentativ sein dürfte, zeigt sich, dass der Verkehr am Flughafen BSL durch eher kleineres bzw. leiseres Fluggerät (leiser als eine reine A320-Flotte) dominiert wird (43 % A320, 17 % FK70 und 15 % RJ85), mit fast 29-mal mehr Standardrumpf- als Großraumflugzeugen und rund 9-mal mehr Strahl- als Propellerflugzeugen.

Tabelle 3-7. Verkehrsanalyse für den Flughafen Basel für die Jahre 2010–2015.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Starts 24 h			Bemerkungen
			Verhältnis N_{eq}/N_{real}	NBA/WBA *	Jet/Prop †	
2010	58128	14 %				Umweltbericht 2010
2011	66185	13 %				Umweltbericht 2011
2011 †	66878	13 %	0.92	28.7	9.3	Berechnung 2011
2012	71462	11 %				Umweltbericht 2012
2013	67663	12 %				Umweltbericht 2013
2014	71150	12 %				Umweltbericht 2014
2015	72687	12 %				Umweltbericht 2015

Anmerkungen.

* Verhältnis Bewegungen *Narrow-Body* (Standardrumpfflugzeuge) zu *Wide-Body* (Großraumflugzeuge)

† Verhältnis Bewegungen Strahlflugzeuge zu Propellerflugzeuge

† Für die Belastungsrechnungen 2011 verwendete Daten

Der Flugbetrieb von/ab den Pisten von BSL verlief größtenteils durch die Quadranten Q2 und Q4 (Tabelle 3-8). Die Querpiste 06-26 (Q1 und Q3) wurde deutlich weniger benutzt. Dies gilt jedoch für die Bewegungen über die 24 Stunden des Tages. Die für das Jahr 2011 verfügbaren detaillierten Daten zeigen, dass sich die Betriebsrichtung zwischen Tag und Nacht stark ändert. In der Nacht führten die An-/Abflüge hauptsächlich durch Q4 (Starts von Piste 15, Landungen auf Piste 33), am Tag hingegen werden Q2 und Q4 ähnlich stark durchflogen (Starts und Landungen von/auf Piste 15; Anhang A). Über die Jahre ist kein Trend feststellbar.

Tabelle 3-8. Flugbetriebsrichtungen in die vier Quadranten Q1–Q4 für den Flughafen Basel für die Jahre 2010–2015, gemäß Umweltberichten (oben; nur Angaben als Summe über Tag + Nacht verfügbar) bzw. für das Jahr 2011 zusätzlich aus detaillierten Daten der Berechnungen (unten).

Jahr	Tageszeit	Q1	Q2	Q3	Q4	Total
2010	Tag + Nacht	0 %	41 %	3 %	56 %	100 %
2011	Tag + Nacht	0 %	41 %	3 %	55 %	100 %
2012	Tag + Nacht	0 %	41 %	3 %	55 %	100 %
2013	Tag + Nacht	0 %	40 %	3 %	56 %	100 %
2014	Tag + Nacht	0 %	40 %	3 %	57 %	100 %
2015	Tag + Nacht	0 %	40 %	3 %	57 %	100 %
2011 †	Tag + Nacht	0 %	42 %	3 %	55 %	100 %
	Tag	0 %	46 %	4 %	50 %	100 %
	Nacht	0 %	6 %	0 %	94 %	100 %

Anmerkungen.

† Für die Belastungsrechnungen 2011 verwendete Daten

Insgesamt änderte sich der Flugbetrieb über die Jahre 2010 – 2015 nur wenig, so dass BSL als LRC-Flughafen klassiert werden kann.

3.2.2.2 Der Flughafen Genf-Cointrin (GVA)

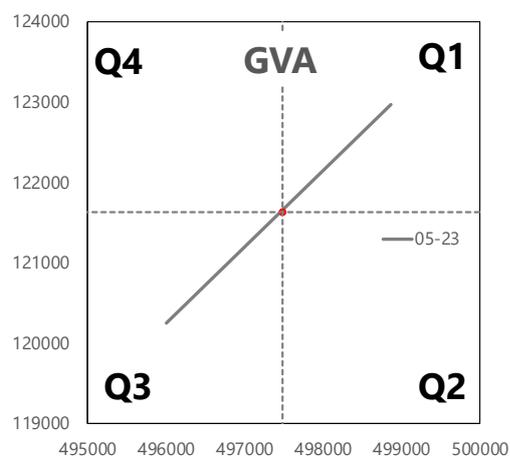


Abbildung 3-3. Pistensystem am Flughafen Genf (Piste 05-23) mit Referenzpunkt (rot; 46° 14' 18'' N, 06° 06' 34'' O (WGS-84) bzw. 497476, 121636 (Schweizer Landeskoordinaten) gemäß AIP VFR Manual und Unterteilung des Raumes in die vier Quadranten Q1–Q4.

Am Flughafen GVA nahmen die Flugbewegungen von 2010 bis 2015 deutlich um 13 % zu, wobei die Bewegungen in der Nacht mit 32 % deutlich stärker zunahmen als am Tag mit 12 %. Der Nachtfluganteil lag bei 5 – 6 % (Tabelle 3-9). Die Charakterisierung des Flottenmix zeigt, dass der Verkehr am Flughafen GVA durch kleineres bzw. leiseres Fluggerät (deutlich leiser als eine reine A320-Flotte) dominiert wird, mit rund 30-mal mehr Standardrumpf- als Großraumflugzeugen und rund 16 – 24-mal mehr Strahl- als Propellerflugzeugen.

Tabelle 3-9. Verkehrsanalyse für den Flughafen Genf für die Jahre 2010–2015.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Starts 24 h			Bemerkungen
			Verhältnis N_{eq}/N_{real}	NBA/WBA *	Jet/Prop †	
2010	149808	5 %	0.85	30.0	20.6	
2011	161466	5 %	0.86	27.7	22.2	
2012	167228	5 %	0.84	29.4	22.0	
2013	164608	5 %	0.84	30.4	23.5	
2014	167817	6 %	0.84	31.4	17.0	
2015	169791	6 %	0.85	31.4	15.7	

Anmerkungen.

* Verhältnis Bewegungen *Narrow-Body* (Standardrumpfflugzeuge) zu *Wide-Body* (Großraumflugzeuge)

† Verhältnis Bewegungen Strahlflugzeuge zu Propellerflugzeuge

Der Flugbetrieb von/ab der Piste von GVA verlief am Tag zu gleichen Teilen durch die Quadranten Q1 und Q3 (Tabelle 3-10), in der Nacht jedoch stärker (zu rund 60 %) durch Q1 (dominiert durch Landungen auf Piste 23; vgl. Anhang A). Über die Jahre ist kein Trend feststellbar.

Tabelle 3-10: Flugbetriebsrichtungen in die vier Quadranten Q1–Q4 für den Flughafen Genf für die Jahre 2010–2015 am Tag und in der Nacht.

Jahr	Tageszeit	Q1	Q2	Q3	Q4	Total
2010	Tag	49 %		51 %		100 %
2011	Tag	49 %		51 %		100 %
2012	Tag	50 %		50 %		100 %
2013	Tag	49 %		51 %		100 %
2014	Tag	49 %		51 %		100 %
2015	Tag	49 %		51 %		100 %
2010	Nacht	57 %		43 %		100 %
2011	Nacht	58 %		42 %		100 %
2012	Nacht	58 %		42 %		100 %
2013	Nacht	57 %		43 %		100 %
2014	Nacht	60 %		40 %		100 %
2015	Nacht	54 %		46 %		100 %

Insgesamt änderte sich der Flugbetrieb über die Jahre 2010–2015 nur wenig, so dass GVA LRC-Flughafen klassiert werden kann.

3.2.2.3 Der Flughafen Zürich (ZRH)

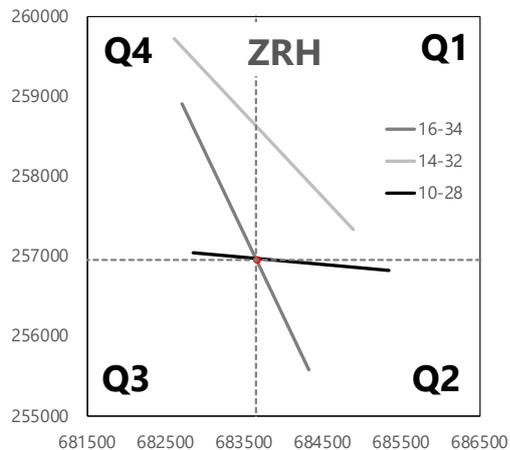


Abbildung 3-4. Pistensystem am Flughafen Zürich (Pisten 10-28, 14-32 und 16-34) mit Referenzpunkt (rot; 47° 27' 29" N, 08° 32' 53" E (WGS-84) bzw. 6836558, 256955 (Schweizer Landeskoordinaten) gemäß AIP VFR Manual und Unterteilung des Raumes in die vier Quadranten Q1–Q4.

Am Flughafen ZRH nahmen die Flugbewegungen zwischen 1997 und 2015 um 1 % ab (Tabelle 3-11). Allerdings nahmen die Bewegungen zwischen 1997 und 2000 deutlich um 21 % zu (in der Nacht gar um 113 %) und brachen danach zwischen 2000 und 2003 um 19 % ein (Gründe: Swissair Grounding; Terroranschläge vom 9. September). Zwischen 2010 – 2015 blieben die Bewegungen hingegen annähernd konstant. Der Nachtanteil nahm über die Jahre leicht zu von 2 % (2003) auf 5 % (2015).

Die Analyse der lärmäquivalenten Bewegungen zeigt, dass der Verkehr am Flughafen ZRH im Jahr 1997 größeres bzw. lauterer Fluggerät dominiert wird (Tabelle 3-11). Das Verhältnis von lärmäquivalenten zu realen Bewegungen ging aber bei steigenden Bewegungszahlen bis 2003 deutlich zurück. Es wurde also zunehmend moderneres und leiseres Gerät eingesetzt. Zwischen 2010 und 2015 blieb das Verhältnis annähernd konstant (annähernd gleich laut wie eine reine A320-Flotte). Das Verhältnis von Standardrumpf- zu Großraumflugzeugen ist auf ZRH mit Werten von rund 7 – 9 deutlich geringer als in BSL und GVA, es verkehren also anteilmäßig mehr Großraumflugzeuge auf ZRH. In den Jahren 1997 – 2003 verkehrten zudem anteilmäßig deutlich mehr Propellerflugzeuge auf ZRH als in den Jahren 2010 – 2015, wo rund 16 – 25-mal mehr Strahl- als Propellerflugzeuge auf ZRH verkehren (ähnlich wie in GVA).

Der Flugbetrieb von/ab den Pisten von ZRH verlief am Tag hauptsächlich durch Quadrant Q4 (Landungen 14, Starts 28) und weniger durch Q2 (Südstarts, Süd- und Ostlandungen), wobei über die Jahre dieser Trend recht stabil blieb (Tabelle 3-12). In der Nacht hingegen ergab sich zwischen 2003 und 2010 eine deutliche Änderung im Flugregime. In den Jahren 1997–2003 verlief der Flugbetrieb fast ausschließlich durch Q4 (größtenteils Starts ab Piste 34 und Landungen auf Piste 16), während in den Jahren 2010–2015 die Bewegungen ähnlich stark auf Q2 und Q4 verteilt waren (Starts ab Pisten 32 und 34, Landungen auf Pisten 28 und 34). Für ZRH sind die Flugbetriebsrichtungen der letzten Jahre u. a. im aktuellen Bericht zum Zürcher Fluglärm-Index ZFI dargestellt (Empa, 2018).

Tabelle 3-11. Verkehrsanalyse für den Flughafen Zürich für die Jahre 1997–2003 und 2010–2015.

Jahr	Bewegungen	davon nachts	Verhältnis N_{eq}/N_{real}	Starts 24 h		Bemerkungen
				NBA/WBA *	Jet/Prop †	
1997	248638	2 %	1.82	7.3	4.3	
1998	259658	2 %	1.51	7.4	4.2	
1999	277226	3 %	1.53	7.6	5.2	
2000	299614	4 %	1.45	7.7	4.7	
2001	283186	4 %	1.28	7.8	5.3	Jahresbewegungen
2001 †	299896	4 %	1.30	7.8	5.0	Hochskalierte Bewegungen
2002	258368	2 %	1.15	8.2	5.8	
2003	244002	3 %	1.05	8.6	6.5	Jahresbewegungen
2003 †	249022	3 %	1.05	8.6	5.6	Hochskalierte Bewegungen
2010	244851	4 %	0.96	9.3	20.0	
2011	256381	4 %	0.98	9.0	18.8	
2012	250594	4 %	1.01	8.1	25.0	
2013	245185	4 %	1.01	8.0	20.8	
2014	246420	4 %	0.99	7.9	15.7	
2015	246879	5 %	0.99	7.7	17.2	

Anmerkungen.

* Verhältnis Bewegungen *Narrow-Body* (Standardrumpfflugzeuge) zu *Wide-Body* (Großraumflugzeuge)

† Verhältnis Bewegungen Strahlflugzeuge zu Propellerflugzeuge

† Hochskalierung der Bewegungen von 243 Tagen (Januar–August) auf das ganze Jahr (365 Tage). Für die Belastungsrechnungen 2001 und 2003 verwendete Daten.

Insgesamt änderte sich der Flugbetrieb über die Jahre 1997–2003 stark (Privatisierung im Jahr 1999; Pistenschließung 10-28 im Rahmen der 5. Ausbautappe 2000; Einführung Ostlandungen 2002; Einführung Südlandungen 2003), so dass ZRH für diese Jahre als *HRC*-Flughafen klassiert werden kann. Dies zeigt sich auch an den außerordentlich vielen Lärmklagen in diesen Jahren (Bissegger, 2013). Für die Jahre 2010–2015 änderte sich der Flugbetrieb hingegen nur wenig, so dass ZRH in diesen Jahren als *LRC*-Flughafen klassiert werden kann.

Tabelle 3-12. Flugbetriebsrichtungen in die vier Quadranten Q1–Q4 für den Flughafen Zürich für die Jahre 1997–2003 und 2010–2015 am Tag und in der Nacht.

Jahr	Tageszeit	Q1	Q2	Q3	Q4	Total
1997	Tag		17 %		83 %	100 %
1998	Tag		18 %		82 %	100 %
1999	Tag		17 %		83 %	100 %
2000	Tag		21 %		79 %	100 %
2001	Tag		15 %		85 %	100 %
2001*	Tag		15 %		85 %	100 %
2002	Tag		14 %		86 %	100 %
2003	Tag		19 %		81 %	100 %
2003*	Tag		19 %		81 %	100 %
2010	Tag		18 %		82 %	100 %
2011	Tag		17 %		83 %	100 %
2012	Tag		18 %		82 %	100 %
2013	Tag		17 %		83 %	100 %
2014	Tag		17 %		83 %	100 %
2015	Tag		19 %		81 %	100 %
1997	Nacht		2 %		98 %	100 %
1998	Nacht		2 %		98 %	100 %
1999	Nacht		4 %		96 %	100 %
2000	Nacht		3 %		97 %	100 %
2001	Nacht		5 %		95 %	100 %
2001 †	Nacht		2 %		98 %	100 %
2002	Nacht		30 %		70 %	100 %
2003	Nacht		26 %		74 %	100 %
2003 †	Nacht		29 %		71 %	100 %
2010	Nacht		50 %		50 %	100 %
2011	Nacht		51 %		49 %	100 %
2012	Nacht		55 %		45 %	100 %
2013	Nacht		52 %		48 %	100 %
2014	Nacht		57 %		43 %	100 %
2015	Nacht		61 %		39 %	100 %

Anmerkungen.

† Hochskalierung der Bewegungen von 243 Tagen (Januar–August) auf das ganze Jahr (365 Tage).

Für die Belastungsrechnungen 2001 und 2003 verwendete Daten.

3.3 Akustische Daten aus Deutschland und der Schweiz: Vergleichbarkeit und Unsicherheiten

3.3.1 Vergleichbarkeit der akustischen Immissionsdaten

Die akustischen Immissionsgrößen ($L_{AS,max,log,LS}$, $L_{Aeq}(k = 10)$, $L_{Aeq}(k \neq 10)$, NAT_{LS}) wurden für die deutschen und Schweizer Studien mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren berechnet, namentlich mit der AzB für Deutschland und mit FLULA2 für die Schweiz (vgl. Abschnitte 3.1 und 3.2). Die Verfah-

ren selbst sind in ihrer Natur verschieden. Sie verwenden unterschiedliche Rechenverfahren (beispielsweise AzB: Segmentierungsverfahren, FLULA2: Zeitschrittverfahren) und unterschiedliche Datengrundlagen (AzB: entwickelt für deutsche Flughäfen; FLULA2: entwickelt für Schweizer Flughäfen; Empa, 2010; Isermann, 2011). Auch die Näherungsansätze für die nicht-energieäquivalenten L_{Aeq} sind unterschiedlicher Natur (s.u.).

Nichtsdestotrotz sind die resultierenden akustischen Immissionsgrößen vergleichbar und weisen keinen systematischen Offset zueinander auf. Das Ziel beider Verfahren ist es, die "realen" Immissionen zu reproduzieren, und hierfür wurden sie mit Messungen validiert. Sie bilden die lokalen Situationen (Operationen, Flugverfahren, Flottenzusammensetzungen) in Deutschland (AzB) bzw. der Schweiz (FLULA2) adäquat ab. Validierungen der Berechnungen mit Messungen finden sich für die AzB beispielsweise in Blinstrub, Isermann, Schmid, und Raitor, T (in Vorbereitung) und für FLULA2 in Thomann (2007) und Schäffer et al. (2011). Hingegen könnte die AzB nicht ohne Weiteres auf Schweizer Flughäfen bzw. FLULA2 nicht ohne Weiteres auf Deutsche Flughäfen angewendet werden, weil die akustischen und flugtechnischen Basisdaten der beiden Rechenmodelle den jeweiligen nationalen Gegebenheiten angepasst sind.

Daher bilden die Berechnungen des DLR mit AzB für deutsche Flughäfen und die der Empa mit FLULA2 für Schweizer Flughäfen die entsprechenden gemessenen Pegelwerte realitätsnah ab. Sie sind somit eine gute Grundlage für die vorliegende Wirkungsforschung. Trotz unterschiedlicher Berechnungsmodelle sind die akustischen Zielgrößen vergleichbar ($L_{AS,max,log,LS}$, $L_{Aeq}(k = 10)$ und NAT_{LS}) und weisen auch ähnliche Unsicherheiten auf (siehe unten).

Eine Ausnahme bilden die nicht-energieäquivalenten $L_{Aeq}(k \neq 10)$. Diese wurden zum größten Teil nicht direkt berechnet, sondern mussten modellbedingt mit unterschiedlichen Näherungsansätzen bestimmt werden:

- Beim AzB-Algorithmus kann der k -Wert einfach geändert werden. Berechnungen mit $k = 20$ oder $k = 30$ wurden aber durch Messungen nie verifiziert. Im Projekt Leq+X waren aber die Eingabedaten für NORAH nicht verfügbar, so dass die Werte für $L_{Aeq}(k \neq 10)$ nicht nachgerechnet werden konnten, sondern mittels einer Näherung auf der Basis der Frankfurter RDF-Studie geschätzt werden mussten.
- Bei FLULA2 hingegen gibt es im Verfahren keine strenge Trennung zwischen Quelle und Ausbreitung, sondern einen mathematischen Ansatz, der beides kombiniert. Die für diesen Ansatz benötigte Näherungslösung musste daher auf Basis der *Footprints* (L_{AE} , $L_{AS,max}$) entwickelt werden. Berechnungen mit $k = 20$ oder $k = 30$ wurden bisher nie durchgeführt und somit auch durch Messungen nie verifiziert.

Aufgrund der fundamental unterschiedlichen Näherungslösungen fielen erwartungsgemäß die Ergebnisse des Vergleiches "Näherungslösung vs. exakte Berechnung" für die AzB und FLULA2 anders aus. Tatsächlich bildet die Näherungslösung des DLR für $k = 20$ die exakte Berechnung gut ab (Differenzen von ca. 0 bis +2 dB) unterschätzt die exakte Lösung für $k = 30$ aber eher etwas (Differenzen von ca. 0 bis -4 dB). Die Empa-Näherung hingegen unterschätzt die exakte Lösung stärker ($k = 20$: bis ca. -5 dB; $k = 30$: bis ca. -15 dB). Die Trends werden jedoch mit beiden Näherungen vergleichbar und richtig abgebildet. Zudem ist zu beachten, dass es sich hier streng genommen nicht "dB" sondern von "kB" handelt (für $k \neq 10$), und dass für $k = 20$ bzw. $k = 30$ eine Differenz von 3 kB weniger als einer Verdoppelung bzw. Halbierung der Schallenergie entspricht. In diesem Zusammenhang wird oft der

sog. „Halbierungsparameter“ $q = k \cdot \lg(2)$ verwendet. Er besagt, dass eine Verdoppelung bzw. Halbierung der Schallenergie zu einer Änderung von q "kB" führt (also 6 bzw. 9 "kB" für $k = 20$ bzw. $k = 30$)

Die Näherungen weisen jedoch erhöhte Unsicherheiten auf (s.u.). Dies dürfte zu mehr Streuung in den Resultaten führen und es schwieriger machen, statistisch signifikante Effekte bezüglich Belästigung bzw. Schlafstörung nachzuweisen. Dennoch kann nach derzeitigen Kenntnisstand davon ausgegangen werden, dass die Korrekturen näherungsweise das liefern, was eine "exakte" Rechnung mit $k = 20$ oder $k = 30$ ergeben würde – wobei $k = 30$ mit grosser Vorsicht zu interpretieren ist. Hier scheinen die Näherungen noch von der Art des Flugzustandes (Start/Landung) und wohl auch vom Abstand vom Flughafen abzuhängen. Dennoch sollten beide Näherungen im relevanten Pegelbereich anwendbar sein, so dass es zulässig war, auch die nicht-energieäquivalenten Daten für die vorliegende Untersuchung in einem Datensatz zu kombinieren.

Abschliessend bleibt festzuhalten, dass im Bereich der nicht-energieäquivalenten Mittelungspegel noch Forschungsbedarf besteht, welcher auch weitere Erkenntnisse für die Lärmwirkungsforschung liefern könnte.

3.3.2 Berechnungsunsicherheiten

Nicht nur sind die akustischen Immissionsgrössen vergleichbar (vgl. Abschnitt 3.3.1), auch die Unsicherheiten der mittels AzB und FLULA2 ermittelten Grössen sind ähnlich.

Generell können Unsicherheiten bis anhin nur im näheren Umfeld von Flughäfen, wo Messwerte von Fluglärmüberwachungsanlagen greifbar sind, zuverlässig abgeschätzt werden, d.h. im Bereich von rund 5 bis 15 km Flughäfen entfernt.

Für den energieäquivalenten Mittelungspegel $L_{Aeq}(k = 10)$ betragen die Unsicherheiten von Fluglärm-berechnungen mittels AzB im Sinne von Standardabweichung rund 1 dB. Dies ergibt sich aus der Anpassung der AzB-Basisdaten an Messungen der Fluglärmüberwachungsanlagen von sieben deutschen Flughäfen. Für FLULA2 wurden die Unsicherheiten für den $L_{Aeq}(k = 10)$ zu 0.5 dB am Tag bis 1.0 dB in der Nacht geschätzt (Schäffer, Plüss und Thomann, 2014; Thomann, 2007). Die Unsicherheiten der AzB und von FLULA2 sind somit sehr ähnlich.

