

Aktueller Wissensstand zu Fluglärm und Gesundheit – einschließlich WHO-Reviews und neuer Literatur bis Ende 2018

Thomas Penzel¹, Ursula Krämer², Rainer Höger³, Sandra Zimmermann¹, H.-Erich Wichmann⁴

¹ Interdisziplinäres Schlafmedizinisches Zentrum, Charité – Universitätsmedizin Berlin

² Leibniz-Institut für Umweltmedizinische Forschung, Düsseldorf

³ Leuphana Universität, Lüneburg

⁴ ehemals Helmholtz Zentrum München und Universität München

Zusammenfassung

Hintergrund: Ein erheblicher Teil der Bevölkerung, der in der Nähe von Flughäfen lebt, fühlt sich durch den Fluglärm belästigt oder befürchtet Gesundheitsschäden. Im Folgenden soll ein Überblick über die Publikationen zu Fluglärmwirkungen gegeben werden, die bis Ende 2018 erschienen sind.

Methode: Grundlage sind 2 aktuelle Literaturreviews: Die WHO beauftragte verschiedene Expertenteams mit systematischen Reviews zu Umweltlärm und Belästigung, kardiovaskulären und metabolischen Effekten, Schlaf, Kognition, Lebensqualität und psychischen Erkrankungen, Hörverlust und Tinnitus sowie Schwangerschaft und Geburt. Diese bewerteten Zusammenhangsmaße aus der Literatur bis 2015 und dienten als Grundlage zur Aktualisierung der europäischen Lärmrichtlinien. Ein Team unter der Leitung der Charité bewertete im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche Publikationen aus dem Zeitraum 1990 bis 2018 anhand einheitlicher Bewertungskriterien. Zusätzlich zu den von der WHO untersuchten Wirkungen wurden Zusammenhänge des Fluglärms mit Stresshormonen, Krebs und die ökonomischen Folgen analysiert.

Ergebnisse: WHO und Team Charité berichten übereinstimmend über statistisch abgesicherte Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung und Wirkungen (1) auf Selbstangaben zur empfundenen Belästigung (2) auf das Herz-Kreislaufsystem (ischämische Herzkrankheit und Hypertonie), (3) auf den Schlaf (Aufwachreaktionen, Schlafqualität) sowie (4) auf die Lesefähigkeit von Kindern. Die Evidenzbeurteilungen der WHO-Reviews zu den jeweiligen Wirkungsbereichen erfolgten unterschiedlich streng.

Schlussfolgerung: Für den Zusammenhang zwischen Fluglärm und den genannten Wirkungen (1) bis (4) liegen Expositions-Wirkungsbeziehungen vor, die bevölkerungsbezogene Risikoabschätzungen möglich machen. Für Auswirkungen auf andere Organsysteme und Krankheitsbilder bestehen teilweise Hinweise, diese sind aber derzeit nicht ausreichend belegt.

Schlüsselworte: Lärmwirkungsforschung, Fluglärm, Gesundheitsrisiken, Review, WHO-Empfehlungen

Abstract

Background: A considerable part of the population living close to airports is annoyed or afraid of negative health consequences by aircraft noise. To address these concerns, a review of publications about research results on the health impact of aircraft noise covering the time up to the end of 2018 will be given.

Methods: Two recent reviews of the literature built the basis for this publication. WHO tasked different expert teams with systematic reviews about environmental noise and annoyance, cardiovascular and metabolic effects, sleep, cognition, psychic disorders, hearing loss and tinnitus and pregnancy and birth outcomes. These reviews evaluated association measures gained from the literature published until 2015 and built the basis for updating the European noise guidelines 2018. An expert team managed by Charité systematically evaluated the literature published between 1990 and 2018 using uniform criteria. Additionally to the topics evaluated by WHO relationships between aircraft noise and stress hormones, cancer and economic consequences were evaluated by team Charité.

Results: WHO and Team Charité consistently reported statistically significant and relevant associations between aircraft noise and effects on (1) self-reported annoyance (2) the cardiovascular system (ischemic heart disease and hypertension), (3) sleep (awakenings, sleep quality) and (4) reading performance in children. The quality judgments of the WHO reviews for the respective effects were based on varying strictness.

Korrespondenzautor:

Prof. Dr. Thomas Penzel
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Zentrum für Schlafmedizin
Charitéplatz 1
10117 Berlin
E-Mail: thomas.penzel@charite.de

Conclusions: Exposure effect relationships have been established for the associations (1) to (4) listed above, which allow population based risk assessments. For effects on other organ systems and other disorders, studies show early indications, but currently the evidence is not sufficient.

Keywords: Noise effects, Aircraft noise, health risks, review, WHO guidelines

1 Einleitung

Die zunehmende Mobilität unserer Gesellschaft bedeutet eine Zunahme des Verkehrs auf Straße, Schiene und in der Luft. Damit gewinnt auch die Belastung der Umwelt mit Verkehrslärm an Bedeutung. Von Fluglärm sind zwar prozentual weniger Menschen betroffen als von Straßen- und Schienenverkehrslärm, der Aus- und Umbau verschiedener Flughäfen macht aber die Diskussion um mögliche schädliche Auswirkungen des Fluglärms auf die menschliche Gesundheit besonders aktuell. In den letzten Jahren wurde eine Reihe großer nationaler und internationaler Studien durchgeführt, die unsere Kenntnisse über das Wirkungsspektrum und -ausmaß von Fluglärm wesentlich erweitert haben.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Stand der Forschung bis Ende 2018 zur Wirkung von Fluglärm auf die Gesundheit der Bevölkerung, umfassend darzustellen.