In grösseren Entfernungen von Flughäfen (20 bis 30 km oder weiter entfernt) gibt es bis anhin keine Fluglärmüberwachungsanlagen. Entsprechend ist eine zuverlässige Schätzung von Unsicherheiten in diesen Bereichen zurzeit nicht möglich. Hier kann für beide Verfahren (AzB, FLULA2) für die Abschätzung der Unsicherheiten ein Zuschlag von rund 1 dB gegeben werden. Die Berechnungsunsicherheiten in grossen Entfernungen sollten ebenfalls Thema in zukünftigen Forschungsarbeiten ermittelt werden. Hierzu sind aber entsprechende Messdaten zwingend. Der Empa liegen beispielsweise für Landungen auf ZRH Messungen über einen begrenzten Zeitraum in einer Entfernung von > 50 km vom Aufsetzpunkt vor.

Bezüglich der nicht-energieäquivalenten Mittelungspegel $L_{Aeq}(k \neq 10)$ sind die Unsicherheiten sicherlich etwas grösser, da hier Näherungsansätze verwendet wurden. Eine umfassende und belastbare Quantifizierung steht hier allerdings noch aus, denn die Eigenschaften von Mittelungspegeln sind sehr komplex. Sie stellen eine Kombination aus Maximalpegel, Geräuschkdauer und Geräuschkhäufigkeit dar, wobei Pegel und Dauer in der Regel negativ miteinander korreliert sind. Das führt dazu, dass identische L_{eq} -Werte nur unter Kenntnis der Randbedingungen (Art und Umfang des Flugbetriebes,

Abstand des Immissionsortes zum Flughafen) miteinander verglichen werden können. Die Variation des Äquivalenzparameters ist hier also nur ein weiterer Einflussfaktor. Für Berechnung insbesondere von nicht-energieäquivalenten Mittelungspegeln und die damit verbundenen Quantifizierung der Unsicherheit besteht auf jeden Fall noch Forschungsbedarf.

4 Befragungsdaten

Für unsere Analysen wurden aus den Fragebögen der Studien RDF, NORAH, SiRENE und LS2000, aus denen unsere 12 Stichproben stammen (vgl. Tab. 2-1), neben den Alters- und Geschlechtsangaben die in Tabelle 4-1 dargestellten (weitgehend) übereinstimmenden Items (Fragen) zusammengetragen.

Tabelle 4-1. In den Studien erhobene fluglärmbedingte Belästigung und Schlafstörung.

Studie	Variablen/Frageformulierung	Antwortskala	Reihenfolge
Fluglärmbelästigung, 5-stufig gem. ICBEN-Empfehlung			
RDF	Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate hier bei Ihnen denken, wie stark haben Sie sich durch den Lärm von folgenden Lärmquellen insgesamt gestört oder belästigt gefühlt? • durch Lärm vom Flugverkehr	überh. nicht... etwas... mittelmässig... stark... äusserst...	absteigend
NORAH	Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate dort bei Ihnen denken: Wie stark haben Sie sich durch den Lärm vom ... insgesamt gestört oder belästigt gefühlt? [...] • Und wie ist es mit dem Lärm vom ... Flugverkehr?	...gestört oder belästigt	aufsteigend
SiRENE	Wenn Sie an die letzten zwölf Monate bei Ihnen denken, wie stark haben Sie sich durch Lärm von der Strasse, von der Eisenbahn oder von Flugzeugen insgesamt gestört oder belästigt gefühlt? Fluglärm	...gestört oder belästigt	aufsteigend
LS2000		nicht... sehr schwach... schwach... deutlich... stark... sehr stark... unerträglich... ...belästigt	--
Fluglärmbelästigung, 11-stufig gem. ICBEN-Empfehlung			
RDF	Nun habe ich hier eine Messlatte von Null bis Zehn, auf der Sie angeben können, wie sehr Sie der Fluglärm gestört oder belästigt hat. Wenn Sie sich äusserst gestört oder belästigt fühlen, wählen Sie die Zehn, wenn Sie sich überhaupt nicht gestört oder belästigt fühlen, geben Sie die Null an, und wenn Sie irgendwo dazwischen liegen, wählen Sie bitte eine Zahl zwischen Null und Zehn. Wenn Sie nun noch einmal an die letzten 12 Monate hier bei Ihnen denken, welche Zahl zwischen Null und Zehn gibt am besten an, wie stark Sie sich durch den Fluglärm insgesamt gestört oder belästigt fühlten?	numerische Skala von 0 bis 10 mit Benennung der Endpunkte 0 (überh. nicht) und 10 (äusserst)	--
NORAH	-		--
SiRENE	Wenn Sie an die letzten zwölf Monate bei Ihnen denken, welche Zahl zwischen 0 und 10 gibt am besten an, wie stark Sie sich durch Lärm von der Strasse, von der Eisenbahn oder von Flugzeugen insgesamt gestört oder belästigt fühlten? (bitte die passende Zahl umkreisen)		aufsteigend
LS2000	Jetzt kommt eine Messlatte von 0 bis 10, auf der Sie angeben können, wie sehr Sie der Fluglärm insgesamt gestört oder belästigt hat. Wenn Sie sich äusserst gestört oder belästigt fühlten, umkreisen Sie die 10, wenn Sie sich überhaupt nicht gestört oder belästigt fühlten, umkreisen Sie bitte die Null, und wenn Sie ir-		aufsteigend

Studie	Variablen/Frageformulierung	Antwortskala	Reihenfolge
	gendwo dazwischenliegen, umkreisen Sie bitte eine Zahl zwischen 0 und 10. Wenn Sie nun an die letzten 12 Monate hier bei Ihnen denken, welche Zahl zwischen 0 und 10 gibt am besten an, wie stark Sie sich durch den Fluglärm insgesamt gestört oder belästigt fühlten?		
Schlafstörung			
RDF	Wie stark hat Sie der Fluglärm in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen gestört? <ul style="list-style-type: none"> • beim Einschlafen • beim Nachtschlaf • beim Aufwachen 		absteigend
NORAH	Wie stark hat Sie der Fluglärm in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört? <ul style="list-style-type: none"> • beim Einschlafen • beim Nachtschlaf • beim Ausschlafen am Ende der Schlafzeit 	überh. nicht etwas mittelmäßig stark äußerst	aufsteigend
SIRENE	Wenn Sie an die letzten zwölf Monate bei Ihnen denken, wie stark haben Sie sich durch Lärm der folgenden Quellen, <u>in der Nacht, wenn Sie schlafen wollen</u> , gestört oder belästigt gefühlt? <ul style="list-style-type: none"> • Fluglärm 		aufsteigend
LS2000	Wie oft treten bei Ihnen in der Wohnung folgende Störungen als Folge von Fluglärm auf? <ul style="list-style-type: none"> • Stört beim Einschlafen • Weckt einen nachts auf • Weckt einen morgens zu früh auf 	nie selten manchmal oft sehr oft	aufsteigend

Die Expositions-Wirkungsanalysen erfolgen bezogen auf folgende Wirkungsgrößen:

- den Anteil der durch Fluglärm **hoch belästigten** Personen (*Percentage Highly Annoyed, % HA*);
- den Anteil der durch Fluglärm **hoch schlafgestörten** Personen (*Percentage Highly Sleep Disturbed, % HSD*).

In der LS2000-Studie wurde eine 5-stufige Häufigkeitsskala für die Störungsangaben benutzt, in den RDF- und NORAH-Studien jeweils eine 5-stufige Intensitätsskala analog zur IC BEN-Belästigungsskala. Für die Analysen zum Anteil der durch Fluglärm hoch gestörten Personen wurden Angaben auf den Intensitäts- und Häufigkeitsskalen gleichbehandelt.

Die Definition des Anteils der hoch belästigten Personen (*% HA, siehe oben*) erfolgte getrennt nach Art der verwendeten Belästigungsskala: Für die Bestimmung von *% HA* wurden die oberen zwei Werte der 5-stufigen IC BEN-Skala 4 und 5 (stark/äußerst) verwendet, d. h. Personen, die den Wert 4 oder 5 angaben, erhielten den Wert *HA* = 1, alle übrigen den Wert *HA* = 0. Soweit Studien (auch) die numerische IC BEN-Skala von 0 bis 10 zur Belästigungserfassung nutzten (s. Tabelle 4-1) wurden die oberen drei Werte 8, 9 und 10 auf dieser Skala zur Kategorie *hoch belästigt* (*HA* = 1) zusammengefasst.

Für die Bildung der Kategorie „hoch gestört“ in Bezug auf fluglärmbedingte Störungen des Schlafs wurden Personen mit Werten von 4 und 5 als „hoch gestört“ (*HSD* = 1) eingestuft, die übrigen Personen erhielten den Wert *HSD* = 0.

5 Statistische Analysen

Die Datensätze werden zunächst deskriptiv hinsichtlich der **Geschlechts- und Altersverteilung** sowie der **Pegelverteilungen** in den verschiedenen Stichproben untersucht und die **Korrelationen zwischen verschiedenen akustischen Maßen** in jeder Stichprobe betrachtet. Zudem werden die Zusammenhänge zwischen akustischen Prädiktoren und den Kriterien Prozentanteil der hoch belästigten Personen (*Percentage Highly Annoyed, % HA*) und Prozentanteil der hoch schlafgestörten Personen (*Percentage Highly Sleep Disturbed, % HSD*) in Form von **Streudiagrammen** mit klassierten Prädiktoren dargestellt.

Inferenzstatistisch erfolgt die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen verschiedenen akustischen Prädiktoren (und Kombinationen von Prädiktoren) und den Kriterien mittels **logistischen Mehrebenenanalysen**, wobei zur Berücksichtigung und Quantifizierung möglicher flughafen- bzw. stichprobenspezifischer Effekte verschiedene Flughafencharakteristika als 2.-Level-Prädiktoren berücksichtigt werden.

Nähere Angaben zu den deskriptiven und inferenzstatistischen Verfahren, den im Einzelnen untersuchten Variablen und die Ergebnisse der Analysen finden sich im folgenden Kapitel.

6 Ergebnisse

6.1 Geschlechts- und Altersverteilung

Tabelle 6-1 zeigt die Geschlechtsverteilung und das Alter (Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum) in den verschiedenen Schweizer und deutschen Stichproben. In den RDF- und NORAH-Studien haben prozentual etwas mehr Frauen und geringfügig (im Durchschnitt 5 Jahre) ältere Personen als in den LS2000- und SiRENE-Studien teilgenommen. In Berichten zu diesen Studien zeigte sich, dass das Geschlecht so gut wie keinen und das Alter einen geringfügig, umgekehrt u-förmigen Zusammenhang mit den Belästigungs- und Störungsangaben aufweist. Dies entspricht auch der Literatur (Van Gerven, Vos, Boxtel, Janssen & Miedema, 2009). Da sich außerdem keine Wechselwirkungen zwischen Geräuschpegel und Alter in den Studien zeigten, werden die Variablen Alter und Geschlecht in den nachfolgenden Analysen nicht weiter gesondert betrachtet.

Tabelle 6-1. Stichprobenverteilung nach Geschlecht und Alter in den Fluglärmwirkungsstudien.

a) LS2000- und SiRENE-Studie (CH)

	BSL2014	GVA2014	ZRH2014	ZRH2001	ZRH2003	Gesamt
	N = 198	N = 666	N = 1560	N = 1553	N = 1086	N = 5063
Geschlecht						
weiblich	121	355	826	767	460	2529
männlich	77	311	734	786	626	2534
Alter						
m (SD)	52.4 (15.3)	53.0 (15.0)	52.0 (14.6)	47.3 (16.5)	50.5 (16.0)	N = 3639
Min-Max	24-78	23-83	23-79	17-98	18-95	17-98
% HA	12,2 %	30,9 %	19,4 %	16,9 %	18,8 %	
% HSD	8,0 %	18,9 %	13,4 %	5,1 %	28,8 %	

Anmerkungen.

N = Anzahl, M = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung.

b) RDF- und NORAH-Studie (D)

	FRA2005	FRA2011	FRA2012	FRA2013	BER2012	CGN2013	STR2013	Gesamt
	N = 1603	N = 9244	N = 7108	N = 2396	N = 4324	N = 2864	N = 1636	N = 29175
Geschlecht								
weiblich	916	4905	3654	1257	2262	1474	805	15273
männlich	687	4339	3454	1139	2062	1390	831	13902
Alter								
m (SD)	52.9 (18.8)	49.5 (15.8)	57.5 (15.9)	58.8 (15.4)	58.4 (15.4)	58.8 (16.2)	57.9 (15.6)	N = 29103
Min-Max	17-96	18-96	18-100	19-92	18-100	18-95	18-97	17-100
% HA	39,5 %	45,6 %	28,8 %	42,1 %	31,8 %	43,0 %	33,1 %	
% HSD	14,1 %	16,3 %	16,5 %	9,8 %	10,3 %	17,5 %	5,0 %	

Anmerkungen.

N = Anzahl, M = arithmetisches Mittel, SD = Standardabweichung.

6.2 Pegelverteilung pro Studie und pro Flughafen und Jahr

Eine vollständige Zusammenstellung der Häufigkeitsverteilungen über Pegelklassen pro Stichprobe ist im Anhang B zu finden. Beispielhaft zeigen Abbildung 6-1 und Abbildung 6-1 (fortgesetzt) tabellarisch und graphisch die Häufigkeitsverteilungen in den Studien für L_{Aeq} -Klassen des Luftverkehrs für Tag, Nacht und 24 Stunden. Wesentlicher Unterschied zwischen den deutschen und Schweizer Stichproben ist, dass in letzteren vor allem die niedrigste Pegelklasse häufig dominiert, während in den deutschen Stichproben mittlere und höhere Geräuschpegel häufiger vertreten sind. Weiterhin ist bemerkenswert, dass die Tagespegelklasse 55-60 dB in der RDF-Studie (FRA2005) stärker als andere Pegelklassen in dieser Studie besetzt ist.

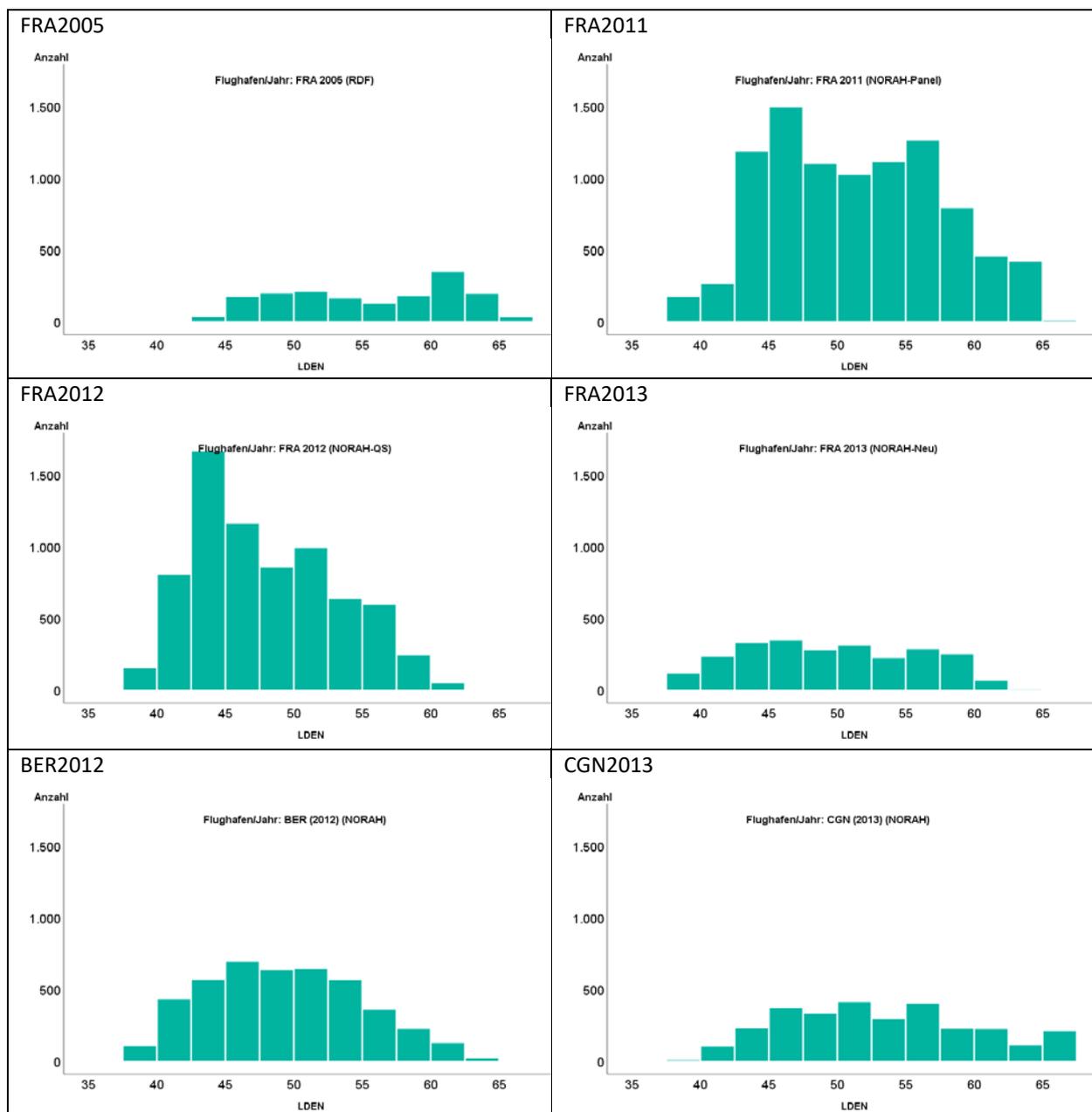


Abbildung 6-1. Häufigkeitsverteilungen über Klassen des L_{den} pro Flughafen und Jahr in den NORAH- und RDF-Studien (D).

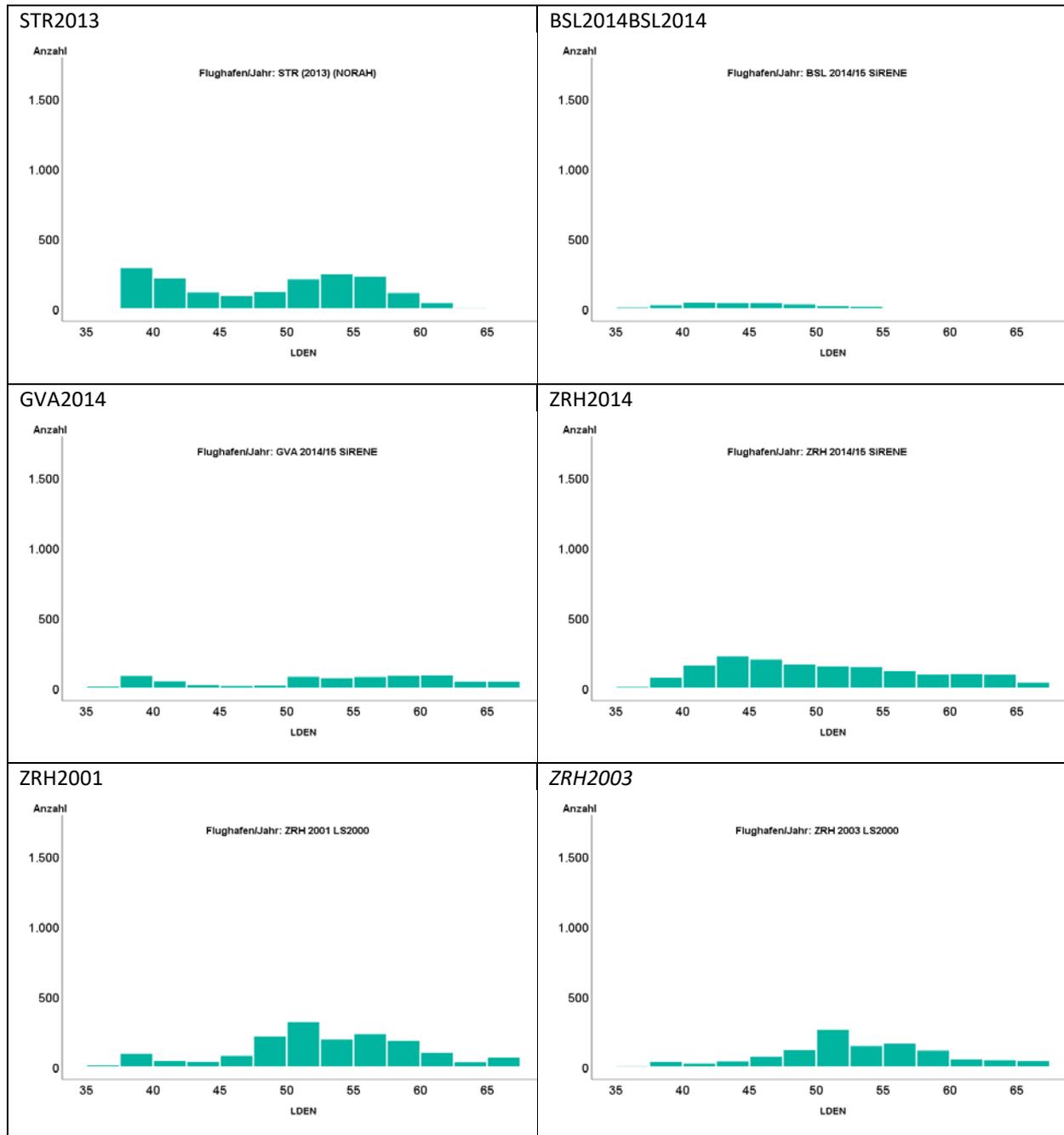


Abbildung 6-1 (fortgesetzt). Häufigkeitsverteilungen über Klassen des L_{den} pro Flughafen und Jahr in der NORAH-Studie (D; Fortsetzung von Abbildung 6-1) sowie in den LS2000- und SiRENE-Studien (CH).

6.3 Korrelationsanalysen pro Flughafen und Jahr

6.3.1 Korrelationen zwischen Dauerschallpegeln und weiteren akustischen Maßen

Pro Stichprobe zeigt Tabelle 6-2 für die untersuchten deutschen Flughäfen und Tabelle 6-3 für die Schweizer Flughäfen die Korrelationen der Dauerschallpegel für Tag (06-22 Uhr), Nacht (22 – 06 Uhr) und für den 24- Stunden-Tag mit den Maximalpegeln und *NAT*-Werten mit Schwellenwerten von 50 bis 80 dB in 5-dB-Schritten sowie mit den Dauerschallpegeln mit $k = 20$ und $k = 30$. Erwartungsgemäß korrelieren die akustischen Maße hoch miteinander, an den Schweizer Flughäfen deutlicher als an den deutschen Flughäfen.

Tabelle 6-2. Korrelationen der Dauerschallpegel für Tag (06-22h), Nacht (22-06 Uhr) und 24 Stunden mit logarithmisch gemittelten Maximalpegeln und NAT-Werten des 24h-Tages sowie der Nacht für die deutschen Flughäfen.

a) für 24h-Tag

	FRA2011			FRA2012			FRA2013			BER2012			CGN2013			STR2013			FRA2005		
	N = 9238			N = 7108			N = 2395			N = 4324			N = 2863			N = 1635			N = 1604		
	L_{den}	$L_{Aeq,24h}$	$L_{Aeq,22-06h}$	L_{den}	$L_{Aeq,24h}$	$L_{Aeq,22-06h}$	L_{den}	$L_{Aeq,24h}$	$L_{Aeq,22-06h}$												
L_{den}			.926			.952			.957			.988			.957			.934			.952
$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	.984		.856	.984		.903	.993		.927	.999		.984	.990		.916	.998		.925	.993		.919
$L_{Aeq,24h}(k = 20)$	.938	.925	.879	.918	.922	.857	.943	.950	.895	.966	.968	.940	.942	.941	.893	.964	.966	.855	.895	.906	.863
$L_{Aeq,24h}(k = 30)$	.857	.830	.838	.846	.845	.797	.885	.890	.847	.863	.865	.825	.860	.852	.828	.901	.902	.770	.745	.761	.726
$L_{AS,max,log,24h,50}$	.754	.810	.560	.614	.645	.534	.776	.783	.697	.977	.978	.974	.856	.880	.762	.939	.941	.921	.871	.878	.759
$L_{AS,max,log,24h,60}$	.655	.717	.442	.423	.449	.330	.521	.522	.478	.941	.942	.954	.777	.830	.628	.849	.858	.878	.835	.842	.748
$L_{AS,max,log,24h,70}$	.475	.529	.280	.097	.087	.081	.300	.284	.322	.796	.796	.826	.572	.653	.376	-.026	-.005	.050	.737	.720	.699
$L_{AS,max,log,24h,80}$	.349	.378	.209	.133	.120	.130	.186	.169	.183	.475	.484	.468	.512	.584	.327	.244	.255	.021	.350	.307	.392
$\log(NAT_{24h,50})$	.840	.816	.824	.862	.868	.798	.886	.895	.806	.716	.714	.637	.802	.782	.816	.900	.896	.755	.728	.732	.732
$\log(NAT_{24h,60})$	.916	.924	.827	.863	.887	.785	.903	.915	.798	.807	.804	.731	.861	.825	.903	.908	.903	.800	.934	.936	.856
$\log(NAT_{24h,70})$	.872	.902	.721	.723	.750	.631	.861	.870	.765	.924	.924	.891	.899	.891	.881	.968	.967	.912	.933	.934	.845
$\log(NAT_{24h,80})$	.792	.829	.607	.540	.549	.472	.722	.719	.659	.905	.911	.899	.861	.886	.792	.923	.929	.897	.881	.878	.783

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit $p < .05$, nicht signifikant.

b) für die Nacht

	FRA2011			FRA2012			FRA2013			BER2012			CGN2013			STR2013			FRA2005		
	N = 9238			N = 7108			N = 2395			N = 4324			N = 2863			N = 1979			N = 1604		
	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}	<i>L</i> _{den}	<i>L</i> _{Aeq,24h}	<i>L</i> _{Aeq,22-06h}
<i>L</i> _{Aeq,22-06h} (<i>k</i> = 10)	.926	.856		.952	.903		.957	.927		.988	.984		.957	.916		.934	.925		.952	.919	
<i>L</i> _{Aeq,22-06h} (<i>k</i> = 20)	.860	.787	.958	.874	.844	.916	.878	.859	.935	.963	.956	.941	.916	.881	.941	.926	.909	.856	.889	.871	.927
<i>L</i> _{Aeq,22-06h} (<i>k</i> = 30)	.791	.719	.898	.777	.758	.813	.781	.769	.842	.864	.855	.831	.839	.812	.851	.864	.844	.780	.757	.752	.781
<i>L</i> _{AS,max,log,22-06h,50}	.855	.804	.875	.746	.685	.786	.842	.805	.856	.976	.974	.977	.839	.791	.899	.915	.913	.922	.901	.888	.841
<i>L</i> _{AS,max,log,22-06h,60}	.789	.742	.811	.546	.486	.591	.679	.637	.735	.933	.934	.950	.855	.833	.869	.780	.787	.834	.857	.854	.785
<i>L</i> _{AS,max,log,22-06h,70}	.603	.550	.659	.202	.146	.236	.581	.536	.635	.776	.776	.800	.788	.819	.673	.376	.382	.442	.785	.763	.765
<i>L</i> _{AS,max,log,22-06h,80}	.655	.624	.610	.228	.179	.291	.459	.401	.501	.487	.491	.484	.752	.775	.650	.454	.439	.529	.390	.358	.424
log(<i>NAT</i> _{22-06h,50})	.847	.775	.890	.849	.800	.823	.895	.883	.845	.706	.693	.635	.779	.741	.802	.859	.839	.751	.554	.506	.731
log(<i>NAT</i> _{22-06h,60})	.895	.836	.904	.855	.802	.842	.905	.887	.851	.814	.806	.743	.744	.668	.839	.905	.891	.816	.834	.785	.928
log(<i>NAT</i> _{22-06h,70})	.901	.946	.903	.791	.725	.786	.877	.849	.853	.931	.929	.907	.797	.742	.869	.943	.934	.902	.901	.870	.907
log(<i>NAT</i> _{22-06h,80})	.812	.734	.849	.525	.452	.602	.725	.666	.770	.885	.887	.883	.866	.840	.885	.826	.826	.900	.882	.865	.895

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle *r* Werte signifikant mit mindestens $p < .05$, nicht signifikant.

c) Maximalpegel mit entsprechenden NAT-Werten der Schwellen 50, 60, 70 und 80

	FRA2011	FRA2012	FRA2013	BER2012	CGN2013	STR2013	FRA2005
	N = 9238	N = 7108	N = 2395	N = 4324	N = 2863	N = 1635	N = 1604
<i>24 Stunden</i>							
$L_{AS,max,log,50} / \log(NAT_{50})$	.351	.272	.514	.585	.427	.728	.322
$L_{AS,max,log,60} / \log(NAT_{60})$	.565	.435	.387	.649	.466	.646	.669
$L_{AS,max,log,70} / \log(NAT_{70})$	.528	.185	.348	.659	.445	-,089	.766
$L_{AS,max,log,80} / \log(NAT_{80})$	.552	.448	.41	.684	.612	.010	.593
<i>Nacht</i>							
$L_{AS,max,log,50} / \log(NAT_{50})$	.643	.515	.640	.577	.521	.652	.251
$L_{AS,max,log,60} / \log(NAT_{60})$	.679	.472	.537	.635	.608	.578	.567
$L_{AS,max,log,70} / \log(NAT_{70})$	.626	.408	.645	.673	.529	.442	.781
$L_{AS,max,log,80} / \log(NAT_{80})$	.801	.754	.783	.727	.768	.568	.666

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit $p < .05$, **nicht signifikant**

Tabelle 6-3. Korrelationen der Dauerschallpegel für Tag (06-22h), Nacht (22-06 Uhr) und 24 Stunden mit logarithmisch gemittelten Maximalpegeln und NAT-Werten für die Schweizer Flughäfen.

a) für 24h-Tag

	BSL2014			GVA2014			ZRH2014			ZRH2001			ZRH2003		
	N = 198			N = 666			N = 1560			N = 1570			N = 1094		
	L_{den}	$L_{Aeq,24h}$	$L_{Aeq,22-06h}$												
L_{den}			.993			.992			.867			.729			.804
$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	1.0		.991	.999		.988	.981		.769	.962		.533	.960		.619
$L_{Aeq,24h}(k = 20)$	.963	.964	.934	.971	.977	.942	.926	.949	.679	.902	.933	.573	.909	.937	.617
$L_{Aeq,24h}(k = 30)$	.930	.931	.895	.868	.880	.814	.873	.895	.623	.846	.837	.636	.838	.836	.613
$L_{AS,max,log,24h,50}$	.900	.900	.918	.978	.973	.985	.936	.938	.796	.865	.859	.464	.877	.902	.557
$L_{AS,max,log,24h,60}$	.717	.716	.751	.874	.868	.888	.873	.877	.764	.755	.730	.406	.780	.803	.490
$L_{AS,max,log,24h,70}$	.626	.624	.653	.736	.730	.753	.702	.735	.552	.706	.667	.418	.719	.724	.486
$L_{AS,max,log,24h,80}$	.813	.813	.840	.611	.613	.595	.683	.718	.522	.727	.714	.376	.731	.732	.462
$\log(NAT_{24h,50})$	.640	.637	.606	.866	.872	.833	.774	.811	.525	.738	.814	.428	.762	.814	.500
$\log(NAT_{24h,60})$	.927	.926	.921	.893	.896	.873	.805	.803	.632	.871	.909	.533	.852	.877	.583
$\log(NAT_{24h,70})$	.849	.848	.884	.944	.945	.929	.882	.870	.737	.894	.889	.571	.863	.867	.610
$\log(NAT_{24h,80})$	.740	.740	.780	.947	.946	.924	.801	.817	.664	.843	.821	.408	.819	.830	.492

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit $p < .05$.

	BSL2014			GVA2014			ZRH2014			ZRH2001			ZRH2003		
	N = 198			N = 666			N = 1560			N = 1570			N = 1094		
	L_{den}	$L_{Aeq,24h}$	$L_{Aeq,22-06h}$												
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	.993	.991		.992	.988		.867	.769		.729	.533		.804	.619	
$L_{Aeq,22-06h}(k = 20)$	.884	.883	.849	.982	.981	.973	.844	.750	.945	.676	.490	.953	.686	.501	.931
$L_{Aeq,22-06h}(k = 30)$	.695	.694	.646	.904	.912	.869	.817	.753	.855	.660	.495	.892	.660	.500	.861
$L_{AS,max,log,22-06h,50}$	.927	.925	.957	.901	.891	.931	.813	.729	.937	.661	.481	.841	.814	.659	.918
$L_{AS,max,log,22-06h,60}$	.819	.816	.847	.856	.846	.880	.769	.734	.776	.618	.529	.533	.717	.636	.684
$L_{AS,max,log,22-06h,70}$	.455	.461	.463	.779	.772	.794	.756	.743	.696	.687	.630	.426	.726	.701	.508
$L_{AS,max,log,22-06h,80}$	.787	.783	.837	.708	.711	.677	.659	.666	.489	.655	.593	.353	.689	.669	.443
$\log(NAT_{22-06h,50})$	.699	.696	.675	.918	.921	.898	.658	.583	.772	.726	.582	.899	.656	.518	.833
$\log(NAT_{22-06h,60})$	.859	.856	.880	.880	.881	.867	.714	.619	.865	.635	.478	.865	.652	.507	.798
$\log(NAT_{22-06h,70})$	.885	.882	.920	.933	.932	.921	.773	.694	.840	.605	.431	.796	.573	.411	.758
$\log(NAT_{22-06h,80})$	.805	.800	.850	.931	.926	.908	.709	.647	.729	.614	.438	.586	.720	.595	.699

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit $p < .05$.

c) Maximalpegel mit entsprechenden NAT-Werten der Schwellen 50, 60, 70 und 80

	BSL2014 N = 198	BSL2014 N = 198	GVA2014 N = 666	ZRH2014 N = 1560	ZRH2001 N = 1570	ZRH2003 N = 1094
<i>24 Stunden</i>						
$L_{AS,max,log,50} / \log(NAT_{50})$	.249		.766	.580	.418	.502
$L_{AS,max,log,60} / \log(NAT_{60})$	.492		.592	.520	.457	.489
$L_{AS,max,log,70} / \log(NAT_{70})$	.586		.566	.549	.554	.529
$L_{AS,max,log,80} / \log(NAT_{80})$	.846		.547	.684	.623	.631
<i>Nacht</i>						
$L_{AS,max,log,50} / \log(NAT_{50})$	.453		.698	.564	.582	.579
$L_{AS,max,log,60} / \log(NAT_{60})$	.563		.632	.515	.301	.290
$L_{AS,max,log,70} / \log(NAT_{70})$	.540		.601	.602	.412	.278
$L_{AS,max,log,80} / \log(NAT_{80})$	.935		.590	.637	.535	.503

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit $p > .05$.

6.3.2 Korrelationen zwischen Belästigung, Schlafstörung und akustischen Maßen pro Flughafen und Jahr

Die Korrelationen zwischen den Kriteriumsvariablen % *HA* und % *HSD* und den akustischen Kenngrößen zeigen Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5. Generell sind die Korrelationen zwischen der Fluglärmbelästigung (% *HA*) und den akustischen Maßen höher als für die Schlafstörungen (% *HSD*).

An den hier untersuchten deutschen Flughäfen korrelieren die am Dauerschallpegel (L_{Aeq} bzw. L_{den}) orientierten akustischen Maße durchweg stärker mit der Belästigung als die Maximalpegel und Häufigkeitsvariablen; an den Schweizer Flughäfen sind die Maximalpegel meist stärker als die Dauerschallpegel mit der Belästigung verknüpft; teils sind auch die Korrelationen mit *NAT*-Werten höher als mit Dauerschallpegeln. Hinsichtlich der Schlafstörungen ergibt sich ein ähnliches Bild.

Der L_{den} korreliert an allen Flughäfen ähnlich hoch wie der $L_{Aeq,24h}$ mit der Lärmbelästigung. Bezüglich der Schlafstörungen sieht es etwas anders aus: Hier korreliert der L_{den} in 4 von 7 deutschen Stichproben (FRA2005, FRA2011, FRA2013, STR2013) höher mit der Schlafstörung als der nächtliche Dauerschallpegel $L_{Aeq,22-06h}$. An den Schweizer Flughäfen ist dies nur in einer von 5 Stichproben der Fall (ZRH2001). Ein möglicher Grund hierfür ist, dass in den deutschen Stichproben die Schlafstörung durch einen Mittelwerts-Score über 3 Items zu Störungen beim Einschlafen, Durchschlafen und Ausschlafen operationalisiert wurde, während in den Schweizer Stichproben die Schlafstörung mittels eines einzelnen Items erfasst wurde (vgl. Tabelle 4-1, S. 54ff).

Tabelle 6-4. Korrelationen akustischer Maße der Luftverkehrsgeräuschbelastung mit der Fluglärmelastigung und der berichteten Schlafstörung durch Fluglärm (NORAH- und RDF-Studie, D)

a) für Fluglärmelastigung (HA)

	FRA2011	FRA2012	FRA2013	BER2012	CGN2013	STR2013	FRA2005	
	N = 9237	N = 7104	N = 2392	N = 4324	N = 2862	N = 1635	N = 1604	
	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-11 Annoy
24 Stunden								
L_{den}	.474	.424	.463	.397	.419	.517	.434	.445
$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	.474	.424	.471	.393	.408	.513	.441	.453
$L_{Aeq,24h}(k = 20)$	.447	.379	.433	.386	.372	.497	.411	.420
$L_{Aeq,24h}(k = 30)$	.405	.342	.399	.351	.328	.466	.344	.352
$L_{AS,max,log,24h,50}$	.371	.296	.396	.380	.377	.481	.380	.390
$L_{AS,max,log,24h,60}$	.318	.201	.277	.363	.328	.441	.345	.350
$L_{AS,max,log,24h,70}$	.233	.040	.114	.276	.204	-.039	.286	.280
$L_{AS,max,log,24h,80}$	.127	.065	.015	.098	.174	.047	.162	.140
$\log(NAT_{24h,50})$	.403	.369	.406	.296	.317	.463	.327	.338
$\log(NAT_{24h,60})$	.448	.395	.439	.318	.378	.455	.433	.453
$\log(NAT_{24h,70})$	.419	.338	.429	.358	.395	.504	.407	.421
$\log(NAT_{24h,80})$	.369	.231	.307	.302	.350	.453	.385	.379

Anmerkungen.Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit mindestens $p < .05$; **rot = nicht signifikant.**

ICBEN-5 bzw. ICBEN-11 Annoy = 5-stufig bzw. 11-stufig (0 - 10) erfasste Fluglärmelastigung.

b) für Schlafstörungen (HSD)

	FRA2011	FRA2012	FRA2013	BER2012	CGN2013	STR2013	FRA2005
	N = 9244	N = 631	N = 2389	N = 4314	N = 2859	N = 1632	N = 1602
	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep
<i>24 Stunden</i>							
L_{den}	.398	.187	.367	.356	.347	.374	.374
<i>Nacht</i>							
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	.400	.165	.338	.357	.355	.366	.350
$L_{Aeq,22-06h}(k = 20)$	.378	.119	.305	.346	.344	.356	.332
$L_{Aeq,22-06h}(k = 30)$	.352	.089	.268	.312	.318	.334	.283
$L_{AS,max,log,22-06h,50}$	.357	.171	.305	.348	.306	.346	.325
$L_{AS,max,log,22-06h,60}$	.314	.132	.229	.328	.293	.280	.297
$L_{AS,max,log,22-06h,70}$	.230	.067	.151	.240	.231	.121	.269
$L_{AS,max,log,22-06h,80}$	.191	-.007	.074	.106	.208	.118	.179
$\log(NAT_{22-06h,50})$	.378	.103	.324	.250	.302	.330	.215
$\log(NAT_{22-06h,60})$	.394	.158	.347	.288	.306	.346	.318
$\log(NAT_{22-06h,70})$	.383	.189	.330	.328	.303	.355	.327
$\log(NAT_{22-06h,80})$	.282	.118	.172	.246	.296	.222	.317

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit mindestens $p < .05$; rot = nicht signifikant.

ICBEN-5 Sleep = Mittelwerts-Score aus 3 Items zu fluglärmbedingten Schlafstörungen (wenn nicht anders angegeben).

Tabelle 6-5. Korrelationen akustischer Maße der Luftverkehrsgeräuschbelastung mit der Fluglärmbelastung und der berichteten Schlafstörung durch Fluglärm (LS2000- und SiRENE-Studie, CH)

a) für Fluglärmbelastung (HA)

	BSL2014		GVA2014		ZRH2014		ZRH2001	ZRH2003
	N = 196 / 193		N = 643 / 639		N = 1537 / 1531		N = 1538	N = 1086
	ICBEN-5 Annoy	ICBEN-11 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN - 11 Annoy	ICBEN-5 Annoy	ICBEN - 11 Annoy	ICBEN-11 Annoy	ICBEN-11 Annoy
<i>24 Stunden</i>								
L_{den}	.419	.386	.668	.673	.489	.504	.196	.135
$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	.417	.383	.666	.671	.459	.474	.214	.138
$L_{Aeq,24h}(k = 20)$	.344	.309	.636	.643	.374	.391	.177	.088
$L_{Aeq,24h}(k = 30)$	.310	.275	.547	.554	.329	.345	.136	.024
$L_{AS,max,log,24h,50}$	.454	.425	.652	.656	.502	.514	.224	.155
$L_{AS,max,log,24h,60}$	.452	.423	.590	.588	.478	.487	.209	.136
$L_{AS,max,log,24h,70}$	.468	.442	.470	.460	.333	.340	.177	.136
$L_{AS,max,log,24h,80}$	.501	.466	.254	.254	.320	.326	.165	.116
$\log(NAT_{24h,50})$	.158	.141	.570	.577	.274	.291	.125	.091
$\log(NAT_{24h,60})$	.353	.329	.590	.598	.364	.378	.152	.107
$\log(NAT_{24h,70})$	.461	.431	.640	.646	.439	.448	.176	.089
$\log(NAT_{24h,80})$	.450	.422	.473	.470	.426	.441	.256	.192

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit mindestens $p < .05$. rot = nicht signifikant.

ICBEN-5 bzw. ICBEN-11 Annoy = 5-stufig bzw. 11-stufig (0 - 10) erfasste Fluglärmbelastung

b) für Schlafstörungen (HSD)

	BSL2014	GVA2014	ZRH2014	ZRH2001	ZRH2003
	N = 175	N = 629	N = 1491	N = 1536	N = 1078
	ICBEN-5 Sleep (1 Item)	ICBEN-5 Sleep (1 Item)	ICBEN-5 Sleep (1 Item)	ICBEN-5 Sleep	ICBEN-5 Sleep
24 Stunden					
L_{den}	.380	.508	.399	.273	.207
Nacht					
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	.403	.517	.465	.223	.211
$L_{Aeq,22-06h}(k = 20)$	.226	.479	.400	.220	.192
$L_{Aeq,22-06h}(k = 30)$	.093	.390	.336	.218	.170
$L_{AS,max,log,22-06h,50}$	.447	.493	.471	.220	.212
$L_{AS,max,log,22-06h,60}$	.448	.467	.385	.186	.202
$L_{AS,max,log,22-06h,70}$	.306	.355	.329	.193	.192
$L_{AS,max,log,22-06h,80}$	.400	.153	.142	.131	.178
$\log(NAT_{22-06h,50})$	.157	.447	.333	.202	.197
$\log(NAT_{22-06h,60})$	.326	.439	.412	.197	.113
$\log(NAT_{22-06h,70})$	.424	.371	.394	.197	.199
$\log(NAT_{22-06h,80})$	.317	.330	.194	.211	.229

Anmerkungen.

Wenn nicht anders gekennzeichnet alle r Werte signifikant mit $p < .05$. **rot = nicht signifikant.**

ICBEN-5 Sleep = Mittelwerts-Score aus 3 Items zu fluglärmbedingten Schlafstörungen (wenn nicht anders angegeben).

6.4 Logistische Mehrebenenanalysen

Ein Hauptziel dieses Forschungsvorhabens liegt – wie im Kapitel 1 dargestellt – darin zu untersuchen, ob die Voraussage des Kriteriums % *HA* und die Voraussage des Kriteriums % *HSD* in den vorliegenden Datensätzen verbessert werden, wenn a) stärker an der Häufigkeit von Flugbewegungen orientierte akustische Prädiktoren berücksichtigt werden sowie b) Stichprobencharakteristika, also die jeweiligen spezifischen Flughafencharakteristika zu einer bestimmten Zeit.

Für diese Untersuchung wurden logistische Mehrebenen-Regressionsanalysen durchgeführt. *Logistische Regressionen* dienen der Voraussage der bedingten Wahrscheinlichkeit, ob ein binäres Kriterium (wie *HA* oder *HSD*) bei einem bestimmten Wert eines Prädiktors (oder einer bestimmten Kombination von Werten mehrerer Prädiktoren) den Wert 1 hat, also ob das binäre Kriterium vorliegt oder als erfüllt gelten kann. *Mehrebenenanalysen* berücksichtigen zusätzlich hierarchische Strukturen (Ebenen) in den Daten, wie sie in unseren Fällen durch die unterschiedlichen Stichproben von verschiedenen Flughäfen zu unterschiedlichen Erhebungszeiten gegeben sind. Mit logistischen Mehrebenenanalysen können sowohl unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten für *HA* und für *HSD* in verschiedenen Stichproben identifiziert werden, wie auch unterschiedliche Effekte der akustischen Prädiktoren in verschiedenen Stichproben.

Für die Berechnung der Mehrebenenanalysen wird das Paket *lme4* der Statistiksoftware R genutzt (Bates, Mächler, Bolker & Walker, 2015). Hiermit können sowohl klassische (lineare) als auch verallgemeinerte gemischte und Mehrebenen-Modelle mit kontinuierlichen und – wie im vorliegenden Fall – binären Kriterien untersucht werden. Die Spezifizierung der Modelle wird im Abschnitt 6.4.3 skizziert; der vollständige Code für alle Modelle sowie ein Beispielcode mit Erklärungen für eines der Modelle findet sich im Anhang D (Abschnitte 4.1 ff).

In dieser Studie werden für jedes der beiden Kriterien *HA* und *HSD* für jeweils 16 verschiedene Modelle Mehrebenenanalysen durchgeführt. Die jeweils 16 verschiedenen Modelle zur Vorhersage desselben Kriteriums unterscheiden sich durch unterschiedliche Prädiktoren (siehe unten). Ziel ist es, für jedes Kriterium dasjenige Modell mit der besten Vorhersagegüte zu identifizieren. Die verschiedenen Analyseschritte und Entscheidungskriterien hierfür werden im Abschnitt 6.4.4 dargestellt; zuvor folgen jedoch in den Abschnitten 6.4.1 bis 6.4.3 genauere Angaben zu den Kriterien, zu den Prädiktoren und zu den sich daraus ergebenden Modellen.