Von der WHO wurden systematische Reviews zum Einfluss von Umweltlärm auf die Gesundheit beauftragt, die 2017 und 2018 publiziert wurden und auf der bis 2014/2015 veröffentlichten Literatur basieren. Insgesamt wurden folgende Reviews publiziert:

- Einleitung (Jarosińska et al. 2018)
- Belästigung (Guski et al. 2017)
- Kardiovaskuläre und metabolische Effekte (van Kempen et al. 2018)
- Schlaf (Basner und McGuire 2018)
- Kognition (Clark und Paunovic 2018a)
- Lebensqualität, Wohlbefinden und psychische Gesundheit (Clark und Paunovic 2018b)
- Hörverlust und Tinnitus (Sliwińska-Kowalska und Zaborowski 2017)
- Schwangerschaft und Geburt (Nieuwenhuijsen et al. 2017)
- Gesundheitliche Auswirkungen von Lärminterventionen (Brown und van Kamp 2017)

Die Ergebnisse dieser Reviews dienen als Grundlage für die Aktualisierung der Lärmrichtlinien für Europa und wurden im WHO-Bericht „Environmental Noise Guidelines for the European Region“ (WHO 2018) zusammengefasst, der im Herbst 2018 veröffentlicht wurde. Sie werden im Folgenden im Hinblick auf gesundheitliche Auswirkungen des Fluglärms dargestellt.

Unabhängig von den Reviews der WHO wurde der Stand der Forschung zu Fluglärmwirkungen auf die Gesundheit

bis zum Jahre 2015 von einem Team aus Experten, zu dem die Autoren dieses Beitrages gehören, in einem Bericht „Evaluierung der Forschung zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen“ (Penzel 2017) zusammengestellt, der erstmals im Jahre 2017 und in einer überarbeiteten Version in 2018 veröffentlicht wurde. Ferner wurde eine um den Zeitraum 2015 bis Ende 2018 erweiterte Literaturanalyse ergänzt, die ebenfalls vom Team Charité erstellt wurde. Diese schließt auch die wichtigen Publikationen zur NORAH- (Noise-related annoyance, cognition, and health) Studie aus Deutschland ein, die in den früheren Reviews nur teilweise berücksichtigt wurden. Abschließend erfolgte für jeden Wirkungsbereich eine Gesamtbewertung (Synopsis) der Literatur bis Ende 2018.

Die Darstellung in dieser Arbeit ist nach dem System des WHO-Berichtes gegliedert und wurde um die Wirkungsbereiche Stresshormone, Krebs sowie Ökonomische Folgen erweitert. Zu den letzteren drei Wirkungsbereichen lagen keine WHO-Analysen vor.

In einem ausführlichen elektronischen Anhang (siehe Link am Ende des Manuskripts), der aus Teil-Anhängen der analysierten Gesundheitsbereiche besteht, werden Bewertungen wichtiger Einzelstudien und weitere wichtige Informationen dargestellt

2 Methoden

2.1 Literaturanalyse der WHO bis 2014/2015 (WHO 2018)

Das Ziel des WHO-Berichtes war es, Richtwerte für Umweltlärm zu bestimmen, bei deren Einhaltung vorher festgelegte Risiken oder Risikoerhöhungen (sogenannte Benchmark Niveaus) nicht überschritten werden. Dazu müssen Schätzer für quantitative Expositions-Wirkungskurven aus Meta-Analysen mit wenigstens moderater Evidenz bestimmt werden können und signifikant sein. Diese Zielstellung geht deutlich über den Fokus dieser Arbeit hinaus, die sich auf den ersten Schritt der WHO-Reviews beschränkt, nämlich die systematische Analyse der relevanten Literatur.

Zunächst wurde vom WHO Regional Office für Europa eine Gruppe zur Entwicklung der Guidelines (Guideline Developing Group, GDG) berufen, die sich mit ausführenden Experten und „Endnutzern“ zusammensetzte, den Bewertungsrahmen vorgab und evidenzbasierte Empfehlungen entwickelte.

Im ersten Schritt identifizierte die GDG die wichtigsten gesundheitlichen Auswirkungen, die mit Umweltlärm assoziiert waren. Anschließend wurde die Relevanz dieser Gesundheitsparameter in die folgenden 3 Kategorien eingeordnet:

- Kritisch für die Abschätzung der Probleme von Umweltlärm
- Wichtig, aber nicht kritisch für die Abschätzung der Probleme von Umweltlärm
- Weniger wichtig („unimportant“)

Die GDG bewertete die Relevanz dabei auf der Grundlage des Schweregrads und der Häufigkeit der gesundheitlichen Auswirkungen und der erwarteten Verfügbarkeit von Evidenz für eine Assoziation mit der Lärmexposition.

Die folgenden gesundheitlichen Auswirkungen wurden als „kritisch“ oder „wichtig“ für die Entwicklung von Empfehlungen für den Einfluss von Umweltlärm auf die Gesundheit ausgewählt:

Kritische gesundheitliche Auswirkungen

- Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Cardiovascular disease)
- Belästigung (Annoyance)
- Auswirkungen auf den Schlaf (Effects on sleep)
- Kognitive Beeinträchtigungen (Cognitive impairment)
- Hörverlust und Tinnitus (Hearing impairment and tinnitus)

Wichtige gesundheitliche Auswirkungen

- Auswirkungen auf Schwangerschaft und Geburt (Adverse birth outcomes)
- Lebensqualität, Wohlbefinden und psychische Gesundheit (Quality of life, well-being and mental health)
- Metabolische Effekte (Metabolic outcomes)

Im nächsten Schritt wurden jeweils ausgewiesene Experten beauftragt, systematische Reviews über die Effekte von Lärm durchzuführen und die Evidenz für die quantitativen Expositions-Wirkungsbeziehungen aus der zusammengestellten Literatur für jeden Wirkungsbereich mit Hilfe des GRADE-Verfahrens (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation (Guyatt et al. 2008) zu bewerten. Dieses Verfahren wurde ursprünglich für die Bewertung randomisierter klinischer Studien (Randomized Clinical Trials RCT) entwickelt und von der WHO für die Anwendung auf epidemiologische Studien adaptiert.

Jeder Wirkungsbereich wurde unabhängig voneinander von jeweils einem WHO-Expertenteam bewertet. 4 unterschiedliche Qualitätsstufen konnten dabei erreicht werden: hohe, moderate, niedrige oder sehr niedrige Qualität.

Das Hauptqualitätsmerkmal bildete die Art der durchgeführten Studie. Kohortenstudien und Fall/Kontrollstudien

Tabelle 1: Qualitätsstufen der Evidenz nach dem GRADE-System (modifiziert nach van Kempen et al. 2018)

Qualität der Evidenz	Definition	Beispiel
Hoch	Sehr unwahrscheinlich, dass weitere Forschung das Vertrauen in den Effektschätzer verändert	Mehrere Studien von hoher Qualität mit konsistenten Resultaten vorhanden
Moderat	Weitere Forschung wird vermutlich einen bedeutenden Einfluss auf das Vertrauen in den Effektschätzer haben und könnte den Effektschätzer verändern	Eine Studie von hoher Qualität Mehrere Studien mit einigen Limitationen
Niedrig	Weitere Forschung wird sehr wahrscheinlich einen bedeutenden Einfluss auf das Vertrauen in den Effektschätzer haben und wird vermutlich den Effektschätzer verändern	Eine oder mehrere Studien mit bedeutenden Limitationen
Sehr niedrig	Jeder Effektschätzer ist sehr ungenau und wenig vertrauenswürdig	Keine direkte Forschungsevidenz, eine oder mehrere Studien mit bedeutenden Limitationen

haben danach eine hohe Qualität, Querschnittstudien eine niedrige (Ausnahme Belästigung – hier galten auch Querschnittstudien als von hoher Qualität) und ökologische Studien eine sehr niedrige.

Zur Abwertung der Evidenz um jeweils eine Stufe führten:

- Verzerrungsrisiko bei den einzelnen einbezogenen Studien (wenigstens die Hälfte sollte ein niedriges Risiko haben)
- Inkonsistenz der Resultate
- Indirektheit der Evidenz
- Mangelnde Präzision des gepoolten Effektmaßes
- Publikationsbias

Zur Aufwertung um jeweils eine Stufe führten:

- Hoher gepoolter Effektschätzer
- Abschwächende Wirkung des residual confounding
- Vorhandener Expositions-Wirkungs-Gradient

Die GRADE-Einschätzung der Gesamtevidenz hatte unmittelbare Auswirkungen auf die Stärke der Empfehlung für Lärmrichtwerte, dem eigentlichen Ziel des WHO-Berichtes. Eine zwingende Empfehlung (strong) wurde nur dann gegeben, wenn die Gesamtevidenz von mindestens moderater Qualität war. In allen anderen Fällen wurden nur bedingte Empfehlungen gegeben. Eine Übereinstimmung zwischen den WHO-Expertengruppen für die einzelnen Wirkungsbereiche hinsichtlich der Interpretation der GRADE-Kriterien war jedoch nicht immer gegeben mit der Konsequenz, dass

die Stärke der Empfehlungen für Richtwerte aus den einzelnen Wirkungsbereichen trotz eigentlich vergleichbarer Sachlage unterschiedlich war.

2.2 Literaturrecherche des Teams Charité bis 2015 (Penzel et al. 2017)

Ein Team aus Experten der Fachgebiete Medizin, Psychologie, Epidemiologie, Statistik und Ökonomie hat die aktuelle Literatur zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen detailliert analysiert. Das Ziel war ein systematisches Review der Literatur mit einer narrativen Zusammenfassung der Ergebnisse aus Studien mit wenigstens guter Evidenz für einen Zusammenhang. Die Erkenntnisse mit Ergebnissen bis 2015 wurden im Bericht „Evaluierung der Forschung zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen“ von Penzel et al. zusammengestellt. Grundlage der Analyse war eine systematische Literaturrecherche nach Publikationen zu Fluglärmwirkungen, die zwischen 1990 und 2015 erschienen sind. Die Recherche bis 2012 wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Datenbanken durchsucht. Metaanalysen und Übersichtsarbeiten wurden mit den Begriffen („meta“ OR „review“) AND („air* noise“ OR „jet noise“) AND („health“ OR „effect“) gesucht. Für Einzelstudien wurde die Literatur der Übersichtsarbeiten herangezogen. Zusätzlich wurden Einzelstudien mit den folgenden Begriffen gesucht: („air* noise“ OR „jet noise“) AND („sleep“ OR „reading“ OR „learn*“ OR „hypertension*“ OR „disease“ OR „cortisol“ OR „myocard*“ OR „psychology*“ OR „children“ OR „response“ OR „heart*“ OR „awaken*“ OR „motility“ OR „hormone“ OR „REM“ OR „quality of life“ OR „blood pressure“ OR „non-auditory“ OR „cancer“ OR „drugs“ OR „medication“ OR „dose-response“ OR „birth*“ OR „mortality“ OR „depressions“ OR „psychiatric“ OR „anxiety“ OR „school“). Auf diese Weise wurden 573 Quellen bestimmt (Review, Veröffentlichungen von Einzelstudien, Konferenzbeiträge, Gutachten, Richtlinien).