6.4.1 Kriterien

Gemäß den Untersuchungszielen wird sowohl ein Kriterium für *Belästigung* als auch ein Kriterium für *Schlafstörungen* untersucht. Als Belästigungskriterium wird – wie im Kapitel 4 beschrieben – ein dichotomisiertes Kriterium (*HA*, „*highly annoyed*“ mit den Ausprägungen ‚1‘ und ‚0‘) herangezogen, das auf Basis der Werte der 5-stufigen ICBEN-Skala gebildet wird (vgl. Tabelle 4-1) bzw. im Fall der Stichproben aus der LS2000-Studie mangels Verfügbarkeit der 5-stufigen ICBEN-Skala auf Basis der 11-stufigen Skala. Als *hoch belästigt* (*HA* = ‚1‘, sonst *HA* = ‚0‘) gelten dabei alle Befragungsteilnehmer und -teilnehmerinnen mit einem Rohwert von 4 oder 5 auf der 5-stufigen Skala. Bei Verwendung der 11-stufigen-Skala (Wertebereich 0-10) wurden Personen mit den Rohwerten 8, 9 oder 10 auf als *hoch belästigt* definiert. Das Kriterium für Schlafstörungen ist ebenfalls dichotomisiert (*HSD*, „*highly sleep disturbed*“, ebenfalls mit den Ausprägungen ‚1‘ und ‚0‘) und gilt als erfüllt bei einem über die schlaf-

störungs-bezogenen Items hinweg gemittelten Rohwert von 4 bis 5 (bei einem Wertebereich von 1 bis 5).

6.4.2 Prädiktoren

Prädiktoren der 1. Ebene: Akustische Prädiktoren. Als Prädiktoren für die 1. Ebene der Mehrebenenanalysen dienen verschiedene Pegel- und Ereignis-Maße (einzeln oder in Kombination), die wir zusammenfassend als ‚akustische Variablen‘ oder ‚akustische Prädiktoren‘ bezeichnen.

Tabelle 6-7 bietet einen Überblick über die pro Kriterium untersuchten 16 Prädiktoren bzw. Prädiktoren-Kombinationen für die insgesamt 32 Mehrebenenmodelle. Für die Analysen mit % HA als Kriterium wurden jeweils 24-Stunden-Werte herangezogen, für die Analysen mit % HSD die entsprechenden Nachtwerte. Die Analysen wurden zunächst mit L_{den} und den verschiedenen L_{Aeq} -Variablen als jeweils alleinigen Prädiktoren durchgeführt. Hierbei wurden neben $L_{Aeq}(k = 10)$ soweit verfügbar auch der $L_{Aeq}(k = 20)$ und $L_{Aeq}(k = 30)$ herangezogen (für die Daten der LS2000-, der Sirene- und der RDF-Studie). Für die Modellkombinationen, in denen jeweils zwei akustische Prädiktoren in einem Modell kombiniert wurden (jeweils L_{den} , L_{Aeq} oder $L_{AS,max}$ mit dem logarithmierten NAT-Wert $\log(NAT)$), wurden jeweils Modelle für die dB-Schwellen 50, 60, 70 und 80 dB spezifiziert und analysiert.

Prädiktoren der 2. Ebene: Stichprobencharakteristika. Um mögliche stichprobenspezifische Effekte der akustischen Prädiktoren zu untersuchen, wurde die Stichprobenvariable, die die 12 unterschiedlichen untersuchten Stichproben repräsentiert (vgl. Tabelle 2-1), als Klassierungsvariable für die Cluster der 2. Ebene der Mehrebenenmodelle in die Modelle aufgenommen. Zusätzlich sollte auch der Einfluss bestimmter Stichprobencharakteristika analysiert werden. Hierfür wurden folgende stichprobenbezogenen Prädiktoren der 2. Ebene in die Analysen aufgenommen:

- **Flugbewegungen** (Starts und Landungen; 24 h für % HA, 22:00 – 06:00 für % HSD)
- **Nachtfluganteil**
- **Trend** (5-Jahrestrend der Flugbewegungen; 24 h für % HA, 22:00 – 06:00 für % HSD)
- **Flottenmix** (lärmäquivalente Bewegungen – Starts)
- **Änderungsstatus des Flughafens** zum Zeitpunkt der Erhebung (*High-Rate-Change*-Flughafen, 1, vs. *Low-Rate-Change*-Flughafen, 0)

Diese Stichprobencharakteristika nehmen definitionsgemäß pro Stichprobe genau einen Wert an. Sie variieren also nur zwischen den Stichproben, nicht zwischen verschiedenen Probanden innerhalb einer Stichprobe, wobei wir „Stichprobe“ wie im Kapitel 2 eingeführt verstehen, nämlich als „eine bestimmte und eindeutige Kombination aus Untersuchungsflughafen und Erhebungszeitraum“. Die etwas geläufigere Bezeichnung ‚Flughafencharakteristika‘ ist im vorliegenden Fall nicht ausreichend präzise, weil sich die Werte jeweils auf die Bedingungen an einen bestimmten Flughafen in einem bestimmten Jahr beziehen, sich die Werte also an einem Flughafen im Laufe der Zeit durchaus ändern können. Tabelle 6-6 zeigt einen Überblick über die Ausprägungen der Stichproben auf den untersuchten Stichprobencharakteristika. Inhaltliche Hintergründe und die konkreten Berechnungsweisen wurden bereits im Kapitel 3 dargestellt.

Tabelle 6-6 - Ausprägungen der Stichproben auf den Stichprobencharakteristika (bzw. auf den Level-2-Prädiktoren der Mehrebenenmodelle)

Stichprobe	Studie	N ¹	Flugbewegungen pro Jahr	Nachtfluganteil	Trend (5J.) Flugbewegungen 24h	Flottenmix	Änderungsstatus ²
ZRH2001	LS2000	1.570	299.896	0,04	1,21	1,30	1
ZRH2003		1.094	249.022	0,03	0,90	1,05	1
BSL2014		198	71.919	0,12	1,16	0,92	0
GVA2014	SiRENE	666	168.804	0,06	1,09	0,84	0
ZRH2014		1.560	246650	0,05	0,98	0,99	0
FRA2005	RDF	1.604	494.483	0,11	1,08	2,71	1
BER2012		4.324	67.467	0,11	1,10	0,93	1
CGN2013		2.863	120.388	0,29	0,91	1,31	0
STR2013	NORAH	1.635	124.581	0,07	0,88	1,04	0
FRA2011		9.238	481.630	0,09	0,99	2,43	1
FRA2012		7.108	472.232	0,08	0,99	2,22	1
FRA2013		2.395	299.896	0,07	1,02	2,11	1
Mittelwert ³			255.129	0,09	1,03	1,49	

Anmerkungen.

⁽¹⁾ Diskrepanzen zu den N-Werten in den bisher dargestellten Analysen ergeben sich aufgrund einer unterschiedlichen Anzahl an fehlenden Werten.

⁽²⁾ Änderungsstatus: ‚1‘: High-Rate-Change-Flughafen, ‚0‘: Low-Rate-Change-Flughafen.

⁽³⁾ Die hier angegebenen Mittelwerte beziehen sich auf die 12 Stichproben (nicht gewichtet nach dem jeweiligen N).

6.4.3 Modelle

Aufgrund der Kombinationen der oben beschriebenen Kriterien und Prädiktoren ergeben sich die in Tabelle 6-7 dargestellten Modelle für die Mehrebenenanalysen. Die Level-2-Prädiktoren sind bei allen Modellen grundsätzlich identisch – mit Ausnahme der Werte auf den beiden Variablen ‚Flugbewegungen‘ und ‚Trend‘ (Ganztageswerte bei dem Kriterium HA vs. Nachtwerte bei dem Kriterium HSD). Die 16 unterschiedlichen Modelle für das Kriterium HA und für das Kriterium HSD ergeben sich somit aus dem oder den unterschiedlichen Level-1-Prädiktoren, die in der Tabelle jeweils in einer Zelle zusammen dargestellt sind.

Tabelle 6-7. Überblick über die Prädiktoren und Prädiktor-Kombinationen der Modelle für die Mehrebenenanalysen

Modellgruppe	Level-1-Prädiktoren (akustische Prädiktoren)		Level-2-Prädiktoren (Stichprobencharakteristika)
	Kriterium <i>HA</i> (,hoch belästigt‘)	Kriterium <i>HSD</i> (,hoch schlafgestört‘)	
L_{den}	L_{den}	L_{den}	(Stichprobe) Flugbewegungen (Anzahl pro Jahr, ganztags/nachts) Nachtfluganteil Trend (5-Jahres- Trend Flugbewegungen, ganztags/nachts) Flottenmix Änderungssituation (HRC vs. LRC)
L_{Aeq}	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	
	$L_{Aeq,24h}(k = 20)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 20)$	
	$L_{Aeq,24h}(k = 30)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 30)$	
L_{den} & $\log(NAT)$	$L_{den}, \log(NAT_{24h,50})$	$L_{den}, \log(NAT_{22-06h,50})$	
	$L_{den}, \log(NAT_{24h,60})$	$L_{den}, \log(NAT_{22-06h,60})$	
	$L_{den}, \log(NAT_{24h,70})$	$L_{den}, \log(NAT_{22-06h,70})$	
	$L_{den}, \log(NAT_{24h,80})$	$L_{den}, \log(NAT_{22-06h,80})$	
L_{Aeq} & $\log(NAT)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10) \log(NAT_{24h,50})$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) \log(NAT_{22-06h,50})$	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) \log(NAT_{24h,60})$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) \log(NAT_{22-06h,60})$	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) \log(NAT_{24h,70})$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) \log(NAT_{22-06h,70})$	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) \log(NAT_{24h,80})$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) \log(NAT_{22-06h,80})$	
$L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$	$L_{AS,max,\log,24h,50}, \log(NAT_{24h,50})$	$L_{AS,max,\log,22-06h,50}, \log(NAT_{22-06h,50})$	
	$L_{AS,max,\log,24h,60}, \log(NAT_{24h,60})$	$L_{AS,max,\log,22-06h,60}, \log(NAT_{22-06h,60})$	
	$L_{AS,max,\log,24h,70}, \log(NAT_{24h,70})$	$L_{AS,max,\log,22-06h,70}, \log(NAT_{22-06h,70})$	
	$L_{AS,max,\log,24h,80}, \log(NAT_{24h,80})$	$L_{AS,max,\log,22-06h,80}, \log(NAT_{22-06h,80})$	

6.4.4 Vorgehensweise bei den Mehrebenenanalysen

Das Ziel dieser Untersuchung besteht darin herauszufinden, welcher Prädiktor oder welche Kombination von Prädiktoren das Kriterium *HA* einerseits sowie das Kriterium *HSD* andererseits bei den vorliegenden Daten optimal voraussagt. Hierfür werden für alle oben dargestellten 2 x 16 Modelle insgesamt 32 Mehrebenenanalysen durchgeführt, wobei jede Mehrebenenanalyse die Berechnung mehrerer Zwischenmodelle (eingeschränkte und erweiterte Zwischenmodelle) und eines vollen Modells enthält. Die Ergebnisparameter dieser Analysen für die 32 Modelle werden schließlich hinsichtlich ihrer Vorhersagegüte verglichen. Dies geschieht zum einen deskriptiv durch Vergleiche der Kriterien der Anpassungsgüte der verschiedenen Modelle und von Maßen für deren Varianzaufklärung. Für den Vergleich von Modellen mit unterschiedlich großer Anzahl an Freiheitsgraden (d. h. beim Vergleich von Modellen mit unterschiedlicher Anzahl der Prädiktoren) werden zudem inferenzstatistische Vergleichstests der Anpassungsgüte durchgeführt.

Für die Analysen werden nacheinander folgende Schritte durchgeführt:

1. **Für die Kriterien:** Ermittlung der Intraklassenkoeffizienten (*intraclass coefficient, ICC*)
2. **Für die Prädiktoren:** z-Standardisierung und Zentrierung
3. **Für die Modelle:** Mehrschrittige Mehrebenenanalysen

- a. Eingeschränktes Zwischenmodell
- b. Erweiterte Zwischenmodelle
- c. Modellvergleich zwischen eingeschränktem und erweiterten Zwischenmodellen
- d. Vollständiges Modell
- e. Identifizierung und Interpretation des ‚besten‘ vollständigen Modells

4. Für das Modell mit der besten Anpassungsgüte: Ermittlung der Odds ratios für die Effekte

6.4.4.1 Mehrebenenanalysen für das Kriterium HA

Schritt 1: ICC für das Kriterium HA

Der Intraklassenkoeffizient (*intraclass coefficient, ICC*) gibt die Varianz des Kriteriums zwischen verschiedenen Clustern – in unserem Fall zwischen den verschiedenen Stichproben – im Verhältnis zur Gesamtvarianz des Kriteriums wieder und ist somit ein Indikator dafür, ob das Kriterium von der Stichprobenzugehörigkeit abhängt. Der theoretische Wertebereich reicht von 0 (bei null Varianz zwischen den Clustern – die beobachteten Werte auf dem Kriterium sind vollständig unabhängig von der jeweiligen Cluster-Zugehörigkeit) bis 1 (bei Gleichheit von Zwischen-Cluster- und Gesamtvarianz – die beobachteten Werte auf dem Kriterium hängen ausschließlich von der jeweiligen Cluster-Zugehörigkeit ab), wobei höhere Werte als zusätzliche starke Indizien für die Notwendigkeit von Mehrebenenanalysen statt herkömmlicher Ein-Level-Regressionen gelten.

Zur Berechnung des ICC wird zunächst ein Modell ohne Prädiktoren spezifiziert und berechnet, in das nur die Klassierungsvariable für die Cluster der 2. Ebene eingeht. Mit der so ermittelten Abweichung der cluster-spezifischen Wahrscheinlichkeit, dass das Kriterium den Wert 1 aufweist, von der Gesamtwahrscheinlichkeit für den Wert 1 wird der ICC wie im Anhang D (Abschnitt 4.2.1) dargestellt ermittelt. Für das Kriterium HA ergibt sich (vgl. Anhang D, Abschnitt 4.3.1):

$$ICC = 0.1129.$$

11,29 % der Varianz von HA vs. ‚Nicht-HA‘ ergeben sich auf Basis des vorliegenden Datensatzes also aufgrund von stichprobenbezogenen Unterschieden, bzw. es werden bei ausschließlicher Berücksichtigung der hier untersuchten Prädiktoren 11,29 % der Wahrscheinlichkeit, hoch belästigt zu sein, durch Stichprobencharakteristika erklärt. Folglich werden 88,71 % der Varianz durch Level-1-Prädiktoren – in unserem Fall also durch akustische Faktoren – erklärt.

Verschiedentlich wird als Daumenregel angeführt, dass ab 10 % Varianzaufklärung durch 2.-Level-Prädiktoren Mehrebenenanalysen herkömmlichen Ein-Level-Regressionsanalysen vorzuziehen seien (z. B. Koo & Li, 2017; Muthén & Satorra, 1995). Darüber hinaus gibt es in den letzten Jahren zunehmend Empfehlungen, bei hierarchisch aufgebauten Daten *grundsätzlich* Mehrebenenanalysen durchzuführen, auch bei sehr geringem ICC – um beispielsweise signifikante Effekte eines Level-1-Prädiktors zu entdecken, die nur in einzelnen Stichproben signifikant werden oder in verschiedenen

Stichproben gegenläufig sind und sich bei herkömmlicher Ein-Level-Regression in der Summe gegenseitig verdecken würden (McElreath, 2015; 2017). Im vorliegenden Fall sprechen beide Empfehlungen für die Durchführung von Mehrebenenanalysen.

Schritt 2: z-Standardisierung und Zentrierung der Prädiktoren für HA

Da die verschiedenen untersuchten Prädiktoren stark unterschiedliche Wertebereiche aufweisen und das die Berechnung rein technisch erschweren kann, wurden alle Prädiktoren zunächst z-standardisiert.

Zentrierung der Prädiktoren am Mittelwert erleichtert die spätere Interpretation einiger interessierender Ergebnisparameter. In unserer Studie werden die akustischen Prädiktoren an ihren jeweiligen Cluster-Mittelwerten zentriert, da mögliche cluster-spezifische Effekte der akustischen Prädiktoren im Zentrum der Betrachtung stehen. Die stichprobenspezifischen Prädiktoren der 2. Ebene werden hingegen am allgemeinen Gesamtmittelwert zentriert.

Schritt 3: Mehrebenenanalysen für HA

Jede der 16 Mehrebenenanalysen für HA wird in einem mehrstufigen Verfahren durchgeführt, um zunächst die Signifikanz einzelner Parameter des jeweiligen Modells zu testen. Zu diesem Zweck werden für jede Mehrebenenanalyse zunächst ein „eingeschränktes“ sowie pro Level-1-Prädiktor ein „erweitertes Zwischenmodell“ gebildet, denen sukzessive wie im Folgenden beschriebenen Parameter hinzugefügt und auf Signifikanz getestet werden. Der R-Code für diese Zwischenmodelle ist im Anhang D im Abschnitt 4.2.2 (für das eingeschränkte Zwischenmodell) sowie Abschnitt 4.2.3 (für die erweiterten Zwischenmodelle) aufgeführt.

Schritt 3a: Eingeschränktes Zwischenmodell („constrained intermediate model“, CIM). Das eingeschränkte Zwischenmodell enthält die Terme für alle Level-1- und alle Level-2-Prädiktoren sowie aller (theoretisch relevanten) Intra-Level-Interaktionen (Interaktionen von Level-1-Prädiktoren mit Level-1-Prädiktoren sowie von Level-2-Prädiktoren mit Level-2-Prädiktoren), jedoch keine für Zwischen-Level-Interaktionen – mit diesem Modell wird zunächst die unerklärte Varianz der Level-1-Effekte geschätzt, also das Ausmaß, in dem die Effekte der Level-1-Prädiktoren zwischen Clustern variieren.

In dieser Untersuchung wurde auf den Einschluss von Intra-Level-Interaktionen der Level-2-Prädiktoren verzichtet, da hier neben den häufigkeits-bezogenen akustischen Prädiktoren insbesondere die Effekte der Stichprobencharakteristika sowie stichprobenspezifische Effekte der akustischen Prädiktoren im Vordergrund stehen und die berücksichtigten Stichprobencharakteristika zudem miteinander konfundiert sind.

Schritt 3b: Erweiterte Zwischenmodelle („augmented intermediate models“, AIM1 und AIM2). In die für jeden Level-1-Prädiktor separat spezifizierten erweiterten Zwischenmodelle wird zusätzlich zu den Parametern des eingeschränkten Zwischenmodells jeweils der Residualterm des Level-1-Prädiktors hinzugefügt. Die Varianz dieses Residualterms entspricht der Varianz des jeweiligen Level-1-Prädiktors zwischen den Clustern der 2. Ebene bzw. zwischen den Stichproben. Sie quantifiziert somit das Ausmaß, in dem der Effekt des akustischen Level-1-Prädiktors bei unterschiedlichen Stichproben unterschiedlich stark wirkt.

Schritt 3c: Modellvergleich zwischen eingeschränktem und erweiterten Zwischenmodellen. Mit einem Likelihood Ratio-Test kann die Anpassungsgüte eines eingeschränkten Zwischenmodells statistisch gegen die eines (komplexeren) erweiterten Zwischenmodells getestet werden. Der Unterschied zwischen den beiden Modellen besteht in der Zunahme der Zwischen-Cluster-Varianz der Level-1-Prädiktoren in das erweiterte Modell. Wenn sich die Anpassungsgüte der gegeneinander getesteten Modelle statistisch nicht signifikant unterscheidet, zeigt das, dass dieser Term nicht zu einer Verbesserung der Anpassungsgüte beiträgt. Umgekehrt bedeutet eine signifikante Verbesserung der Anpassungsgüte eines erweiterten Zwischenmodells (AIM) im Vergleich zu dem eingeschränkten Zwischenmodell (CIM), dass die Cluster- bzw. Stichproben-bezogene Varianz des jeweiligen akustischen Level-1-Prädiktors bedeutsam ist. In dem Fall verbleibt der entsprechende Term im anschließend spezifizierten vollständigen Modell (siehe unten).

Tabelle 6-8 gibt die Ergebnisse der Modellvergleichstests für alle Modelle mit dem Kriterium *HA* wieder. Bei Modellen mit 2 akustischen Prädiktoren wurden deren Residualterme jeweils einzeln in separaten Modellen dem eingeschränkten Zwischenmodell hinzugefügt (Modelle AIM1 und AIM2) und unabhängig voneinander gegen das eingeschränkte Zwischenmodell (Modell CIM) getestet.

Es zeigt sich, dass bei *jedem* Vergleich das erweiterte Zwischenmodell mit verbesserter Anpassungsgüte einhergeht – bei jedem Modell erweisen sich AIM1 und AIM2 als signifikant besser gegenüber dem jeweiligen weniger komplexen CIM. Das heißt, bei jedem Modell ist die Anpassungsgüte besser, wenn der Effekt der akustischen Level-1-Prädiktoren zwischen den Stichproben variieren kann. Daher wurden alle Terme für die Zwischen-Cluster-Varianz der Level-1-Prädiktoren bei der Spezifikation des jeweiligen vollständigen Modells beibehalten (siehe unten).