Deutsch- und englischsprachige Veröffentlichungen von Einzelstudien sowie neuere Forschungsberichte aus Deutschland (ab 1990) wurden einzeln hinsichtlich ihrer Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Wirkungsgröße und Fluglärm beurteilt (328 Literaturstellen). Dazu wurde ein gemeinsam entwickelter standardisierter Bewertungsbogen benutzt. In diesem wurden Fragestellung, Methodik, Ergebnisse und Interpretation der Autoren zusammengefasst und detailliert anhand von 30 vorgegebenen Kriterien als adäquat/gut, nicht adäquat/schlecht oder moderat bewertet. Die Evidenz der Studien wurde in 4 Kategorien eingeteilt (sehr gut, gut, eingeschränkt, keine). Sie wurden nur dann als sehr gut oder gut eingeschätzt, wenn sie von hoher methodischer Qualität waren, das Risiko für Confounding oder Bias niedrig war und die Wahrscheinlichkeit eines kausalen Zusammenhanges zumindest moderat war. Diese Evidenzeinteilung orientiert sich an SIGN50 „A guideline

developer’s handbook“ (SIGN50). Im Gegensatz zum klinisch orientierten SIGN50, wo nur Fall/Kontroll und Kohortenstudien einbezogen wurden, wurden in der Literaturanalyse des Teams Charité auch experimentelle Studien und epidemiologische Querschnittsstudien beachtet. Studien, die auf epidemiologischen Untersuchungen beruhten, wurden zusätzlich immer auch von einem Epidemiologen aus dem Team beurteilt. Die Ergebnisse von Studien mit sehr guter und guter Evidenz wurden beschrieben, ferner auch Studien, die in der Diskussion in Deutschland eine Rolle gespielt haben.

2.3 Studien 2015–18 (Team Charité)

Die Bewertung von Studien zur Wirkung von Fluglärm aus den Jahren 2015 bis 2018, die in den oben beschriebenen Reviews noch nicht enthalten sind, wurde vom Team Charité nach denselben Kriterien wie in Penzel et al. (2017) vorgenommen.

2.4 Gesamtbewertung (Synopsis)

Für jeden untersuchten Wirkungsbereich werden die Erkenntnisse der Reviews der WHO und des Teams Charité qualitativ zusammengefasst. Ferner werden in der Diskussion ein Vergleich der unterschiedlichen Vorgehensweisen und ein Ergebnisvergleich vorgenommen.

Die Darstellungsweisen des Teams Charité und der WHO zur Bewertung der Literatur ergänzen einander. Die narrative Zusammenfassung des Teams Charité gibt dem Leser einen Einblick darin, wie die Studien im Einzelnen durchgeführt wurden. Dieser Aspekt ging im WHO-Bericht verloren, der in erster Linie den streng formalisierten Entscheidungsprozess transparent darstellt. Die beiden Aspekte werden im Folgenden nebeneinander und vergleichend dargestellt.

2.5 Exposition

In den meisten der vorliegenden Studien wurden energieäquivalente Dauerschallpegel LAeq in dB zur Charakterisierung der Lärmexposition verwendet. Der LAeq ist ein Dauerschallpegel über die während eines bestimmten Zeitraums auftretenden Einzelschallereignisse. Er berücksichtigt sowohl Stärke als auch Dauer und Häufigkeit der einzelnen Schallemissionen. Dauerschallpegel können darüber hinaus Zuschläge enthalten, die über eine energetische Mittelung hinausgehen.

Der WHO-Leitlinienbericht (WHO 2018) strebte Regelungen für die Lärmindikatoren Lden und Lnight an. Dabei ist Lden definiert als der Lärmpegel, der den durchschnittlichen Schalldruck außen an der am stärksten exponierten Fassade über alle Tage, Abende und Nächte die der Studie

vorausgehenden 12 Monate repräsentiert. Abende wurden mit einem Zuschlag von 5 dB gewichtet und Nächte mit einem Zuschlag von 10 dB. Der Lärmpegel L_{night} beschreibt die nächtliche Exposition über 8 Stunden und wurde ebenfalls für ein Jahr berechnet.

Für akute Effekte wie Schlafstörungen wurde auch die Intensität von Einzelereignissen und deren Anzahl zur Charakterisierung der Exposition einbezogen. Dabei wurde z. B. die Zahl der Überflüge, speziell die Zahl der nächtlichen Überflüge, verwendet. So zeigte die Feldstudie von Quehl et al. (2017) – neben dem Energie-äquivalenten Schalldruck – die Bedeutung der Zahl nächtlicher Überflüge für die Kurzzeit-Belästigung durch nächtlichen Fluglärm.

Neuere Ansätze versuchten, kurzzeitige Veränderungen der Lärmexposition zu quantifizieren (z. B. die Intermittency Ratio (Wunderli et al. 2016), deren Erprobung steht aber erst am Anfang (Héritier et al. 2017).

Wie ► **Abbildung 1** am Beispiel des Flughafens Düsseldorf deutlich macht, haben sich die Charakteristika des Fluglärms über die letzten Jahrzehnte hinweg deutlich verändert. Während die Anzahl an Flugbewegungen bis 2007 stetig zugenommen hat, ist der Dauerschallpegel nahezu kontinuierlich gesunken, die Relation zwischen Dauerschallpegel und Anzahl an Flugbewegungen hat sich verändert.

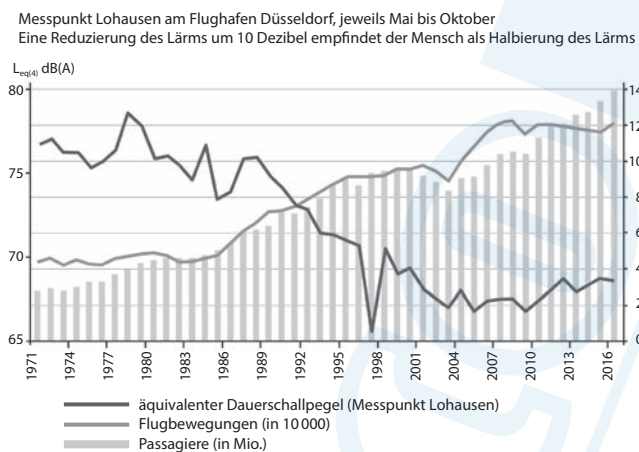


Abbildung 1: Flugbewegungen, Anzahl der Passagiere und äquivalenter Dauerschallpegel von 1971 bis 2016 (jeweils in den verkehrsreichsten Monaten Mai bis Oktober) am Messpunkt Lohausen, Flughafen Düsseldorf. Quelle: Flughafen Düsseldorf (aus Penzel 2017).

3 Gesundheitliche Wirkungen von Fluglärm

3.1 Fluglärm und Belästigung

Das Empfinden von Lärm als Belästigung ist eine subjektive, emotional-negative Reaktion auf unerwünschte Geräusche. Eine Befragung von Lärmforschern aus 7 verschiedenen Ländern durch Guski et al. (1999) ergab in erster Linie Assoziationen mit den Begriffen Ärger und Störung.

Zur Erfassung der Belästigung wird – international vereinheitlicht – erfragt, wie stark sich die entsprechende Person in den letzten 12 Monaten durch Fluglärm gestört oder belästigt gefühlt hat. Es gibt 5 Antwortkategorien: äußerst gestört oder belästigt (5), stark (4), mittelmäßig (3), etwas (2) oder überhaupt nicht (1). Eine hohe Belästigung (Antwortkategorie 4 oder 5) wird als relevant angesehen. Eine ältere Definition, wie sie auch den im folgenden geschilderten Meta-Analysen zu Grunde liegt, nimmt die oberen 28 % der Antwortskala als hochbelästigt an. Zusätzlich gibt es eine numerische Skala, die im WHO-Review ebenfalls berücksichtigt wurde.

Expositions-Wirkungskurven zum Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und hoher Belästigung, wie sie sich aus Studien zwischen 1967 und 1993 ergaben, wurden in einer Metaanalyse zusammengefasst (Miedema und Oudshoorn 2001). Die Ergebnisse dieser Analyse bilden auch die Grundlage für die EU (sogenannte EU Kurve 2001), um die Belästigung durch Fluglärm zu beurteilen.

3.1.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (Guski et al. 2017)

Im systematischen Review der WHO wurden 15 Belästigungssurveys (davon 6 aus der HYENA-Studie, Babisch et al. 2009) identifiziert, die zwischen 2001 und 2014 stattfanden. Sie umfassten insgesamt 18 947 Teilnehmer und Fluglärmpegel von 12 bis 78 dB Lden. Beteiligt waren kleine Flughäfen mit 34 regulären Flügen am Tag bis zu großen internationalen Flughäfen mit mehr als 1 200 Flugbewegungen pro Tag. ► **Tabelle A1.1** im Anhang gibt einen Überblick über diese Studien zusammen mit einer von Guski et al. unabhängig von GRADE durchgeführten Qualitätsbewertung.

Für 12 der 15 Studien waren Expositions-Wirkungs-Beziehungen verfügbar, aus denen für jede Studie der Anteil stark belästigter Personen (% HA) bei 7 Fluglärmpegeln zwischen 40 und 75 dB Lden bestimmt werden konnte. Die folgende quadratische Gleichung beschreibt den Zusammenhang für die geschätzten % HA in Abhängigkeit von Lden, wie er sich aus den so bestimmten 84 Datenpunkten ergab:

$$\text{geschätzte \% HA} = -50\,9693 + 10168 \times \text{Lden} + 0.0072 \times \text{Lden}^2.$$

10 % hochbelästigte Personen werden von der WHO (WHO 2018) als Benchmark-Niveau angesehen. Nach obiger Gleichung wird dies bei etwa 45 dB erreicht.