Tabelle 6-8. Ergebnisse der Modellvergleichstests der eingeschränkten Modelle (CIM) mit den jeweiligen beiden erweiterten Zwischenmodellen (AIM1 und AIM2) für HA

	Anz. Par.	AIC	BIC	Log Likelihood	Abweichung	Chi-Quadrat	Df	Pr(>Chisq)
Modell ALdN50 (akustische Prädiktoren L_{den} und $\log(NAT_{24h,50})$)								
CIM_ALdN50	10	29408	29490	-14694	29388			
AIM1_ALdN50	11	29333	29423	-14656	29311	77.155	1	<2.2e-16 ***
CIM_ALdN50	10	29408	29490	-14694	29388			
AIM2_ALdN50	11	29351	29441	-14665	29329	58.831	1	1.718e-14 ***
Modell ALdN60 (akustische Prädiktoren L_{den} und $\log(NAT_{24h,60})$)								
CIM_ALdN60	10	29382	29463	-14681	29362			
AIM1_ALdN60	11	29342	29431	-14660	29320	41.74	1	1.043e-10 ***
CIM_ALdN60	10	29382	29463	-14681	29362			
AIM2_ALdN60	11	29345	29434	-14662	29323	38.595	1	5.216e-10 ***
Modell ALdN70 (akustische Prädiktoren L_{den} und $\log(NAT_{24h,70})$)								
CIM_ALdN70	10	29402	29483	-14691	29382			
AIM1_ALdN70	11	29347	29437	-14663	29325	56.749	1	4.95e-14 ***
CIM_ALdN70	10	29402	29483	-14691	29382			
AIM2_ALdN70	11	29361	29451	-14670	29339	42.562	1	6.848e-11 ***

	Anz. Par.	AIC	BIC	Log Likelihood	Abweichung	Chi-Quadrat	Df	Pr(>Chisq)
Modell ALdN80 (akustische Prädiktoren L_{den} und $\log(NAT_{24h,80})$)								
CIM_ALdN80	10	29445	29526	-14712	29425			
AIM1_ALdN80	11	29387	29477	-14683	29365	59.728	1	1.089e-14 ***
CIM_ALdN80	10	29445	29526	-14712	29425			
AIM2_ALdN80	11	29418	29508	-14698	29396	28.592	1	8.936e-08 ***
Modell ALqN50 (akustische Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,50})$)								
CIM_ALqN50	10	29485	29566	-14733	29465			
AIM1_ALqN50	11	29390	29479	-14684	29368	97.321	1	<2.2e-16 ***
CIM_ALqN50	10	29485	29566	-14733	29465			
AIM2_ALqN50	11	29412	29502	-14695	29390	75.015	1	<2.2e-16 ***
Modell ALqN60 (akustische Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,60})$)								
CIM_ALqN60	10	29427	29508	-14703	29407			
AIM1_ALqN60	11	29376	29465	-14677	29354	52.527	1	4.244e-13 ***
CIM_ALqN60	10	29427	29508	-14703	29407			
AIM2_ALqN60	11	29385	29474	-14681	29363	44.098	1	3.123e-11 ***
Modell ALqN70 (akustische Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$)								
CIM_ALqN70	10	29447	29528	-14713	29427			
AIM1_ALqN70	11	29371	29461	-14675	29349	77.203	1	<2.2e-16 ***
CIM_ALqN70	10	29447	29528	-14713	29427			
AIM2_ALqN70	11	29396	29486	-14687	29374	52.281	1	4.811e-13 ***
Modell ALqN80 (akustische Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,80})$)								
CIM_ALqN80	10	29474	29555	-14727	29454			
AIM1_ALqN80	11	29398	29487	-14688	29376	77.818	1	<2.2e-16 ***
CIM_ALqN80	10	29474	29555	-14727	29454			
AIM2_ALqN80	11	29438	29527	-14708	29416	37.894	1	7.471e-10 ***
Modell AMN50 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,50}$ und $\log(NAT_{24h,50})$)								
CIM_AMN50	10	29473	29554	-14726	29453			
AIM1_AMN50	11	29436	29526	-14707	29414	38.479	1	5.535e-10 ***
CIM_AMN50	10	29473	29554	-14726	29453			
AIM2_AMN50	11	29413	29502	-14695	29391	62.025	1	3.391e-15 ***
Modell AMN60 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,60}$ und $\log(NAT_{24h,60})$)								
CIM_AMN60	10	29460	29541	-14720	29440			
AIM1_AMN60	11	29436	29525	-14707	29414	25.726	1	3.934e-07 ***
CIM_AMN60	10	29460	29541	-14720	29440			
AIM2_AMN60	11	29420	29510	-14699	29398	41.329	1	1.286e-10 ***

	Anz. Par.	AIC	BIC	Log Likelihood	Abweichung	Chi-Quadrat	Df	Pr(>Chisq)
Modell AMN70 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,70}$ und $\log(NAT_{24h,70})$)								
CIM_AMN70	10	29825	29907	-14903	29805			
AIM1_AMN70	11	29802	29891	-14890	29780	25.569	1	4.268e-07 ***
CIM_AMN70	10	29825	29907	-14903	29805			
AIM2_AMN70	11	29783	29872	-14880	29761	44.711	1	2.284e-11 ***
Modell AMN80 (akustische Prädiktoren $L_{AS,max,log,24h,80}$ und $\log(NAT_{24h,80})$)								
CIM_AMN80	10	30779	30860	-15379	30759			
AIM1_AMN80	11	30713	30802	-15345	30691	67.849	1	<2.2e-16 ***
CIM_AMN80	10	30779	30860	-15379	30759			
AIM2_AMN80	11	30669	30758	-15323	30647	111.83	1	<2.2e-16 ***
Modell ALd (akustischer Prädiktor L_{den})								
CIM_ALd	8	29488	29553	-14736	29472			
AIM1_ALd	9	29418	29491	-14700	29400	71.771	1	<2.2e-16 ***
Modell ALq10 (akustischer Prädiktor $L_{Aeq,24h}(k = 10)$)								
CIM_ALq10	8	29508	29573	-14746	29492			
AIM1_ALq10	9	29417	29490	-14700	29399	93.279	1	<2.2e-16 ***
Modell ALq20 (akustischer Prädiktor $L_{Aeq,24h}(k = 20)$)								
CIM_ALq20	8	30021	30086	-15003	30005			
AIM1_ALq20	9	29974	30048	-14978	29956	48.943	1	2.635e-12 ***
Modell ALq30 (akustischer Prädiktor $L_{Aeq,24h}(k = 30)$)								
CIM_ALq30	8	30605	30670	-15295	30589			
AIM1_ALq30	9	30546	30619	-15264	30528	61.418	1	4.615e-15 ***

Anmerkungen.

AIC = Akaike information criterion

BIC = Bayesian information criterion

CIM: eingeschränktes Zwischenmodell („constrained intermediate model“; Erklärung siehe Text)

AIM1: erweitertes Zwischenmodell („augmented intermediate model“) für den 1. (oder einzigen) akustischen Prädiktor des jeweiligen Modells

AIM2: erweitertes Zwischenmodell für den 2. akustischen Prädiktor des jeweiligen Modells

Modellkürzel (ALdN50 etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

*** $p < 0.001$

Schritt 3d: Vollständiges Modell. Das vollständige Modell enthält zusätzlich zu allen Level-1- und Level-2-Prädiktoren, zu den Intra-Level-Interaktionen und den signifikanten Residualtermen der Level-1-Prädiktoren auch die Inter-Level-Interaktionen (Interaktionen von Level-1-Prädiktoren mit Level-2-Prädiktoren). Wie oben erwähnt, wurde jedoch aus inhaltlichen und aus statistischen Gründen auf die Spezifikation von Intra-Level-Interaktionstermen für die Level-2-Prädiktoren verzichtet.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen für alle 16 unterschiedlichen Modelle zu HA sind in den Tabellen Tabelle 6-9 bis Tabelle 6-12 wiedergegeben. Die Ergebnisdarstellung erfolgt dabei pro Tabelle für jede der in Tabelle 6-7 skizzierten „Modellgruppen“

- 1) L_{den} & $\log(NAT)$ (Tabelle 6-9),
- 2) L_{Aeq} & $\log(NAT)$ (Tabelle 6-10),
- 3) $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$ (Tabelle 6-11) sowie
- 4a) L_{den} und 4b) L_{Aeq} (Tabelle 6-12)

mit jeweils 4 Modellen pro Modellgruppe. Die Tabellen zeigen die Parameterwerte und zugehörige Signifikanzniveaus für alle Haupt- und Interaktionseffekte, im nächsten Tabellenabschnitt die Zwischen-Cluster-Varianz der Level-1-Prädiktoren (da sich diese in allen Fällen als signifikant die Modellgüte verbessernd herausgestellt haben, siehe Ergebnisse der Modellvergleichstests oben) und im letzten Abschnitt verschiedene Modellmerkmale wie insbesondere die Werte der Gütekriterien AIC und BIC.

Tabelle 6-9. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der
Modellgruppe L_{den} & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}			
	ALdN50 ^{1b}	ALdN60 ^{1b}	ALdN70 ^{1b}	ALdN80 ^{1b}
	1. Level-1-Prädiktor L_{den}	1. Level-1-Prädiktor L_{den}	1. Level-1-Prädiktor L_{den}	1. Level-1-Prädiktor L_{den}
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{24h,50})$	$\log(NAT_{24h,60})$	$\log(NAT_{24h,70})$	$\log(NAT_{24h,80})$
(Intercept)	-0.25 (0.18)	-0.27 (0.17)	-0.31 (0.18)	-0.29 (0.17)
L_{den}	1.05*** (0.04)	0.85*** (0.05)	0.73*** (0.05)	1.00*** (0.05)
Feste Effekte – Haupteffekte $\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)^{1c}$	-0.21*** (0.06)	0.09 (0.07)	0.30*** (0.07)	-0.02 (0.04)
Flugbewegungen ²	-0.10 (0.58)	-0.10 (0.57)	-0.20 (0.60)	-0.12 (0.58)
Nachtfluganteil	0.01 (0.21)	-0.00 (0.21)	-0.02 (0.22)	-0.01 (0.21)
Trend (5 J.) ³	-0.19 (0.11)	-0.18 (0.10)	-0.20 (0.11)	-0.18 (0.11)
Flottenmix	0.71 (0.48)	0.71 (0.47)	0.78 (0.49)	0.71 (0.48)
Änderungsstatus ⁴	-0.74 (0.52)	-0.77 (0.51)	-0.71 (0.53)	-0.77 (0.51)
Feste Effekte – Interaktionseffekte $L_{den} * \log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	-0.19*** (0.02)	-0.13*** (0.02)	-0.09*** (0.02)	-0.10*** (0.02)
$L_{den} * \text{Flugbewegungen}$	0.38** (0.14)	0.28 (0.18)	-0.15 (0.23)	-0.09 (0.21)
$L_{den} * \text{Nachtfluganteil}$	0.01 (0.05)	-0.02 (0.06)	-0.11 (0.08)	-0.12 (0.07)
$L_{den} * \text{Trend (5 J.)}$	0.01 (0.03)	0.03 (0.04)	-0.08 (0.05)	-0.04 (0.04)
$L_{den} * \text{Flottenmix}$	-0.01 (0.12)	0.02 (0.15)	0.46* (0.19)	0.52** (0.17)
$L_{den} * \text{Änderungsstatus}$	-0.70*** (0.14)	-0.75*** (0.15)	-0.32 (0.20)	-0.79*** (0.19)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flugbewegungen}$	-0.21 (0.23)	-0.22 (0.27)	0.48 (0.25)	0.34 (0.18)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Nachtfluganteil}$	0.02 (0.07)	-0.03 (0.09)	0.13 (0.09)	0.07 (0.07)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Trend (5 J.)}$	0.03 (0.04)	0.00 (0.05)	0.14* (0.05)	0.09* (0.04)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flottenmix}$	0.20 (0.18)	0.26 (0.22)	-0.40 (0.21)	-0.38* (0.15)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Änderungsstatus}$	0.33 (0.19)	0.24 (0.22)	-0.35 (0.24)	0.12 (0.15)

Tabelle 6-9. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der
Modellgruppe L_{den} & $\log(NAT)$

Parameter		Modell ^{1a}			
		ALdN50 ^{1b}	ALdN60 ^{1b}	ALdN70 ^{1b}	ALdN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor		L_{den}	L_{den}	L_{den}	L_{den}
2. Level-1-Prädiktor		$\log(NAT_{24h,50})$	$\log(NAT_{24h,60})$	$\log(NAT_{24h,70})$	$\log(NAT_{24h,80})$
Zufallseffekte	Var: Stichprobe (Intercept)	0.10	0.00	0.10	0.01
	Var: Stichprobe.1 L_{den}	0.00	0.00	0.00	0.00
	Var: Stichprobe.2 (Intercept)	0.10	0.18	0.10	0.18
	Var: Stichprobe.3 $\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	0.00	0.00	0.00	0.00
Modellmerkmale	AIC	29317.66	29326.83	29319.60	29369.23
	BIC	29504.57	29513.74	29506.50	29556.14
	Log Likelihood	-14635.83	-14640.42	-14636.80	-14661.62
	N	24993	24993	24993	24993
	Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

^(1a,b,c) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe L_{den} und $\log(NAT)$ unterscheiden sich durch die unterschiedlichen 2. Level-1-Prädiktoren [$\log(NAT_{24h,50})$, $\log(NAT_{24h,60})$, $\log(NAT_{24h,70})$ und $\log(NAT_{24h,80})$; in der linken Spalte der Tabelle verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (ALdN50 etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

⁽²⁾ Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (ganztags).

⁽³⁾ 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (ganztags).

⁽⁴⁾ Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.

In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

Tabelle 6-10. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der
Modellgruppe LAeq & log(NAT)

Parameter	Modell ^{1a}			
	ALqN50 ^{1b}	ALqN60 ^{1b}	ALqN70 ^{1b}	ALqN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{24h,50})$	$\log(NAT_{24h,60})$	$\log(NAT_{24h,70})$	$\log(NAT_{24h,80})$
(Intercept)	-0.28 (0.17)	-0.31 (0.17)	-0.34 (0.18)	-0.31 (0.17)
$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	1.02*** (0.06)	0.80*** (0.05)	0.71*** (0.06)	0.98*** (0.06)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)^{1c}$	-0.16** (0.05)	0.18* (0.07)	0.30*** (0.07)	-0.03 (0.04)
Flugbewegungen ²	-0.08 (0.57)	-0.10 (0.58)	-0.21 (0.60)	-0.12 (0.57)
Nachtfluganteil	0.00 (0.21)	-0.00 (0.21)	-0.02 (0.22)	-0.01 (0.21)
Trend (5 J.) ³	-0.19 (0.10)	-0.18 (0.10)	-0.20 (0.11)	-0.19 (0.10)
Flottenmix	0.68 (0.47)	0.69 (0.48)	0.79 (0.50)	0.71 (0.47)
Änderungsstatus ⁴	-0.77 (0.51)	-0.77 (0.51)	-0.68 (0.53)	-0.78 (0.51)
$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	-0.11*** (0.02)	-0.08*** (0.02)	-0.07** (0.02)	-0.08*** (0.02)
$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Flugbewegungen}$	0.36 (0.20)	0.34 (0.18)	-0.12 (0.23)	-0.23 (0.22)
$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Nachtfluganteil}$	-0.02 (0.07)	0.01 (0.06)	-0.09 (0.08)	-0.11 (0.08)
$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Trend (5 J.)}$	0.04 (0.04)	0.09* (0.04)	-0.05 (0.05)	-0.03 (0.04)
$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Flottenmix}$	0.01 (0.16)	-0.03 (0.15)	0.53** (0.19)	0.66*** (0.18)
$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Änderungsstatus}$	-0.68*** (0.18)	-0.60*** (0.16)	-0.18 (0.20)	-0.65** (0.20)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flugbewegungen}$	-0.33 (0.21)	-0.34 (0.27)	0.50 (0.27)	0.43* (0.18)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Nachtfluganteil}$	-0.00 (0.06)	-0.06 (0.09)	0.16 (0.10)	0.08 (0.08)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Trend (5 J.)}$	-0.01 (0.04)	-0.07 (0.05)	0.09 (0.06)	0.07 (0.04)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flottenmix}$	0.34* (0.16)	0.36 (0.23)	-0.55* (0.23)	-0.51*** (0.16)
$\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Änderungsstatus}$	0.25 (0.19)	0.01 (0.24)	-0.45 (0.27)	0.05 (0.15)

Tabelle 6-10. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der
Modellgruppe LAeq & log(NAT)

Parameter	Modell ^{1a}			
	ALqN50 ^{1b}	ALqN60 ^{1b}	ALqN70 ^{1b}	ALqN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{24h,50})$	$\log(NAT_{24h,60})$	$\log(NAT_{24h,70})$	$\log(NAT_{24h,80})$
Zufallseffekte				
Var: Stichprobe (Intercept)	0.05	0.05	0.03	0.09
Var: Stichprobe.1 $L_{Aeq,24h}(k = 10)$	0.01	0.00	0.00	0.01
Var: Stichprobe.2 (Intercept)	0.14	0.14	0.18	0.10
Var: Stichprobe.3 $\log(NAT_{24h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	0.00	0.01	0.01	0.00
Modellmerkmale				
AIC	29376.28	29372.34	29307.06	29365.80
BIC	29563.19	29559.24	29493.96	29552.71
Log Likelihood	-14665.14	-14663.17	-14630.53	-14659.90
N	24993	24993	24993	24993
Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

^(1a,b,c) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe L_{Aeq} und $\log(NAT)$ unterscheiden sich durch den unterschiedlichen 2. Level-1-Prädiktor $\log(NAT_{24h,50})$, $\log(NAT_{24h,60})$, $\log(NAT_{24h,70})$ oder $\log(NAT_{24h,80})$; in der linken Spalte der Tabelle verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (ALqN50 etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

⁽²⁾ Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (ganztags).

⁽³⁾ 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (ganztags).

⁽⁴⁾ Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.

In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

Tabelle 6-11. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der Modellgruppe $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}			
	AMN50 ^{1b}	AMN60 ^{1b}	AMN70 ^{1b}	AMN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor	$L_{AS,max,\log,24h,50}$	$L_{AS,max,\log,24h,60}$	$L_{AS,max,\log,24h,70}$	$L_{AS,max,\log,24h,80}$
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{24h,50})$	$\log(NAT_{24h,60})$	$\log(NAT_{24h,70})$	$\log(NAT_{24h,80})$
(Intercept)	-0.34* (0.18)	-0.39* (0.18)	-0.42* (0.19)	-0.41* (0.20)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^{1c}$	0.70*** (0.04)	0.31*** (0.02)	-0.09** (0.03)	-0.31*** (0.06)
$\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))^{1d}$	0.50*** (0.04)	0.82*** (0.05)	1.02*** (0.06)	0.97*** (0.09)
Flugbewegungen ²	-0.14 (0.58)	-0.14 (0.60)	-0.27 (0.62)	-0.32 (0.67)
Nachtfluganteil	-0.02 (0.21)	-0.00 (0.22)	-0.03 (0.23)	-0.07 (0.24)
Trend (5 J.) ³	-0.18 (0.11)	-0.18 (0.11)	-0.21 (0.11)	-0.22 (0.12)
Flottenmix	0.72 (0.48)	0.72 (0.49)	0.84 (0.52)	0.96 (0.55)
Änderungsstatus ⁴	-0.78 (0.52)	-0.74 (0.53)	-0.64 (0.55)	-0.77 (0.59)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^*$ $\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))$	-0.03 (0.02)	0.06* (0.02)	0.09*** (0.03)	0.16*** (0.03)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^*$ Flugbewegungen	0.12 (0.14)	0.14 (0.09)	-0.04 (0.10)	-0.06 (0.23)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^*$ Nachtfluganteil	-0.03 (0.05)	0.04 (0.03)	0.02 (0.03)	-0.01 (0.07)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^*$ Trend (5 J.)	0.02 (0.03)	0.04* (0.02)	-0.01 (0.02)	-0.07 (0.04)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^*$ Flottenmix	0.10 (0.12)	-0.08 (0.07)	-0.06 (0.09)	0.00 (0.19)
$L_{AS,max,\log,24h,50/\dots60/\dots70/\dots80}^*$ Änderungsstatus	-0.43*** (0.13)	-0.23** (0.07)	0.03 (0.06)	0.02 (0.16)
$\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))^*$ Flugbewegungen	-0.08 (0.20)	-0.25 (0.20)	0.22 (0.20)	-0.49 (0.30)
$\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))^*$ Nachtfluganteil	-0.01 (0.05)	-0.09 (0.06)	0.06 (0.07)	-0.09 (0.11)
$\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))^*$ Trend (5 J.)	0.01 (0.03)	0.00 (0.04)	0.07 (0.04)	0.02 (0.06)
$\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))^*$ Flottenmix	0.32* (0.16)	0.51** (0.16)	0.15 (0.17)	0.60* (0.25)
$\log(NAT_{24h,50}/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80))^*$ Änderungsstatus	-0.19 (0.16)	-0.41* (0.18)	-0.55** (0.20)	-0.38 (0.26)

Tabelle 6-11. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der Modellgruppe $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}				
	AMN50 ^{1b}	AMN60 ^{1b}	AMN70 ^{1b}	AMN80 ^{1b}	
1. Level-1-Prädiktor	$L_{AS,max,\log,24h,50}$	$L_{AS,max,\log,24h,60}$	$L_{AS,max,\log,24h,70}$	$L_{AS,max,\log,24h,80}$	
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{24h,50})$	$\log(NAT_{24h,60})$	$\log(NAT_{24h,70})$	$\log(NAT_{24h,80})$	
Zufallseffekte	Var: Stichprobe (Intercept)	0.14	0.06	0.22	0.01
	Var:	0.01	0.00	0.00	0.01
	Stichprobe.1 $L_{AS,max,\log,24h,50/60/70/80}$				
	Var: Stichprobe.2 (Intercept)	0.06	0.15	0.00	0.25
Zufallseffekte	Var: Stichprobe.3	0.00	0.01	0.01	0.04
	$\log(NAT_{24h,50})/(...60)/(...70)/(...80)$				
Modellmerkmale	AIC	29388.53	29399.60	29771.29	30651.61
	BIC	29575.44	29586.51	29958.20	30838.51
	Log Likelihood	-14671.27	-14676.80	-14862.65	-15302.80
	N	24993	24993	24993	24993
	Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

^(1a,b,c,d) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe $L_{AS,max}$ und $\log(NAT)$ unterscheiden sich durch die unterschiedlichen akustischen Prädiktoren [die 1. Level-1-Prädiktoren $L_{AS,max,\log,24h,50}$, $L_{AS,max,\log,24h,60}$, $L_{AS,max,\log,24h,70}$ oder $L_{AS,max,\log,24h,80}$ und die 2. Level-1-Prädiktoren $\log(NAT_{24h,50})$, $\log(NAT_{24h,60})$, $\log(NAT_{24h,70})$ oder $\log(NAT_{24h,80})$; in der linken Spalte der Tabelle jeweils verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (AMN50 etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

⁽²⁾ Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (ganztags).

⁽³⁾ 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (ganztags).

⁽⁴⁾ Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.

In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

Tabelle 6-12. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HA für Modelle der Modellgruppe

Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq}

Parameter	Modell ^{1a}			
	ALd ^{1b}	ALq10 ^{1b}	ALq20 ^{1b}	ALq30 ^{1b}
Level-1-Prädiktor	L_{den}	$L_{Aeq,24h}(k=10)$	$L_{Aeq,24h}(k=20)$	$L_{Aeq,24h}(k=30)$
(Intercept)	-0.35* (0.18)	-0.34* (0.17)	-0.33 (0.17)	-0.31 (0.17)
$L_{den}/L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$	0.98*** (0.03)	0.97*** (0.04)	1.00*** (0.04)	1.11*** (0.06)
Feste Effekte - Haupteffekte				
Flugbewegungen ²	-0.16 (0.58)	-0.14 (0.58)	-0.07 (0.56)	-0.04 (0.55)
Nachtfluganteil	-0.02 (0.21)	-0.02 (0.21)	-0.01 (0.21)	-0.01 (0.20)
Trend (5 J.) ³	-0.18 (0.11)	-0.18 (0.11)	-0.18 (0.10)	-0.17 (0.10)
Flottenmix	0.75 (0.48)	0.73 (0.48)	0.68 (0.47)	0.66 (0.46)
Änderungsstatus ⁴	-0.75 (0.52)	-0.77 (0.52)	-0.81 (0.50)	-0.85 (0.49)
Feste Effekte - Interaktionseffekte				
$L_{den}/L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Flugbewegungen	0.13 (0.12)	0.12 (0.15)	-0.04 (0.15)	-0.17 (0.21)
$L_{den}/L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Nachtfluganteil	-0.06 (0.04)	-0.06 (0.05)	-0.14*** (0.04)	-0.19*** (0.05)
$L_{den}/L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Trend (5 J.)	0.02 (0.02)	0.03 (0.03)	0.12*** (0.03)	0.27*** (0.05)
$L_{den}/L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Flottenmix	0.25* (0.10)	0.26* (0.12)	0.38** (0.12)	0.60*** (0.16)
$L_{den}/L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Änderungsstatus	-0.68*** (0.12)	-0.65*** (0.14)	-0.96*** (0.16)	-1.38*** (0.26)
Zuf. Eff.				
Var: Stichprobe (Intercept)	0.20	0.19	0.19	0.17
Var: Stichprobe.1 $L_{den}/$ $L_{Aeq,24h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$	0.00	0.01	0.00	0.00
Modellmerkmale				
AIC	29404.47	29408.91	29955.89	30523.17
BIC	29518.23	29522.68	30069.66	30636.93
Log Likelihood	-14688.23	-14690.45	-14963.94	-15247.58
N	24993	24993	24993	24993
Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

(1a,b,c) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq} unterscheiden sich durch den unterschiedlichen akustischen Level-1-Prädiktor [L_{den} , $L_{Aeq,24h}(k=10)$, $L_{Aeq,24h}(k=20)$ oder $L_{Aeq,24h}(k=30)$; in der linken Spalte der Tabelle teilweise verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (ALd etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

(2) Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (ganztags).

(3) 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (ganztags).

(4) Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.
In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.
AIC: *Akaike information criterion*.
BIC: *Bayesian information criterion*.

Schritt 3e: Identifizierung und Interpretation des ‚besten‘ vollständigen Modells

Üblicherweise werden die Parameterwerte des vollständigen Modells zur Beurteilung der Anpassungsgüte und der Signifikanz und Interpretation der Haupt- und Interaktionseffekte genutzt, sowie zur Ermittlung der Odds ratios und Konfidenzintervalle für die Effekte. Da in der vorliegenden Studie jedoch sowohl für das Kriterium *HA* als auch für *HSD* 16 verschiedene Mehrebenenanalysen durchgeführt werden, wird zunächst jeweils das Modell mit der besten Vorhersagegüte ermittelt – an dieser Stelle für *HA* und unten analog für *HSD*.

Als entscheidende Kriterien für den Vergleich von Modellen mit gleich vielen Parametern – also für den Vergleich der 2-Prädiktor-Modelle untereinander (Modellgruppen „ L_{den} & $\log(NAT)$ “, „ L_{Aeq} & $\log(NAT)$ “ und „ $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$ “, siehe Tabelle 6-9 bis Tabelle 6-11) und für den Vergleich der 1-Prädiktor-Modelle untereinander (Modellgruppe L_{den} und Modellgruppe L_{Aeq} , Tabelle 6-12) wird auf folgende Kennwerte zurückgegriffen:

- Akaike information criterion (*AIC*)
- Bayesian information criterion (*BIC*)

Zusätzlich wird das R^2 als Maß für die Varianzaufklärung betrachtet (s. Anhang D). Das jeweils beste 2-Prädiktor- und 1-Prädiktor-Modell werden dann statistisch mit einem Chi-Quadrat-Vergleichstest gegeneinander getestet.

Beim *AIC* und beim *BIC* handelt es sich um relative, stichprobenabhängige Kriterien der Anpassungsgüte, die den deskriptiven Vergleich verschiedener Modelle mit gleich vielen Parametern hinsichtlich ihrer Anpassungsgüte ermöglichen. *AIC* und *BIC* sind keine absoluten Maße der Modellgüte, sondern dienen nur dem *relativen* Vergleich zwischen verschiedenen Modellen. Bei diesen Vergleichen handelt es sich nicht um statistische Tests, sondern um ein beschreibendes Maß. Niedrigere *AIC*- und *BIC*-Werte repräsentieren eine bessere Anpassungsgüte.

Ein Vergleich der 2-Prädiktor-Modelle – also der 12 Modelle der Modellgruppen „ L_{den} & $\log(NAT)$ “, „ L_{Aeq} & $\log(NAT)$ “ und „ $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$ “ – zeigt, dass sowohl hinsichtlich *AIC* und *BIC* als auch hinsichtlich der Varianzaufklärung R^2 jeweils das Modell mit den beiden Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$ mit den besten Werten verbunden ist. Unter den 1-Prädiktor-Modellen – also dem Modell mit L_{den} und den 3 Modellen aus der Modellgruppe L_{Aeq} – erweist sich, wiederum hinsichtlich aller 3 Kriterien, das Modell mit dem Prädiktor L_{den} als das mit der besten Modellgüte.

Die Ergebnisse des Chi-Quadrat-Vergleichstests zwischen diesen beiden Modellen sind in Tabelle 6-13 wiedergegeben und zeigen, dass das beste 2-Prädiktor-Modell signifikant bessere Anpassungsgüte hat als das beste 1-Prädiktor-Modell.

Tabelle 6-13. Ergebnisse des Chi-Quadrat-Differenzentests für die Modelle mit der besten Anpassungsgüte für das Kriterium HA

Modell	Anz. Param.	AIC	BIC	logLik	Deviance	Chi-Qu.	DF	Pr(>Chisq)
L_{den}	14	29405	29518	-14688	29377			
$L_{Aeq,24h}(k = 10)$ & $\log(NAT_{24h,70})$	23	29307	29494	-14630	29261	115.41	9	< 2.2e-16 ***

Anmerkungen.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

*** $p < 0.001$

Schritt 4: Odds ratios für die Effekte für das Modell mit der besten Anpassungsgüte für HA

Für die Interpretation des Modells mit der besten Anpassungsgüte bezogen auf das Kriterium HA – das Modell mit den beiden akustischen Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$ – sind die Odds ratios aller Effekte und das zugehörige 95 %-Konfidenzintervall in Tabelle 6-14 angegeben.

Für die Ermittlung der Odds ratios wurde die logistische Funktion zwischen den Prädiktoren und dem binären Kriterium HA mittels Logit-Transformation linearisiert, wodurch statt der bedingten Wahrscheinlichkeit die Log-odds (Logit bzw. logarithmierte Odds) vorausgesagt werden. Die Odds ratios ergeben sich dann durch Exponenzierung der Regressionsparameter und geben die Veränderung der vorhergesagten Wahrscheinlichkeit des Wertes 1 auf dem Kriterium bei einem Anstieg um eine Einheit auf dem Prädiktor an. Odds ratios, die sich nicht signifikant von dem Wert 1 unterscheiden (deren 95 %-Konfidenzintervall den Wert 1 einschließt) repräsentieren nicht-signifikante Effekte, Odds ratios, die sich signifikant von dem Wert 1 unterscheiden (deren 95 %-Konfidenzintervall den Wert 1 nicht einschließt), zeigen signifikante Effekte an. Bei signifikanten Haupteffekten können die Odds ratios multiplikativ interpretiert werden (eine Odds ratio von x entspricht einer x-fach höheren Wahrscheinlichkeit von HA bei einem Anstieg des Prädiktorwertes um eine Einheit). Odds ratios < 1 ergeben sich aus negativen Regressionsparametern und kennzeichnen somit negative Effekte; die Interpretation ist aber analog möglich. Lediglich die Interpretation von signifikanten Interaktionseffekten ist nicht trivial, da der Regressionskoeffizient des Produktterms bei logistischer Regression mathematisch nicht mit dem Interaktionseffekt identisch ist. Unseres Wissens existiert hierfür keine Standardlösung. In Anlehnung an Kolasinski und Siegel (2010) und Sommet und Morselli (2017) führen wir eine Zerlegung der relevanten, signifikanten Interaktionseffekte mit Hilfe von dummycodierten Modellen durch. Um den Effekt der einen Variable A einer signifikanten Interaktion auf die Kategorien der anderen Variable B zu quantifizieren, werden 2 neue Modelle berechnet. Jedes Modell ist dem ursprünglichen vollständigen Modell identisch mit Ausnahme des Haupteffekts und der Interaktionseffekte mit Variable B. Variable B wird in einem ersten Modell ersetzt durch eine neue Variable, die die Werte von Variable B plus jeweils 1 Standardabweichung vom Mittel als neue Werte enthält. In der Modellspezifikation wird sowohl der Haupteffekt von Variable B als auch alle Interaktionen, in denen Variable B beteiligt ist, entsprechend durch die neue „Variable B plus 1 Standardab-

weichung“ ersetzt. In diesem Modell entspricht dann der Steigungskoeffizient von Variable A der einfachen Steigung von Variable A unter der Bedingung $B = 0$, was aufgrund der Spezifizierung in diesem Modell jedoch „B minus 1 Standardabweichung“ in dem ursprünglich und eigentlich interessierenden Modell entspricht. Das zugehörige Odds ratio gibt dann Auskunft über die Zu- oder Abnahme der Wahrscheinlichkeit für HA bei einem Anstieg um eine Einheit von Variable A für Probanden mit niedrigen (minus 1 Standardabweichung) Werten auf Variable B.

Tabelle 6-14. Odds ratios für die Effekte des Modells mit den Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$ für HA

	Parameter	Odds ratio	CI 2.5 %	CI 97.5 %	
Haupteffekte	(Intercept)	0.7120134	0.4972631	1.0195069	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10)$	2.0342458	1.8237698	2.2690123	*
	$\log(NAT_{24h,70})$	1.3548104	1.1792205	1.5565463	*
	Flugbewegungen ¹	0.8067756	0.2452987	2.6534465	
	Nachtfluganteil	0.9813205	0.6367407	1.5123737	
	Trend (5 J.) ³	0.8184236	0.6591744	1.0161456	
	Flottenmix	2.1981919	0.8203022	5.8905696	
	Änderungsstatus ⁴	0.5093337	0.1775300	1.4612786	
Interaktionseffekte	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \log(NAT_{24h,70})$	0.9365788	0.8996691	0.9750027	*
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Flugbewegungen}$	0.8887795	0.5605593	1.4091802	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Nachtfluganteil}$	0.9109416	0.7816672	1.0615959	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Trend (5 J.)}$	0.9553339	0.8640143	1.0563052	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Flottenmix (siehe unten)}$	1.7058550	1.1636236	2.5007583	*
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Änderungsstatus}$	0.8316312	0.5586638	1.2379726	
	$\log(NAT_{24h,70}) * \text{Flugbewegungen}$	1.6558687	0.9759875	2.8093610	
	$\log(NAT_{24h,70}) * \text{Nachtfluganteil}$	1.1688722	0.9689375	1.4100623	
	$\log(NAT_{24h,70}) * \text{Trend (5 J.)}$	1.0977309	0.9719681	1.2397661	
	$\log(NAT_{24h,70}) * \text{Flottenmix (siehe unten)}$	0.5795793	0.3669114	0.9155131	*
$\log(NAT_{24h,70}) * \text{Änderungsstatus}$	0.6387298	0.3753325	1.0869716		
Zerlegter Effekt von Flottenmix...					
	...bei hohem* $L_{Aeq,24h}(k = 10)$	1.2743109	1.0951734	1.4827501	*
	...bei niedrigem* $L_{Aeq,24h}(k = 10)$	1.4403281	1.2579329	1.6491698	*
Zerlegter Effekt von Flottenmix...					
	...bei hohem* $\log(NAT_{24h,70})$	1.3548234	1.1792365	1.5565549	*
	...bei niedrigem* $\log(NAT_{24h,70})$	1.3549420	1.1794152	1.5565917	*
Zerlegter Effekt der akustischen Prädiktoren...					
	...bei hohem* Flottenmix	0.7851840	0.4697759	1.3123574	
	...bei niedrigem Flottenmix	2.3375353	1.5076366	3.6242627	*

Anmerkungen.

(1) Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (ganztags).

(2) 5-Jahrestrend Flugbewegungen pro Jahr (ganztags).

(3) Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

CI 2.5 % / CI 97.5 %: Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls.

* $p < 0.05$.

Analog wird in einem 2. Modell die ursprüngliche Variable B ersetzt durch eine Variable „B minus 1 Standardabweichung“, um ebenso Auskunft über die Zu- oder Abnahme der Wahrscheinlichkeit für HA bei einem Anstieg um eine Einheit von Variable A für Probanden mit hohem (plus 1 Standardabweichung) Werten auf Variable B zu erhalten.

Interpretation der Effekte. Es zeigt sich, dass bei dem Modell mit der besten Anpassungsgüte bezogen auf das Kriterium HA, dem Modell mit den beiden akustischen Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$, beide akustischen Prädiktoren signifikante positive Effekte auf HA ausüben: Odds ratio $L_{Aeq,24h}(k = 10) = 2.03$ (95 % Konfidenzintervall [1.82, 2.27]), Odds ratio $\log(NAT_{24h,70}) = 1.35$ (95 % Konfidenzintervall [1.18, 1.56]). Ein Anstieg um eine Einheit auf der Variablen $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ geht mit einer 2,03-fach erhöhten Wahrscheinlichkeit für HA einher; ein Anstieg um eine Einheit auf der Variablen $\log(NAT_{24h,70})$ mit einer 1,35-fach erhöhten Wahrscheinlichkeit – der Effekt von $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ ist also ca. 1,5-fach stärker.

Neben der Interaktion der beiden akustischen Prädiktoren miteinander sind auch die Interaktionen der Variable ‚Flottenmix‘ mit jedem der beiden akustischen Prädiktoren signifikant. Das bedeutet zunächst, dass der Effekt eines oder beider akustischer Prädiktoren sich signifikant in Abhängigkeit von der ‚Flottenmix‘-Ausprägung unterscheidet. Die Zerlegung der Interaktionseffekte für die Variable ‚Flottenmix‘ ist im unteren Teil von Tabelle 6-14 zu sehen. Sowohl bei niedrigem (minus eine Standardabweichung) als auch bei hohem $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ (plus eine Standardabweichung) steigt die Wahrscheinlichkeit für HA; bei niedrigem $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ ist sie durch einen Anstieg auf der Variablen ‚Flottenmix‘ 1,44-fach erhöht, bei hohem $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ ist sie demgegenüber nur 1,27-fach erhöht. Für $\log(NAT_{24h,70})$ steigt sie sowohl bei niedrigem als auch bei hohem $\log(NAT_{24h,70})$ jeweils gerundet um das 1,35-fache durch eine Zunahme um eine Einheit auf der Variablen ‚Flottenmix‘. Eine andere Zerlegung nach hohen und niedrigen Flottenmix-Werten illustriert den Interaktionseffekt deutlicher: Bei einem hohen Flottenmix-Wert steigt die Wahrscheinlichkeit für HA durch die akustischen Prädiktoren auf das 0,79-fache – oder anders ausgedrückt: sie sinkt um das 1,27-fache, während sie bei einem niedrigen Flottenmix-Wert um das 2,34-fache steigt. Die Variable ‚Flottenmix‘ übt also im Bereich niedriger Pegelwerte einen deutlich stärkeren zusätzlichen Effekt auf HA aus als im Bereich hoher Pegelwerte und dies gilt insbesondere für $L_{Aeq,24h}(k = 10)$.

6.4.4.2 Mehrebenenanalysen für das Kriterium HSD

Schritt 1: ICC für das Kriterium HSD

In Analogie zum Vorgehen bei der Berechnung des ICC für das Kriterium HA wurde auch für das Kriterium HSD zunächst ein Modell ohne Prädiktoren spezifiziert, um die Varianz des Level-2-Residuums – also die Varianz der cluster-spezifischen Log-odds – und daraus wie im Anhang D (Abschnitte 4.2.1 und 4.35.1) angegeben den ICC zu ermitteln. Für das Kriterium HSD resultiert

$$ICC = 0.0752.$$

Im Vergleich zum Kriterium *HA* wird somit beim Kriterium *HSD* mit 7,52 % ein etwas geringerer Anteil der Kriteriumsvarianz durch Stichprobencharakteristika erklärt.

Gemäß der „10 %-Daumenregel“ (siehe oben) könnte man für das Kriterium *HSD* herkömmliche Ein-Level-Regressionen in Betracht ziehen, wovon wir jedoch aufgrund der klar definierten und teilweise deutlichen Unterschiede zwischen den untersuchten Stichproben bzw. Clustern und im Einklang mit den Empfehlungen von McElreath (2015, 2017; siehe oben) absehen.

Schritt 2: z-Standardisierung und Zentrierung der Prädiktoren für HSD

Auch für die Berechnungen der Modelle mit dem Kriterium *HSD* wurden alle Prädiktoren z-standardisiert und zentriert. Die Zentrierungen erfolgten für die akustischen Prädiktoren an ihren Cluster-Mittelwerten und für die stichprobenspezifischen Prädiktoren der 2. Ebene am allgemeinen Gesamtmittelwert.

Schritt 3: Mehrebenenanalysen für HSD

Für jede der 16 Mehrebenenanalysen für *HSD* werden nach der gleichen Vorgehensweise wie bei den Mehrebenenanalysen für das Kriterium *HA* nacheinander die im Folgenden grob skizzierten Schritte durchgeführt, um die notwendigen Terme für die Spezifikation der jeweiligen vollständigen Modelle zu ermitteln (vgl. Abschnitt 6.4.4.1, Schritt 3; für den R-Code siehe Anhang D):

Schritt 3a: Eingeschränktes Zwischenmodell („constrained intermediate model“, *CIM*). Das eingeschränkte Zwischenmodell enthält noch keine Terme für Zwischen-Level-Interaktionen, sondern zunächst nur diejenigen für die Effekte der Prädiktoren (Level 1 wie Level 2) und für die Intra-Level-Interaktionen. Auf die Spezifikation von Intra-Level-Interaktionen der Level-2-Prädiktoren wurde abermals aufgrund inhaltlicher und methodischer Erwägungen verzichtet.

Schritt 3b: Erweiterte Zwischenmodelle („augmented intermediate models“, *AIM1* und *AIM2*). Für jeden akustischen bzw. Level-1-Prädiktor wird ein einzelnes erweitertes Zwischenmodell spezifiziert. Es entspricht dem eingeschränkten Zwischenmodell, dem der Residualterm des jeweiligen akustischen Prädiktors hinzugefügt wurde.

Schritt 3c: Modellvergleich zwischen eingeschränktem und erweiterten Zwischenmodellen. Die Ergebnisse der Likelihood Ratio-Tests für alle 16 Modelle mit dem Kriterium *HSD* zum Vergleich der Anpassungsgüte jedes eingeschränkten Zwischenmodells (*CIM*) gegen die jeweiligen erweiterten Zwischenmodelle (*AIM1* und *AIM2*) zeigen, dass bei allen Modellvergleichstests die erweiterten Zwischenmodelle *AIM1* und *AIM2* stets mit verbesserter Anpassungsgüte gegenüber dem *CIM* einhergehen.

Die Berücksichtigung der Cluster- bzw. Stichproben-bezogenen Varianz der Level-1-Prädiktoren – anders ausgedrückt: die Möglichkeit zur Variation zwischen Clustern für die Level-1-Prädiktoren – trägt bei allen untersuchten Modellen mit dem Kriterium *HSD* zur signifikanten Verbesserung der

Anpassungsgüte bei. Bei der Spezifikation der vollständigen Modelle werde diese entsprechend einbezogen.

Schritt 3d: Vollständiges Modell. Durch Hinzufügen der Terme für die Inter-Level-Interaktionen zu denjenigen für die Effekte der Prädiktoren, der Intra-Level-Interaktionen (im vorliegenden Fall aus o. g. ohne Intra-Level-Interaktionsterme für die Level-2-Prädiktoren) und den signifikanten Residualtermen der Level-1-Prädiktoren entstehen die vollständigen Modelle.

Die Tabellen Tabelle 6-16 bis Tabelle 6-18 geben die Ergebnisse der Berechnungen für alle Modelle zu *HSD* wieder, getrennt nach Modellgruppe:

- 1) L_{den} & $\log(NAT)$ (Tabelle 6-15),
- 2) L_{Aeq} & $\log(NAT)$ (Tabelle 6-16),
- 3) $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$ (Tabelle 6-17) sowie
- 4a) L_{den} und 4b) L_{Aeq} (Tabelle 6-18)

Tabelle 6-15. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe L_{den} & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}			
	SLdN50 ^{1b}	SLdN60 ^{1b}	SLdN70 ^{1b}	SLdN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor	L_{den}	L_{den}	L_{den}	L_{den}
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{22-06h,50})$	$\log(NAT_{22-06h,60})$	$\log(NAT_{22-06h,70})$	$\log(NAT_{22-06h,80})$
(Intercept)	-1.76*** (0.04)	-1.76*** (0.04)	-1.76*** (0.04)	-1.77*** (0.05)
L_{den}	0.50*** (0.04)	0.35*** (0.05)	0.29*** (0.07)	0.66*** (0.05)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)^{1c}$	0.14 (0.10)	0.33*** (0.09)	0.32*** (0.09)	-0.10 (0.05)
Flugbewegungen ²	3.05*** (0.27)	3.00*** (0.25)	2.96*** (0.24)	3.06*** (0.29)
Nachtfluganteil	-0.90*** (0.10)	-0.89*** (0.09)	-0.88*** (0.08)	-0.90*** (0.10)
Trend (5 J.) ³	-0.32*** (0.04)	-0.32*** (0.04)	-0.33*** (0.04)	-0.32*** (0.04)
Flottenmix	-3.21*** (0.28)	-3.16*** (0.26)	-3.11*** (0.25)	-3.23*** (0.29)
Änderungsstatus ⁴	0.84*** (0.15)	0.82*** (0.14)	0.82*** (0.13)	0.84*** (0.16)
$L_{den} * \log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	-0.07** (0.03)	-0.07** (0.02)	-0.05* (0.02)	-0.04 (0.02)
$L_{den} * \text{Flugbewegungen}$	-0.19 (0.25)	-0.30 (0.32)	0.15 (0.47)	-1.71*** (0.38)
$L_{den} * \text{Nachtfluganteil}$	-0.02 (0.09)	0.09 (0.10)	0.02 (0.14)	0.50*** (0.13)
$L_{den} * \text{Trend (5 J.)}$	0.00 (0.03)	0.01 (0.03)	0.00 (0.03)	-0.06 (0.04)
$L_{den} * \text{Flottenmix}$	0.26 (0.25)	0.27 (0.32)	-0.15 (0.47)	1.86*** (0.39)
$L_{den} * \text{Änderungsstatus}$	-0.32* (0.12)	0.03 (0.14)	0.34 (0.19)	-0.48** (0.19)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flugbewegungen}$	-0.80 (0.72)	0.03 (0.56)	-0.15 (0.53)	1.45*** (0.35)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Nachtfluganteil}$	0.39 (0.24)	0.00 (0.18)	-0.00 (0.17)	-0.39*** (0.11)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Trend (5 J.)}$	0.02 (0.07)	0.04 (0.05)	0.08 (0.05)	0.10** (0.03)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flottenmix}$	0.61 (0.72)	-0.04 (0.57)	0.12 (0.54)	-1.59*** (0.36)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Änderungsstatus}$	0.33 (0.35)	-0.13 (0.27)	-0.30 (0.25)	0.46** (0.17)

Tabelle 6-15. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe L_{den} & $\log(NAT)$

Parameter		Modell ^{1a}			
		SLdN50 ^{1b}	SLdN60 ^{1b}	SLdN70 ^{1b}	SLdN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor		L_{den}	L_{den}	L_{den}	L_{den}
2. Level-1-Prädiktor		$\log(NAT_{22-06h,50})$	$\log(NAT_{22-06h,60})$	$\log(NAT_{22-06h,70})$	$\log(NAT_{22-06h,80})$
Zufallseffekte	Var: Stichprobe (Intercept)	0.01	0.00	0.00	0.01
	Var: Stichprobe.1 L_{den}	0.00	0.00	0.00	0.00
	Var: Stichprobe.2 (Intercept)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Var: Stichprobe.3 $\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	0.04	0.02	0.01	0.00
Modellmerkmale	AIC	16299.82	16269.41	16270.67	16300.18
	BIC	16479.85	16449.44	16450.69	16480.20
	Log Likelihood	-8126.91	-8111.70	-8112.33	-8127.09
	N	18532	18532	18532	18532
	Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

^(1a,b,c) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq} unterscheiden sich durch den unterschiedlichen akustischen Level-1-Prädiktor [L_{den} , $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$, $L_{Aeq,22-06h}(k = 20)$ oder $L_{Aeq,22-06h}(k = 30)$; in der linken Spalte der Tabelle teilweise verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (SLd etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

⁽²⁾ Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (nachts).

⁽³⁾ 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (nachts).

⁽⁴⁾ Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.