Ferner wurde ein Vergleich zwischen Flughäfen mit (geplanten) starken Veränderungen (High rate change airports) und Bestandsflughäfen (low change rate airports) vorgenommen (► **Abbildung 2**). Es wurde offenkundig, dass die Flughäfen mit (geplanten) starken Veränderungen (Arlanda 2003, Athen 2003, Amsterdam 2002, Ams-

terdam 2003, und Frankfurt 2005) bei gleicher Exposition höhere % HA-Anteile aufweisen als die Bestandsflughäfen (Heathrow 2003, Tegel 2003, Hanoi 2009, Ho Chi Minh 2008 und Da Nang 2011).

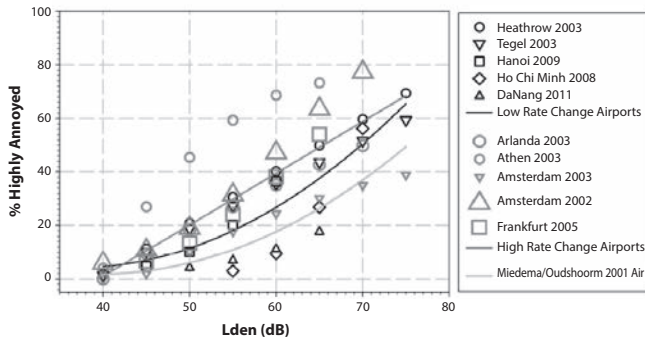


Abbildung 2: Punktwolke und Regressionslinien der Beziehung zwischen Lden und der berechneten % HA für Fluglärmstudien an 5 „high rate change airports“ (obere Kurve) und 5 „low-rate change airports“ (mittlere Kurve), zusammen mit der Expositions-Wirkungskurve von Miedema und Oudshoorn (untere Kurve) (Quelle: Guski et al. 2017, Fig. 3)

Betrachtet man die 10 Flughäfen, für die Aussagen zum Zusammenhang zwischen dem % HA-Anstieg in Abhängigkeit vom Lden Anstieg auf Grund von Beobachtungen zwischen 50 und 60 dB möglich sind (► **Abbildung 3**), dann ergibt sich für alle 10 Flughäfen ein positiver Zusammenhang, und in der Meta-Analyse ergibt sich ein hochsignifikantes OR von 3,4 (95 % KI 2,4–4,8) für diesen Anstieg um 10 dB. Für die 4 Flughäfen, für die eine logistische Regression veröffentlicht war, ergab sich sogar ein OR von 4,8 (95 % KI 2,3–10,0).

Zusammengefasst wurde in Guski et al. (2017) festgehalten, dass die Evidenz für eine Expositions-Wirkungsbeziehung

zwischen dem Fluglärmpegel und dem Anteil stark belästigter Personen (% HA) moderat ist. Zwar galten in den WHO-Reviews einzig für den Wirkungsbereich „Belästigung“ Querschnittsstudien als von hoher Ausgangsevidenz, diese wurde wegen der starken Heterogenität des Effektes zwischen den einzelnen Studien aber herabgestuft. Bei anderen Arten der Auswertung (► **Abbildung 3**) wurde wegen der deutlichen Expositions-Wirkungsbeziehung nach Guski allerdings sogar eine hohe Evidenz erreicht.

3.1.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015 (Penzel et al. 2017))

Weil die Auswertung der NORAH-Studie in Hinblick auf die Belästigung (NORAH-Endbericht Belästigung; Schreckenberget al. 2015) im systematischen Review der WHO (Guski et al. 2017) noch nicht berücksichtigt wurde, soll diese hier ausführlicher dargestellt werden.

Die NORAH-Belästigungs-Studie wurde im Zeitraum von 2011 bis 2013 in der Rhein-Main Region am Flughafen Frankfurt (FRA) durchgeführt sowie in Teilen auch vergleichend an 3 anderen deutschen Flughäfen (Berlin, Stuttgart, Köln). Ziel war die Erstellung bzw. Aktualisierung von Expositions-Wirkungs-Beziehungen zwischen adressgenau berechneten Parametern der chronischen akustischen Belastung durch Geräusche vom Straßen-, Schienen- und Luftverkehr und Antworten von betroffenen Anwohnenden in Befragungen hinsichtlich Lärmbelastigung, erlebten Störungen und Lebensqualität.

Die Studie umfasste eine Panelbefragung von Anwohnenden im Rhein-Main-Gebiet im Jahr 2011 vor Inbetriebnahme der Landebahn Nordwest am Flughafen Frankfurt im