In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

Tabelle 6-16. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe L_{Aeq} & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}			
	SLqN50 ^{1b}	SLqN60 ^{1b}	SLqN70 ^{1b}	SLqN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{22-06h,50})$	$\log(NAT_{22-06h,60})$	$\log(NAT_{22-06h,70})$	$\log(NAT_{22-06h,80})$
(Intercept)	-1.73*** (0.05)	-1.73*** (0.04)	-1.72*** (0.04)	-1.72*** (0.05)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	0.62*** (0.04)	0.50*** (0.06)	0.44*** (0.09)	0.80*** (0.07)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)^{1c}$	0.01 (0.10)	0.17 (0.11)	0.17 (0.10)	-0.20*** (0.05)
Flugbewegungen ²	2.99*** (0.28)	2.99*** (0.25)	3.03*** (0.24)	3.08*** (0.28)
Nachtfluganteil	-0.86*** (0.10)	-0.88*** (0.09)	-0.89*** (0.08)	-0.91*** (0.10)
Trend (5 J.) ³	-0.31*** (0.04)	-0.31*** (0.04)	-0.32*** (0.04)	-0.32*** (0.04)
Flottenmix	-3.17*** (0.28)	-3.17*** (0.26)	-3.20*** (0.25)	-3.27*** (0.29)
Änderungsstatus ⁴	0.92*** (0.15)	0.90*** (0.14)	0.87*** (0.13)	0.89*** (0.15)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	-0.15*** (0.03)	-0.11*** (0.03)	-0.12*** (0.03)	-0.13*** (0.02)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Flugbewegungen}$	0.14 (0.26)	0.43 (0.37)	1.41** (0.54)	-0.59 (0.44)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Nachtfluganteil}$	-0.14 (0.09)	-0.17 (0.12)	-0.33 (0.18)	0.10 (0.15)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Trend (5 J.)}$	0.01 (0.05)	0.06 (0.05)	-0.00 (0.07)	-0.01 (0.04)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Flottenmix}$	0.03 (0.27)	-0.38 (0.37)	-1.37* (0.55)	0.82 (0.45)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Änderungsstatus}$	-0.47** (0.15)	-0.05 (0.17)	0.40 (0.25)	-0.64** (0.22)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flugbewegungen}$	-0.85 (0.70)	-0.81 (0.64)	-1.42* (0.64)	0.61 (0.35)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Nachtfluganteil}$	0.41 (0.23)	0.28 (0.22)	0.30 (0.22)	-0.12 (0.12)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Trend (5 J.)}$	0.02 (0.08)	-0.2 (0.07)	0.08 (0.10)	0.06 (0.04)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80) * \text{Flottenmix}$	0.63 (0.71)	0.83 (0.65)	1.47* (0.64)	-0.81* (0.36)

Tabelle 6-16. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe L_{Aeq} & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}				
	SLqN50 ^{1b}	SLqN60 ^{1b}	SLqN70 ^{1b}	SLqN80 ^{1b}	
1. Level-1-Prädiktor	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{22-06h,50})$	$\log(NAT_{22-06h,60})$	$\log(NAT_{22-06h,70})$	$\log(NAT_{22-06h,80})$	
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ * Änderungsstatus	0.37 (0.36)	-0.30 (0.32)	-0.61 (0.32)	0.49** (0.17)	
Zufallseffekte	Var: Stichprobe (Intercept)	0.00	0.00	0.00	
	Var: Stichprobe.1 $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	0.00	0.00	0.00	
	Var: Stichprobe.2 (Intercept)	0.00	0.00	0.00	
	Var: Stichprobe.3 $\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$	0.03	0.03	0.02	0.00
Modellmerkmale	AIC	16259.38	16261.99	16256.65	16236.77
	BIC	16439.40	16442.01	16436.68	16416.80
	Log Likelihood	-8106.69	-8107.99	-8105.33	-8095.39
	N	18532	18532	18532	18532
	Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

^(1a,b,c) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe L_{Aeq} und $\log(NAT)$ unterscheiden sich durch den unterschiedlichen 2. Level-1-Prädiktor $\log(NAT_{22-06h,50})$, $\log(NAT_{22-06h,60})$, $\log(NAT_{22-06h,70})$ oder $\log(NAT_{22-06h,80})$; in der linken Spalte der Tabelle verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (SLqN50 etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4.1 des Anhangs).

⁽²⁾ Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (nachts).

⁽³⁾ 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (nachts).

⁽⁴⁾ Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.

In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

Tabelle 6-17. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$

Parameter	Modell ^{1a}			
	SMN50 ^{1b}	SMN60 ^{1b}	SMN70 ^{1b}	SMN80 ^{1b}
1. Level-1-Prädiktor	$L_{AS,max,log,22-06h,50}$	$L_{AS,max,log,22-06h,60}$	$L_{AS,max,log,22-06h,70}$	$L_{AS,max,log,22-06h,80}$
2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{22-06h,50})$	$\log(NAT_{22-06h,60})$	$\log(NAT_{22-06h,70})$	$\log(NAT_{22-06h,80})$
(Intercept)	-1.77*** (0.05)	-1.78*** (0.04)	-1.79*** (0.03)	-1.80*** (0.04)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ ^{1c}	0.40*** (0.03)	0.20*** (0.03)	-0.12** (0.05)	-0.31*** (0.08)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ ^{1d}	0.41*** (0.10)	0.56*** (0.09)	0.67*** (0.09)	0.60*** (0.06)
Flugbewegungen ²	2.96*** (0.29)	2.95*** (0.25)	2.95*** (0.19)	2.69*** (0.27)
Nachtfluganteil	-0.87*** (0.10)	-0.87*** (0.09)	-0.88*** (0.07)	-0.80*** (0.09)
Trend (5 J.) ³	-0.31*** (0.04)	-0.32*** (0.04)	-0.33*** (0.03)	-0.34*** (0.04)
Flottenmix	-3.15*** (0.29)	-3.12*** (0.26)	-3.12*** (0.20)	-2.78*** (0.28)
Änderungsstatus ⁴	0.88*** (0.16)	0.85*** (0.14)	0.83*** (0.10)	0.68*** (0.15)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ *	-0.09** (0.03)	-0.04 (0.03)	0.00 (0.02)	0.10** (0.03)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ *	-0.04 (0.18)	0.08 (0.19)	0.81** (0.25)	0.47 (0.41)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ *	-0.05 (0.06)	-0.05 (0.06)	-0.20** (0.07)	-0.11 (0.13)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ *	0.01 (0.04)	0.02 (0.02)	0.03 (0.02)	-0.02 (0.04)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ *	0.14 (0.18)	-0.08 (0.19)	-0.93*** (0.25)	-0.54 (0.43)
$L_{AS,max,log,22-06h,50}/\dots60/\dots70/\dots80$ *	-0.32** (0.10)	-0.06 (0.09)	0.35*** (0.10)	0.20 (0.22)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ *	-0.91 (0.68)	-0.42 (0.53)	-0.53 (0.51)	-0.02 (0.36)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ *	0.38 (0.22)	0.15 (0.18)	0.17 (0.18)	0.09 (0.12)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ *	0.01 (0.07)	0.02 (0.06)	0.07 (0.06)	0.9* (0.04)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ *	0.80 (0.69)	0.47 (0.55)	0.68 (0.52)	0.07 (0.37)
$\log(NAT_{22-06h,50})/(\dots60)/(\dots70)/(\dots80)$ *	0.08 (0.34)	-0.27 (0.29)	-0.35 (0.28)	-0.19 (0.20)

Tabelle 6-17. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$

Parameter		Modell ^{1a}			
		SMN50 ^{1b}	SMN60 ^{1b}	SMN70 ^{1b}	SMN80 ^{1b}
	1. Level-1-Prädiktor	$L_{AS,max,\log,22-06h,50}$	$L_{AS,max,\log,22-06h,60}$	$L_{AS,max,\log,22-06h,70}$	$L_{AS,max,\log,22-06h,80}$
	2. Level-1-Prädiktor	$\log(NAT_{22-06h,50})$	$\log(NAT_{22-06h,60})$	$\log(NAT_{22-06h,70})$	$\log(NAT_{22-06h,80})$
Zufallseffekte	Var: Stichprobe (Intercept)	0.01	0.00	0.00	0.00
	Var: Stichprobe.1 $L_{max...22-06h,50/60/70/80}$	0.00	0.00	0.00	0.01
	Var: Stichprobe.2 (Intercept)	0.00	0.00	0.00	0.00
	Var: Stichprobe.3 $\log(NAT_{22-06h,50})/(...60)/(...70)/(...80)$	0.04	0.03	0.04	0.04
Modellmerkmale	AIC	16286.02	16291.97	16330.02	16506.70
	BIC	16466.05	16472.00	16510.04	16686.73
	Log Likelihood	-8120.01	-8122.99	-8142.01	-8230.35
	N	18532	18532	18532	18532
	Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

^(1a,b,c,d) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe $L_{AS,max}$ und $\log(NAT)$ unterscheiden sich durch die unterschiedlichen akustischen Prädiktoren [die 1. Level-1-Prädiktoren $L_{AS,max,\log,22-06h,50}$, $L_{AS,max,\log,22-06h,60}$, $L_{AS,max,\log,22-06h,70}$ oder $L_{AS,max,\log,22-06h,80}$ und die 2. Level-1-Prädiktoren $\log(NAT_{22-06h,50})$, $\log(NAT_{22-06h,60})$, $\log(NAT_{22-06h,70})$ oder $\log(NAT_{22-06h,80})$; in der linken Spalte der Tabelle jeweils verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (SMN50 etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4-1 des Anhangs).

⁽²⁾ Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (nachts).

⁽³⁾ 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (nachts).

⁽⁴⁾ Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.

In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

Tabelle 6-18. Ergebnisse der Mehrebenenanalysen für HSD für Modelle der Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq}

Parameter	Modell ^{1a}			
	SLd ^{1b}	SLq10 ^{1b}	SLq20 ^{1b}	SLq30 ^{1b}
Level-1-Prädiktor	L_{den}	$L_{Aeq,22-06h}(k=10)$	$L_{Aeq,22-06h}(k=20)$	$L_{Aeq,22-06h}(k=30)$
(Intercept)	-1.78*** (0.04)	-1.78*** (0.04)	-1.78*** (0.04)	-1.77*** (0.04)
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$	0.56*** (0.03)	0.60*** (0.03)	0.68*** (0.10)	0.71*** (0.17)
Flugbewegungen ²	2.98*** (0.28)	2.92*** (0.28)	2.99*** (0.26)	3.05*** (0.25)
Nachtfluganteil	-0.89*** (0.10)	-0.86*** (0.10)	-0.90*** (0.09)	-0.92*** (0.09)
Trend (5 J.) ³	-0.31*** (0.04)	-0.31*** (0.04)	-0.32*** (0.04)	-0.33*** (0.04)
Flottenmix	-3.16*** (0.29)	-3.09*** (0.29)	-3.17*** (0.26)	-3.22*** (0.26)
Änderungsstatus ⁴	0.83*** (0.15)	0.85*** (0.16)	0.83*** (0.14)	0.81*** (0.14)
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Flugbewegungen	-0.29 (0.20)	-0.05 (0.20)	-0.37 (0.62)	-1.49 (1.06)
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Nachtfluganteil	0.07 (0.07)	-0.04 (0.07)	0.07 (0.22)	0.53 (0.38)
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Trend (5 J.)	0.02 (0.03)	0.02 (0.02)	0.07 (0.07)	0.12 (0.12)
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Flottenmix	0.34 (0.21)	0.17 (0.21)	0.47 (0.64)	1.45 (1.10)
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$ * Änderungsstatus	-0.14 (0.11)	-0.31** (0.11)	-0.46 (0.34)	-0.26 (0.59)
Zuf. Eff. Var: Stichprobe (Intercept)	0.01	0.01	0.01	0.00
Var: Stichprobe.1	0.00	0.00	0.06	0.20
$L_{den}/L_{Aeq,22-06h}(k=10)/(\dots k=20)/(\dots k=30)$				
Modellmerkmale AIC	16329.39	16282.12	16342.82	16440.82
BIC	16438.97	16391.71	16452.40	16550.40
Log Likelihood	-8150.70	-8127.06	-8157.41	-8206.41
N	18532	18532	18532	18532
Anz. Gruppen: Stichprobe	12	12	12	12

Anmerkungen.

(1a,b,c) Die 4 Modelle der hier dargestellten Modellgruppe L_{den} und der Modellgruppe L_{Aeq} unterscheiden sich durch den unterschiedlichen akustischen Level-1-Prädiktor [L_{den} , $L_{Aeq,22-06h}(k=10)$, $L_{Aeq,22-06h}(k=20)$ oder $L_{Aeq,22-06h}(k=30)$; in der linken Spalte der Tabelle teilweise verkürzt dargestellt]. Die verschiedenen Modellkürzel (SLd etc.) dienen nur der schnelleren Auffindung der vollständigen Ergebnisse und des R-Codes des jeweiligen Modells im Anhang D (vgl. Übersichtstabelle 4.1 des Anhangs).

(2) Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (nachts).

(3) 5-Jahrestrend Flugbeweg. pro Jahr (nachts).

(4) Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; die exakten z- und p-Werte sind im Anhang zu finden.

Alle Prädiktoren wurden zentriert (die Level-1- bzw. akustischen Prädiktoren am jeweiligen Cluster-Mittelwert und die Level-2-Prädiktoren bzw. Stichprobencharakteristika am Gesamt-Mittelwert); vgl. Text.
In Klammern sind die Standardfehler des jeweiligen Parameters angegeben.
AIC: *Akaike information criterion*.
BIC: *Bayesian information criterion*.

Schritt 3e: Identifizierung und Interpretation des ‚besten‘ vollständigen Modells. Für Modelle mit dem Kriterium *HSD* zeigt sich gemäß den Tabellen 6-16 bis 6-18 beim Vergleich der 2-Prädiktor-Modelle untereinander (Modellgruppen „ L_{den} & $\log(NAT)$ “, „ L_{Aeq} & $\log(NAT)$ “ und „ $L_{AS,max}$ & $\log(NAT)$ “) dass hinsichtlich der Indizes für die Anpassungsgüte, *AIC* und *BIC*, und ebenso hinsichtlich des Indikators für die Varianzaufklärung, R^2 , das Modell mit den gemeinsamen Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ die beste Anpassungsgüte aufweist. Bei den 1-Prädiktor-Modellen (Modell L_{den} und Modellgruppe L_{Aeq}) ist das Modell mit dem Prädiktor $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ hinsichtlich *AIC*, *BIC* wie auch R^2 mit der besten Anpassungsgüte verbunden.

Der Chi-Quadrat-Differenzentest zwischen diesen beiden Modellen wird signifikant. Das beste 2-Prädiktor-Modell (Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$) ist also dem besten 1-Prädiktor-Modell (Prädiktor $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$) statistisch überlegen und somit für das Kriterium *HSD* bei den vorliegenden Daten insgesamt das mit der besten Vorhersagegüte. Die Ergebnisse des Tests sind in Tabelle 6-19 dargestellt.

Tabelle 6-19. Ergebnisse des Chi-Quadrat-Differenzentests für die Modelle mit der besten Anpassungsgüte für das Kriterium *HSD*

Modell	Anz. Par.	AIC	BIC	logLik	Devi-ance	Chi-Qu.	DF	Pr(>Chisq)
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	14	16282	16392	-8127	16254			
$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ & $\log(NAT_{22-06h,80})$	23	16237	16417	-8095	16191	63.35	9	3.018e-10 ***

Anmerkungen.

AIC: Akaike information criterion.

BIC: Bayesian information criterion.

*** $p < 0.001$

Schritt 4: Odds ratios für die Effekte für das Modell mit der besten Anpassungsgüte für *HSD*.

Die Odds ratios und 95 %-Konfidenzintervalle für das Modell mit den gemeinsamen akustischen Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ sind in Tabelle 6-20 abgebildet. Zur Bedeutung und Berechnung der Odds ratios siehe Abschnitt 6.4.4.1.

Interpretation der Effekte. Zunächst fällt auf, dass alle Haupteffekte signifikant sind. Beide akustische Prädiktoren (Level-1-Prädiktoren) und alle Stichprobencharakteristika (Level-2-Prädiktoren) sowie einige Interaktionen üben signifikante Effekte auf die Wahrscheinlichkeit für *HSD* aus.

Die Effekte der akustischen Prädiktoren sind dabei gegenläufig. Während ein Anstieg um eine Einheit von $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ mit einer 2,24-fach erhöhten Wahrscheinlichkeit für *HSD* einhergeht (OR $L_{Aeq,22-06h}(k = 10) = 2.24$, 95 % Konfidenzintervall [1.95, 2.56]), sinkt die Wahrscheinlichkeit für *HSD* bei einem Anstieg um eine Einheit von $\log(NAT_{22-06h,80})$ um das 1,22-fache (OR $\log(NAT_{22-06h,80}) = 0.82$, 95 % Konfidenzintervall [0.74, 0.91]).

Unter den Stichprobencharakteristika (Level-2-Prädiktoren) sticht der Prädiktor ‚Flugbewegungen‘ hervor (die Anzahl der nächtlichen Flugbewegungen pro Jahr). Eine um eine Einheit erhöhte Anzahl

nächtlicher Flugbewegungen pro Jahr ist mit einer 21,73-fach erhöhten Wahrscheinlichkeit für *HSD* verbunden. Auch der Änderungsstatus ‚*HRC*‘ (statt ‚*LRC*‘) erhöht die Wahrscheinlichkeit für *HSD* (OR Änderungsstatus = 2.43, 95 % Konfidenzintervall [1.80, 3.29]). Die übrigen Stichprobencharakteristika ‚Nachtfluganteil‘, ‚Trend‘ (5-Jahrestrend nächtlicher Flugbewegungen pro Jahr) und ‚Flottenmix‘ sind mit einer verringerten Wahrscheinlichkeit für *HSD* verbunden.

Tabelle 6-20. Odds ratios für die Effekte des Modells mit den Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ für HSD

	Parameter	OR	CI 2.5 %	CI 97.5 %	
Haupteffekte	(Intercept)	0.17854318	0.16328601	0.19522595	*
	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$	2.23605335	1.95308456	2.56001951	*
	$\log(NAT_{22-06h,80})$	0.82038863	0.73772472	0.91231525	*
	Flugbewegungen ²	21.72569131	12.55249464	37.60253849	*
	Nachtfluganteil	0.40331678	0.33233958	0.48945245	*
	Trend (5 J.) ³	0.72672455	0.67196815	0.78594286	*
	Flottenmix	0.03797863	0.02162608	0.06669615	*
	Änderungsstatus ⁴	2.43407332	1.80199303	3.28786674	*
Interaktionseffekte	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \log(NAT_{24h,70})$	0.88051519	0.83921894	0.92384354	*
	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Flugbewegungen}$	0.55438183	0.23587935	1.30295093	
	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Nachtfluganteil}$	1.10072987	0.82385675	1.47065160	
	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Trend (5 J.)}$	0.99231355	0.90860580	1.08373.310	
	$L_{Aeq,22-06h}(k = 10) * \text{Flottenmix}$	2.26816106	0.94333598	5.45357611	
	$L_{Aeq,24h}(k = 10) * \text{Änderungsstatus (s. u.)}$	0.52463367	0.34000430	0.80952061	*
	$\log(NAT_{22-06h,80}) * \text{Flugbewegungen}$	1.83383500	0.92250755	3.64544531	
	$\log(NAT_{22-06h,80}) * \text{Nachtfluganteil}$	0.88307730	0.70480245	1.10644553	
	$\log(NAT_{22-06h,80}) * \text{Trend (5 J.)}$	1.06638.578	0.99104702	1.14745175	
	$\log(NAT_{22-06h,80}) * \text{Flottenmix (s. u.)}$	0.44585419	0.22041057	0.90188939	*
$\log(NAT_{22-06h,80}) * \text{Änderungsstatus (s. u.)}$	1.62760250	1.16732518	2.26936757	*	
Zerlegter Effekt von Änderungsstatus...					
...bei hohem* $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$		Keine Konvergenz des Modells			
...bei niedrigem* $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$		Keine Konvergenz des Modells			
Zerlegter Effekt von Änderungsstatus...					
...bei hohem* $\log(NAT_{22-06h,80})$		Keine Konvergenz des Modells			
...bei niedrigem* $\log(NAT_{22-06h,80})$		Keine Konvergenz des Modells			
Zerlegter Effekt der akustischen Prädiktoren...					
...bei Änderungsstatus „LRC“ („HRC=0“)		0.64806529	0.50848039	0.82596817	*
...bei Änderungsstatus „HRC“ („HRC=1“)		1.03911109	0.91635980	1.17830558	
Zerlegter Effekt von Flottenmix...					
...bei hohem* $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$		0.72870464	0.65103831	0.81563627	*
...bei niedrigem* $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$		0.92379230	0.82107799	1.03935585	
Zerlegter Effekt von Flottenmix...					
...bei hohem* $\log(NAT_{22-06h,80})$		0.82047442	0.73791214	0.91227429	*
...bei niedrigem* $\log(NAT_{22-06h,80})$		0.82040219	0.73782866	0.91221687	*
Zerlegter Effekt der akustischen Prädiktoren...					
...bei hohem* Flottenmix		Keine Konvergenz des Modells			
...bei niedrigem Flottenmix		Keine Konvergenz des Modells			

Anmerkungen.

(1) Anzahl Flugbewegungen pro Jahr (nachts).

(2) 5-Jahrestrend Flugbewegungen pro Jahr (nachts).

(3) Änderungsstatus: HRC (1) vs. LRC (0).

CI 2.5 % / CI 97.5 %: Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls.

* $p < 0.05$.

7 Diskussion und Schlussfolgerung

Diesem Forschungsvorhaben lag die Annahme zugrunde, dass der zeitliche Trend zu einer erhöhten Anzahl hoch durch Fluglärm belästigter Personen bei vergleichbarem Dauerschallpegel mit einer Zunahme der Häufigkeit von Flugbewegungen in Zusammenhang stehen könnte. Ausgehend von dieser Annahme wurde untersucht, ob sich die Vorhersageleistung des Anteils hoch belästigter Personen (% *HA*) verbessert, wenn anstelle des üblicherweise in Expositions-Wirkungsbeziehungen verwendeten Mittelungspegels, z.B. L_{Aeq} oder L_{den} eine Kombination dieses Prädiktors oder des Maximalpegels $L_{AS,max}$ mit einem stärker häufigkeitsbasierten akustischen Prädiktor – z.B. $\log(NAT)$ – genutzt wird. Untersucht wurde dies anhand von Modellen zur Vorhersage der *Wahrscheinlichkeit*, hoch belästigt (*highly annoyed*, *HA*) zu sein. Neben Flugbewegungen wurden auch Flughafen-spezifische Charakteristika in die Untersuchung einbezogen, wozu hier die jährliche Anzahl der Flugbewegungen, der Nachtfluganteil, der 5-Jahrestrend in den Flugbewegungen, der Flottenmix sowie der Änderungskontext eines bestimmten Flughafens, jeweils zu einer bestimmten Erhebungszeit, gezählt werden. Hiermit wurde die zusätzliche Annahme überprüft, dass diese Flughafencharakteristika über die in den rein akustischen Deskriptoren erfasste Information hinausgehend zur Varianzaufklärung und Verbesserung der Vorhersageleistung von *HA* beitragen können.

Neben der Vorhersageleistung für *HA* wurden die Annahmen bezüglich der Bedeutsamkeit von stärker an der Häufigkeit orientierten akustischen Prädiktoren und von Flughafencharakteristika auch für die Vorhersageleistung bei der Prädiktion des Anteils hoch schlafgestörter Personen (% *HSD*) (bzw. der Wahrscheinlichkeit, hoch schlafgestört zu sein) untersucht, einer weiteren zentralen Größe in der Fluglärmwirkungsforschung wie auch der Lärmaktionsplanung.

Unsere Ergebnisse unterstützen die dieser Studie zugrundeliegenden Annahmen sowohl im Bereich der Belästigung (bzw. mit *HA* als Kriterium – beide Annahmen), als auch im Bereich der (Schlaf)Störungen (bzw. mit *HSD* als Kriterium – ebenfalls beide Annahmen).

Mit Blick auf die erste Annahme und die Bedeutung stärker an der Häufigkeit orientierter akustischer Prädiktoren ergeben die Analysen folgendes Bild:

Bezüglich der Vorhersage von *HA* hat sich das Modell mit den gemeinsamen Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$ als gemeinsamen Prädiktoren als das hinsichtlich der Anpassungsgüte beste Modell erwiesen. Unter den Modellen mit einem akustischen Prädiktor zur Vorhersage von *HA* weist das Modell mit L_{den} die beste Anpassungsgüte auf, es ist jedoch dem Modell mit den gemeinsamen Prädiktoren $L_{Aeq,24h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{24h,70})$ statistisch unterlegen.