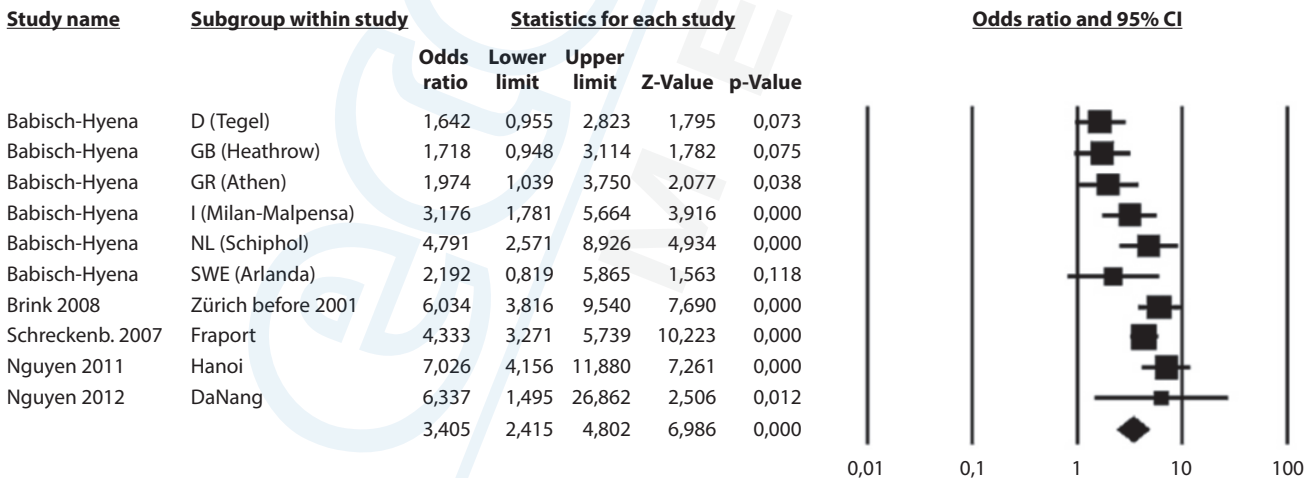


Abbildung 3: ORs und 95 % Konfidenzintervalle für OR in Bezug auf einen Anstieg der % HA bei einem Anstieg des Fluglärms um 10 dB (von 50 auf 60 dB Lden) Der rechte Teil der Abbildung enthält einen Forest Plot der ORs und der Konfidenzintervalle. (Quelle: Guski et al. 2017, Fig. 5)

Oktober 2011 sowie wiederholt in den Jahren 2012 und 2013. Im Rhein-Main-Gebiet betrug die Zahl der Untersuchungsteilnehmenden 18 757, die teils mehrfach befragt wurden, an den übrigen Vergleichsflughäfen insgesamt 10 482 Personen.

Im Jahr 2012 nach der Eröffnung der Landebahn Nord-West lag der Anteil der hoch durch Fluglärm belästigten Personen (% HA; highly annoyed) am Flughafen Frankfurt je nach Höhe der Dauerschallpegel um 2 bis 5 % höher als 2011. Die Fluglärmbelästigung in 2013 lag zwischen der von 2011 und 2012. Zu den Veränderungen zwischen den Jahren im Grad der Fluglärmbelästigung bzw. dem Anteil hoch belästigter Personen bei gleichen Dauerschallpegeln trugen vor allem das Lärmbewältigungsvermögen und die Erwartungen zu den künftigen Auswirkungen des Flugbetriebs bei. Personen mit einer kritischen Einstellung waren bei gleicher Lärmexposition stärker belästigt als Personen mit einer neutralen Einstellung.

Der % HA-Anteil ebenso wie die durchschnittliche Fluglärmbelästigung war am Flughafen Frankfurt in allen untersuchten Jahren 2011 bis 2013 höher als an den Vergleichsflughäfen. Im Vergleich der Quellenarten zeigte sich, dass die Luftverkehrsgeräuschbelastung bei gleichem Dauerschallpegel mit einer höheren Lärmbelästigung assoziiert war als die Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschexposition.

In ► **Tabelle 2** sind Prozentanteile hoch belästigter Personen angegeben, wie sie nach der EU-Kurve 2001 (Miedema und Oudshoorn 2001), nach dem WHO-Review von 2017 (Guski et al. 2017) und nach den Beobachtungen aus NORAH (Schreckenberget al. 2015) erwartet werden.

Tabelle 2: Prozentanteil von Personen, die bei bestimmten 24-Stunden-Dauerschallpegeln (außen) von Verkehrsgeräuschen hoch belästigt sind; Modellrechnungen nach EU-Kurve 2001 und nach WHO-Review von 2017 im Vergleich zu den Modellergebnissen von NORAH

		50 dB(A)	55 dB(A)	60 dB(A)
Luft	EU-Kurve 2001*	8 %	15 %	23 %
	WHO 2017 Guski	18 %	27 %	36 %
	Frankfurt FRA 2011**	55 %	76 %	89 %
	Berlin BER 2012**	41 %	60 %	75 %
	Köln CGN 2013**	50 %	66 %	79 %
	Stuttgart STR 2013**	43 %	70 %	89 %

		50 dB(A)	55 dB(A)	60 dB(A)
Straße	EU-Kurve 2001*	5 %	9 %	14 %
	Rhein-Main 2012**	9 %	12 %	18 %
Schiene	EU-Kurve 2001*	3 %	6 %	10 %
	Rhein-Main 2012**	6 %	10 %	16 %

* In der EU-Kurve 2001 sind Werte für Tagesmittel aus Miedema et al. (Miedema und Oudshoorn 2001) berechnet, unter Berücksichtigung folgender Umrechnung zwischen Lden und Tagesmittel: bei Luft und Straße liegt der Lden um 3,3 dB über dem Tagesmittel, bei Schiene um 6,8 dB darüber (Berechnung aus tages-spezifischen Mitteln in Frankfurt)

**Werte aus den veröffentlichten Modellkurven entnommen.

3.1.3 Neuere Studien 2015-18: Bewertung Team Charité

Es lagen einige neuere (ab 2015 erschienene) Studien über den Zusammenhang zwischen Belästigung und Fluglärm vor (► **Anhang Tabelle A1.2**) Bei den meisten Publikationen handelte es sich allerdings um vertiefte Analysen der NORAH-Daten.