Auch bezüglich der Vorhersage von *HSD* erweist sich das 2-Prädiktoren-Modell mit der besten Anpassungsgüte, das Modell mit $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$, dem besten 1-Prädiktor-Modell (mit $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ als alleinigem Prädiktor) statistisch überlegen.

Hinsichtlich der ersten Annahme lässt sich zusammenfassend festhalten, dass sowohl für *HA* als auch für *HSD* die Hinzunahme eines häufigkeitsbezogenen akustischen Prädiktors mit höherer Maximalpegelschwelle ($\log(NAT_{24h,70})$ für *HA* und $\log(NAT_{22-06h,80})$ für *HSD*) zu dem Prädiktor L_{Aeq} die Vorhersagegüte verbessert und zugleich die Vorhersagegüte der Modelle mit einem einzelnen Dauerschallpegel

wie auch die der Modelle mit L_{den} und einem häufigkeitsbezogenen akustischen Prädiktor und der Modelle mit einer Kombination aus ausschließlich häufigkeitsbezogenen akustischen Prädiktoren übertrifft.

Zur Untersuchung der zweiten Annahme wurde über die akustischen Prädiktoren hinausgehend den spezifischen Einflüssen jeder Stichprobe dadurch Rechnung getragen, dass die oben genannten Stichprobencharakteristika (Flughafencharakteristika im jeweiligen Erhebungsjahr) als weitere Prädiktoren im Rahmen von Mehrebenenmodellen in den Analysen berücksichtigt wurden.

Für das Kriterium *HA* werden 11.29 % der durch die hier untersuchten Prädiktoren aufgeklärten Varianz durch Stichprobencharakteristika erklärt und für das Kriterium *HSD* 7.52 %. Die Bedeutung der Berücksichtigung der Stichprobencharakteristika zeigt sich insbesondere an verschiedenen signifikanten Haupt- und Interaktionseffekten.

Bezogen auf *HA* weisen bei dem besten Modell mit $L_{\text{Aeq},24\text{h}}(k = 10)$ und $\log(\text{NAT}_{24\text{h},70})$ als gemeinsamen akustischen Prädiktoren neben den akustischen Prädiktoren die Interaktionseffekte der akustischen Prädiktoren mit der Variable ‚Flottenmix‘ signifikante Effekte auf. Die Wahrscheinlichkeit für *HA* steigt sowohl bei niedrigem als auch bei hohem $\log(\text{NAT}_{24\text{h},70})$ (jeweils eine Standardabweichung unter bzw. über dem Mittel) jeweils um etwa das 1,35-fache. Bei niedrigem $L_{\text{Aeq},24\text{h}}(k = 10)$ steigt sie hingegen stärker (1,44-fach) und bei hohem $L_{\text{Aeq},24\text{h}}(k = 10)$ weniger stark (1,27-fach). Zudem lässt sich zeigen, dass bei niedrigen Flottenmix-Werten der kombinierte Effekt der akustischen Prädiktoren $L_{\text{Aeq},24\text{h}}(k = 10)$ und $\log(\text{NAT}_{24\text{h},70})$ um das 2,34-fache steigt, während sie bei hohen Flottenmix-Werten um das 1,27-fache sinkt. Die Variable ‚Flottenmix‘ übt also bei niedrigerem Dauerschallpegel einen stärkeren zusätzlichen Effekt auf die *HA*-Wahrscheinlichkeit aus als bei höherem Pegel, und dies gilt insbesondere für $L_{\text{Aeq},24\text{h}}(k = 10)$. Bei dem besten Modell bezogen auf *HSD* mit den gemeinsamen akustischen Prädiktoren $L_{\text{Aeq},22-06\text{h}}(k = 10)$ und $\log(\text{NAT}_{22-06\text{h},80})$ sind ebenfalls beide akustische Prädiktoren mit signifikanten Effekten verbunden -- $L_{\text{Aeq},22-06\text{h}}(k = 10)$ positiv und $\log(\text{NAT}_{22-06\text{h},80})$ negativ. Darüber hinaus ist auch der Effekt jedes Stichprobencharakteristikums signifikant. Hierbei fällt insbesondere der Prädiktor ‚Flugbewegungen‘ (Anzahl nächtlicher Flugbewegungen pro Jahr) auf, der mit einer 21,73-fach erhöhten Wahrscheinlichkeit für *HSD* einhergeht. Ebenfalls signifikant positiv wirken sich der ‚Änderungsstatus‘ (*HRC* statt *LRC*) auf *HSD* aus, während für den 5-Jahrestrend nächtlicher Flugbewegungen pro Jahr, den Nachtfluganteil und den Flottenmix signifikant negative Effekte zu verzeichnen sind.

Insgesamt bestätigt sich, dass die Anzahl der Flugbewegungen zusätzlich zum Mittelungspegel die Vorhersage der Lärmbelästigung verbessern kann. Dies gilt in gleicher Weise auch für die berichteten Schlafstörungen. Einen zusätzlichen Einfluss der Anzahl der Flugbewegungen konnten auch Gjestland & Gelderblom (2017) feststellen. Allerdings ergab sich dort ein Effekt der Anzahl der Flugbewegungen vor allem bei *LRC*-Flughäfen (vgl. Abbildung 1-6 S. 23), während sich dieser in dieser Studie auch für *HRC*-Flughäfen zeigte.

Die auf die Erhebungsjahre bezogenen Flughafencharakteristiken haben bei der Lärmbelästigung nur in Interaktion mit den individuellen akustischen Prädiktoren einen Effekt, während die akustischen Prädiktoren selbst auch einen Haupteffekt aufweisen. Es ist naheliegend anzunehmen, dass die individuelle Exposition – ausgedrückt im Schallpegel und zusätzlich in der Häufigkeit von Ereignissen mit höherem Geräuschpegel – diejenige ist, die sich eher wahrnehmen lässt und zu Belästigungsreaktionen führt.

Im Gegensatz dazu üben die Flughafencharakteristika auf *HSD* deutliche Haupteffekte aus. Der Anteil hoch schlafgestörter Personen basiert auf Selbstberichten darüber, wie sehr der Fluglärm den Schlaf (bzw. auch beim Ein- und Ausschlafen) stört. Dabei berichten Befragte über einen Zustand (Schlaf), der kaum bewusst wahrgenommen werden kann. Lärmwirkungsstudien, in denen die Wirkung von Fluglärm auf den Schlaf polysomnographisch, d.h. mit physiologischen Messmethoden, untersucht wird, belegen, dass lärmassoziierte Aufwachreaktionen auftreten, die nicht bewusst erlebt werden (zusammenfassend: Guski, Basner & Brink, 2012). Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass Befragte bei Angaben zu fluglärmbedingten Schlafstörungen mehr auf die Schlafstörungen schließen, als dass ihre Urteile auf tatsächlicher Wahrnehmung von Schlafstörungen während der Nacht beruhen. Für diesen Schluss können dabei die tagsüber erlebte Lärmexposition als auch die Kenntnis und Erfahrungen zu Charakteristiken des Flughafens insgesamt herangezogen werden. Dies kann ein möglicher Grund für die Haupteffekte der Flughafencharakteristika bei den selbstberichteten Schlafstörungen sein.

Im Unterschied zu den HA-Modellen ergab sich beim Kriterium *HSD*, dass in dem Modell mit den Prädiktoren $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ der nächtliche Dauerschallpegel einen positiven Effekt, der logarithmierte $NAT_{22-06h,80}$ dagegen einen negativen Effekt auf die Wahrscheinlichkeit hoch schlafgestört zu sein hat. Letzteres bedeutet, dass der % *HSD*-Anteil umgekehrt proportional zur Anzahl der nächtlichen Flugbewegungen mit einem Maximalpegelschwellenwert von 80 dB steigt. Dies liegt vermutlich daran, dass auf den nächtlichen Schlaf intermittierende Geräuschsituationen störender zu sein scheinen als kontinuierliche Geräuschsituationen. In der Schweizer SiRENE-Studie (Short and long-term effects of transportation noise) wurde zur Beschreibung des intermittierenden Charakters von Geräuschsituationen die intermittency ratio (IR) eingeführt, mit der die Intermittenz, d. h. die kurzfristige temporale Variation von Verkehrslärm quantifiziert wird (Wunderli et al., 2015). Die IR beschreibt den Anteil der akustischen Energie in der gesamten Schallenergie innerhalb einer Zeitperiode, der auf einzelne Geräuschereignisse oberhalb eines bestimmten Schwellenwerts zurückführbar ist. Damit beschreibt die IR die „Ereignishaftigkeit“ von Geräuschbelastungen (Wahrnehmbarkeit von „lauten“ Einzelgeräuschen) unabhängig von der Schallenergie (Wunderli et al., 2015). Für Fluglärm konnten Brink et al. (2019) anhand der SiRENE-Daten zeigen, dass bei hoher IR (also bei höherem intermittierendem Charakter des nächtlichen Fluglärms) der % *HSD*-Anteil höher liegt als bei mittlerer und niedriger IR. Die gegenläufigen Effekte der akustischen Parameter $L_{Aeq,22-06h}(k = 10)$ und $\log(NAT_{22-06h,80})$ auf die *HSD*-Wahrscheinlichkeit in dieser Studie sind im Einklang mit dem Befund von Brink et al. (2019). Befinden sich beide akustischen Parameter im gleichen Modell, dann bedeuten die Effekte, dass der % *HSD*-Anteil mit zunehmendem nächtlichen Dauerschallpegel steigt und dabei umso höher ausfällt, je mehr der Dauerschallpegel durch insbesondere weniger „laute“ Flugbewegungen entsteht, die nächtliche Fluglärmsituation also „ereignishafter“ ist.

8 Literatur

- Akaike, H. (1987). Factor analysis and AIC. *Psychometrika*, 52, 317-332. doi:10.1007/BF02294359.
- 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.
- Barry, T.M. & Reagan, J.A. (1978). *FHWA traffic noise prediction model*. Technical report No. FHWA-RD-77-108. Washington D.C. (USA): Federal Highway Administration, Office of Research, Office of Environmental Policy.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. doi: <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- Bissegger, M. (2013). Noise management in the light of airport development. *Proceedings of the Inter-Noise 2013, 42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Noise Control for Quality of Life* (Paper no. 1013). Innsbruck, Austria: Inter-Noise, September 15-18, 2013.
- Blinstrub, J., Isermann, U., Schmid, R., Raitor, T (in Vorbereitung). *Überprüfung und Verbesserung der Berechnungsverfahren beim Fluglärm*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3717541010.
- Brink, M., Schäffer, B., Vinneau, D., Foraster, Pieren, R., Eze, I.E., ... & Wunderli, J-M. (2019). A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise. *Environment International*, 125, 277–290.
- Brink, M., Wirth, K., Rometsch, R., & Schierz, C. (2005). *Lärmstudie 2000*. Zürich (CH): ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften.
- Brink, M., Wirth, K., Schierz, C., Thomann, G., & Bauer, G. (2008). Annoyance responses to stable and changing aircraft noise exposure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 2930-2941. doi:10.1121/1.2977680.
- Brooker, P., Critchley, J. B., Monkman, D. J. & Richmond, C. (1985). *United Kingdom Aircraft Noise Index Report*. Report DR 8402. London, UK: Civil Aviation Authority, Department of Transport.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), Generalsekretariat des Eidgenössischen Departementes für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS (GS VBS) (2016). *Leitfaden Fluglärm, Vorgaben für die Lärmmittlung*. Umwelt-Vollzug, Lärm Nr. 1625. Bern, Schweiz. Zugriff am 20.04.2020, von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/publikationen-studien/publikationen/leitfaden-fluglaerm.html>
- Burnham, K. P. & Anderson, D. R. (2004). Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods and Research*, 33, 261-304.

- Cointin, R., Sizov, N., and Hileman, J. I. (2016). U.S. civil aircraft noise annoyance survey design. Paper No. 1001. *Proceedings of the Inter-Noise 2016, 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Towards a Quieter Future* (Paper no. 734, S. 2579-2583). Hamburg, Germany: Inter-Noise, August 21-24, 2016.
- Der Bundesminister des Inneren. (1975). Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen an zivilen und militärischen Flugplätzen nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm vom 30.03.1971. *GMBI 26, Ausgabe A*, 1975.
- Der Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007). Bekanntmachung der Neufassung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm vom 31. Oktober 2007. *Bundesgesetzblatt Teil I, 56*, 2550-2556. Bonn (D), 9. November 2007.
- Der Bundesminister für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008). Erste Verordnung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm (Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen - 1. FlugLSV) vom 27. Dezember 2008. *Bundesgesetzblatt Teil I, 64*, 2980-2982. Bonn (D), 29. Dezember 2008.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hg., 1974). Fluglärmwirkungen. Eine interdisziplinäre Untersuchung über die Auswirkungen des Fluglärms auf den Menschen. 3 Bände. Bonn-Bad Godesberg: Deutsche Forschungsgemeinschaft.
- European Civil Aviation Conference (ECAC) (2016). DOC.29: *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, Volume 2: Technical Guide. 4th ed.* Neuilly-sur-Seine, France: European Civil Aviation Conference. Retrieved April 20, 2020, from <https://www.ecac-ceac.org/ecac-docs>
- Empa (2006). *Zürcher Fluglärmindex ZFI, Berechnungsvorschrift. Version 2*. Dübendorf, Schweiz: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminde- rung. Zugriff am 20.04.2020, von <http://www.afv.zh.ch/zfi>
- Empa (2010). *FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4*. Dübendorf, Schweiz: Eidgenössische Materialprü- fungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminde- rung. Zugriff am 20.04.2020, von <http://www.empa.ch/web/s509/flula2>
- Empa (2018). *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017*. Dübendorf, Schweiz: Eid- genössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminde- rung. Zugriff am 20.04.2020, von <http://www.vd.zh.ch/flughafenbericht>
- Fahrmeir, L., Kneib, T. & Lang, S. (2009). *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Zweite Auflage. Heidelberg: Springer.
- Fidell, S., Mestre, V., Schomer, P., Berry, B., Gjestland, T., Vallet, M. & Reid, T. (2011). A first- principles model for estimating the prevalence of annoyance with aircraft noise exposure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 30, 791-806.
- Fields, J. M., De Jong, R. G., Gjestland, T., Flindell, I. H., Job, R. F. S., Kurra, S., Lercher, P. V., M., Yano, T., Guski, R., Felscher-Suhr, U. & Schuemer, R. (2001). Standardized noise reaction questions

- for community noise surveys: research and a recommendation. *Journal of Sound & Vibration*, 242, 641-679.
- Gelderblom, F. B., Gjestland, T., Fidell, S. & Berry, B. (2017). On the Stability of Community Tolerance for Aircraft Noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 103, 17-27.
- Gjestland, T. & Gelderblom, F. B. (2017). Prevalence of noise induced annoyance and its dependency on number of aircraft movements. *Acta Acustica united with Acustica*, 103, 28-33.
- Gjestland, T., Gelderblom, 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, 331-336.
- Guski, R. (2017). The increase of aircraft noise annoyance in communities. Causes and consequences. Keynote lecture. *Proceedings of the 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem* (Paper N° 4164). Zurich, Switzerland: ICBEN 18–22 June 2017. Retrieved April 20, 2020, from www.icben.org/2017/ICBEN%202017%20Papers/Keynote04_Guski_4164.pdf.
- Guski, R., Basner, M. & Brink, M. (2012). *Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Flug-lärms: aktueller Wissensstand (Literaturauswertung)*. Schlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Bochum (D): Fakultät für Psychologie der Ruhr-Universität Bochum.
- Guski, R., Schreckenberger, D., Schuemer, R. (2017). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1539; doi:10.3390/ijerph14121539.
- Haubrich, J., Burtea, N.E., Hooper, P., Hudson, R., Radulescu, D., Rajé, F., Schreckenberger, D. (2020). Foundations for a comprehensive approach of acoustic and non-acoustic measures of aircraft noise annoyance mitigation. *Proceedings of Aerospace Europe Conference 2020, 25-28 February 2020*. Bordeaux, France.
- 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. Canberra (AUS): National Acoustic Laboratories.
- Hox, J. (2010). *Multilevel Analysis: Techniques and Applications*. Hove, UK: Routledge.
- Isermann, U. (2011). Fluglärmrechnungsverfahren – von der AzB zum Werkzeug für den aktiven Schallschutz. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2011*, 37. Düsseldorf, Deutschland: Deutsche Jah-

- restagung für Akustik. Auf der CD-ROM: ISBN 978-3-939296-02-7, erhältlich von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 13355 Berlin (D).
- Isermann, U., König, R., Pott-Pollenske, M., Schmid, R., Siller, H. (2015). Schlussbericht des Vorhabens „Modelle und Daten zur Entwicklung von aktiven Schallschutzmaßnahmen im Luftverkehr (MODAL)“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Göttingen, 2015.
- ISO. (2003). ISO/TS 15666. Technical Specification: Acoustics – Assessment of Noise Annoyance by Means of Social and Socio-Acoustic Surveys. 1st ed. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO).
- Janssen, S. A. & Guski, R. (in press). Aircraft noise annoyance. In S. A. Stansfeld, B. Berglund, S. Kephapopoulos & 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, S. 14 ff.).
- Janssen, S.A., Vos, H., van Kempen, E.E.M.M., Breugelmans, O.R.P. & 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), 1953–62.
- 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).
- Krebs, W., Balmer, M. & Lobsiger, E. (2008). A standardised test environment to compare aircraft noise calculation programs. *Applied Acoustic*, 69, 1096-1100.
- Krebs, W., Lobsiger, E. & Schäffer, B. (2014). SANC-TE, Swiss Aircraft Noise Test Environment, Technische Dokumentation. Dübendorf, Schweiz: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung.
- Koo, T.K., & Li, M.Y. (2017). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15, 155-163.
- Martini, G., Manello, A. & Scotti, D. (2013). The influence of fleet mix, ownership and LCCs on airports' technical/environmental efficiency. *Transportation Research Part E - Logistics and Transportation Review* 50, 37-52.
- Matschat, K. (1993). *Anleitung zur Benutzung des Rechenprogramms AZB*. Göttingen, Deutschland: Max-Planck-Institut für Strömungsforschung.
- Matschat, K. & Müller, E.-A. (1979). Effektivpegel und Geräuschdauer bei Flugzeugvorbeiflügen. In *Festschrift zum 100-jährigen Bestehen der Forschungs- und Versuchsanstalt Wien, Mai 1979*. Wien, Österreich.
- Matschat, K. & Müller, E.-A. (1984). *Vergleich nationaler und internationaler Fluglärmbewertungsverfahren, Aufstellung von Näherungsbeziehungen zwischen den Bewertungsmaßen*. Forschungs-

- bericht 81-105 01 307, UBA-FB 82-025. Göttingen, Deutschland: Max-Planck-Institut für Strömungsforschung.
- McElreath, R. (2015). Multilevel models (chapter 12). In R. McElreath, *Statistical rethinking* (p. 355-386). Verfügbar unter http://xcelab.net/rmpubs/rethinking/Statistical_Rethinking_sample.pdf (Chapter 1, Chapter 12)
- McElreath, R. (2017). Multilevel Regression as Default. *Elements of Evolutionary Anthropology*. Verfügbar unter <https://eleanth.org/blog/2017/08/24/multilevel-regression-as-default/>
- McKinnell, A. C. (1963). *Aircraft noise annoyance around Heathrow airport*. London (UK): Her Majesty's Stationary Office.
- 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 Ltd. (1971). *Second survey of aircraft noise annoyance around London (Heathrow) Airport*. London (UK): Her Majesty's Stationary Office.
- Muthén, B. O. & Satorra, A. (1995). Complex Sample Data in Structural Equation Modeling. *Sociological Methodology*, 25, 267-316. Verfügbar unter <https://www.statmodel.com/download/SMMuthenSatorra1995.pdf>
- MVA-Consultancy. (2007). *ANASE: Attitudes to Noise from Aviation Sources in England. Final Report*. Woking / Norwich (UK): Queen's Printer and Controller of HMSO.
- Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 189/12 vom 18.07.2002*. Zugriff am 20.04.2020, von <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&rid=1>
- Rylander, R. & Björkman, M. (1997). Annoyance by aircraft noise around small airports. *Journal of Sound and Vibration*, 205, 533-537.
- Schäffer, B., Bütikofer, R., Plüss, S. & Thomann, G. (2011). Aircraft noise: accounting for changes in air traffic with time of day. *Journal of the Acoustical Society of America*, 129, 185-199.
- Schäffer, B., Plüss, S. & Thomann, G. (2014). Estimating the model-specific uncertainty of aircraft noise calculations. *Applied Acoustics* 84, 58–72.
- Schreckenber, D., Belke, C., Faulbaum, F., Guski, R., Möhler, U., Spilski, J. (2016). Effects of aircraft noise on annoyance and sleep disturbances before and after expansion of Frankfurt Airport – results of the NORAH study, WP 1 'Annoyance and quality of life'. *Proceedings of the INTER-NOISE 2016, 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. (pp. 7768-7777). Hamburg, Germany, August 21 – 24, 2016. Retrieved October 24, 2016, from <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/index.html>.
- Schreckenber, D., Faulbaum, F., Guski, R., Ninke, L., Peschel, C., Spilski, J. & Wothge, J. (2015). Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität. In Umwelthaus-gmbH

- (Ed.), *NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld* (Vol. 3). Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH.
- Schreckenberger, D., Guski, R., Haubrich, J. & Spilski, J. (2019). Assessment of the impact of changes in noise exposure at an expanding airport by means of the multiple item aircraft noise annoyance scale (MIAS). *Proceedings of ICA 2019. Aachen, Germany: International Congress on Acoustics 9-13 September 2019*; Paper No. ICA2019/1323.
- Schreckenberger, D. & Meis, M. (2006). Gutachten Belästigung durch Fluglärmim Umfeld des Frankfurter Flughafens – Endbericht. Im Auftrag des Regionalen Dialogforums Frankfurt (RDF), 11.09.2006.
- Schreckenberger, D., Meis, M., Kahl, C., Peschel, C. & Eikmann, T. (2010). Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 3382-3405. doi:10.3390/ijerph7093382.
- Thomann, G., (2007). *Mess- und Berechnungsunsicherheit von Fluglärmbelastungen und ihre Konsequenzen*. Dissertation, Diss. ETH Nr. 17433. ETH Zürich, Zürich, Schweiz. URL: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:29931>
- Tracor-Inc. (1970). Community reaction to airport noise. Final report (T-70-AU-7454-U). Austin, USA, TX: Tracor Inc.
- Umweltbundesamt (1999). Entwurf der neuen zivilen AzB-Flugzeugklassen. Berlin (D): UBA, I3.3-60112/5, 1999.
- U.S. Department of Transportation (DOT) (2017). *Aviation Environmental Design Tool (AEDT), Technical Manual, Version 2c, Service Pack 2*. Report No. DOT-VNTSC-FAA-17-08. Cambridge, MA, USA: U.S. Department of Transportation, Volpe National Transportation Systems Center, Federal Aviation Administration. Retrieved April 20, 2020, from https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT2cSP2_TechManual.pdf
- van Gerven, P.W.M., Vos, H., van Boxtel, M.P.J., Janssen, S.A. & Miedema, H.M.E. (2009). Annoyance from environmental noise across the lifespan. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126, 187-194.
- Van Kempen, E. & Van Kamp, I. (2005). Annoyance from air traffic noise. Possible trends in exposure-response relationships. Report 01/2005 MGO EvK, Reference 00265/2005, Bilthoven, The Netherlands: RIVM.
- Wunderli, J.M., Pieren, R., Habermacher, M., Vienneau, D., Cajochen, C., Probst-Hensch, N., Roosli, M., Brink, M. (2015). Intermittency ratio: A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 26, 575–585.