In der Arbeit von Wothge et al. (2017) wurden die Anteile der hoch belästigten Personen für die 3 Quellenarten Luft, Straße und Schiene bei vergleichbaren Pegeln analysiert. Dabei bestätigte sich die schon in früheren Studien gefundene Tatsache, dass die Rate von Hochbelästigten durch Luftverkehrslärm deutlich größer war als durch Straßen- oder Schienenverkehrslärm. Insgesamt zeigte sich, dass die Gesamtlärmbelästigung im Wesentlichen durch die Dauerschallpegel der lästigsten Quellenart (Fluglärm) bestimmt wurde und die zweite Verkehrslärmquellenart auch dann kaum einen Einfluss zeigte, wenn sie einen dominierenden Anteil am Gesamt-Mittelungspegel hatte. Bei den nicht-akustischen Faktoren für die Gesamtlärmbelästigungsurteile spielten insbesondere die Lärmempfindlichkeit und die Bewertung des Luftverkehrs die wichtigste Rolle.

Im Rahmen der NORAH-Schlafstudie wurde auch die Belästigung durch fluglärmbedingte Schlafstörungen erfasst (Quehl et al. 2017). Am Flughafen Frankfurt nahmen 187 Personen mit normalem Hörvermögen im Zeitraum 2011–2013 teil. Als Expositionsparameter wurden verwendet: (1) der nächtliche Schallpegel und (2) die Zahl der nächtlichen Überflüge. Ferner wurden die Daten mit entsprechenden Daten der STRAIN-Schlafstudie am Flughafen Köln-Bonn (2001/2002) verglichen. Es wurde ein statistisch signifikanter Anstieg des Anteils belästigter Personen sowohl mit der Anzahl der Überflüge als auch mit zunehmendem Schallpegel gefunden. Die Feldstudie bestätigt die Bedeutung beider akustischer Parameter für die Kurzzeit-Belästigung durch nächtlichen Fluglärm. Darüber hinaus war die Belästigungswahrscheinlichkeit in

der NORAH-Studie bei gleichen Lärmpegeln signifikant höher als in der STRAIN-Studie, was die Bedeutung von Veränderungen des Flugbetriebes für die Belästigungswirkung unterstreicht.

Erwähnt werden sollte auch die Feldstudie von Bartels et al. (2015). Diese untersuchte den Einfluss akustischer und nichtakustischer Faktoren auf die Belästigung von Fluglärm am Flughafen Köln-Bonn im Jahr 2011 (COSMA-Studie). Akustische Faktoren spielten nur eine kleine Rolle (13,7 % erklärte Varianz), wobei allerdings die Varianz der Lärmpegel sehr gering war. Die Zahl der Überflüge war ein besserer Prädiktor als Äquivalenzpegel oder Maximalpegel. Nichtakustische Faktoren spielten demgegenüber eine größere Rolle (27,6 % erklärte Varianz), wenn individualisierte Lärmmasse, situative und persönliche Variablen einbezogen wurden. Der Einfluss der Tageszeit war vergleichsweise klein, wichtiger war die Störung des Radiohörens und Fernsehens. Ferner spielten die Lärmempfindlichkeit und die Schallisolation des Hauses eine Rolle.

3.1.4 Gesamtbewertung Fluglärm und Belästigung

Die Zunahme der subjektiven Belästigung durch Fluglärm bei gleichen Dauerschallpegeln ist ein herausragendes Ergebnis der Fluglärmbelästigungsforschung der letzten Jahrzehnte. Mögliche Ursachen könnten die folgenden sein:

- Die neueren Untersuchungen fanden meist an Flughäfen statt, die gerade Änderungen im Ausbau erwarten. An solchen Flughäfen kommt es im Allgemeinen zu einer Zunahme der Belästigungsangaben. Dies kann die Befunde allerdings nur teilweise erklären, denn die Prävalenzen in Frankfurt liegen bei NORAH zwar über denen des Bestandsflughafens (ohne zu erwartende Änderungen) Stuttgart, dort aber noch deutlich über den nach der EU-Kurve von 2001 oder nach dem Review der WHO von 2017 erwarteten Werten.
- Die Fluglärmcharakteristik hat sich verändert, insbesondere die Relation zwischen Anzahl, Ereignis- und Dauerschallpegeln (► **Abbildung 1**). Die Studie von Bartels et al. (2015) zeigte, dass die Berücksichtigung von Lärmmaßen wie die Zahl der Überflüge und individuelle Faktoren die Vorhersage der Kurzzeit-Belästigung im Vergleich zu Äquivalenz-Messwerten verbessern kann. Ob die Zunahme der Belästigungsreaktionen in den letzten Jahren durch eine gleichzeitige Berücksichtigung weiterer Fluglärmcharakteristiken (über den Dauerschallpegel hinaus) erklärt werden könnte, ist noch nicht abschließend untersucht.

Die WHO (WHO 2018) stützt ihren Vorschlag für einen Richtwert von 45 dB Lden im Wesentlichen auf die Ergebnisse des Reviews von Guski et al. zur Belästigungsforschung. Die Methodik dieses Reviews wurde von Gjestland (Gjestland 2018) allerdings kritisch bewertet. Hauptkritikpunkt war, dass von den 12 für das WHO-Review ausge-

wählten Studien 6 aus der HYENA Studie stammten, bei der im Gegensatz zu den eigentlich definierten Auswahlkriterien nur Probanden aus der speziell lärmempfindlichen Gruppe ab 45 Jahre befragt wurden und leicht abweichende Belästigungsfragen gestellt wurden. Von diesen 6 hatten wiederum 2 außergewöhnlich hohe Belästigungswerte. Sie wurden von Babisch et al. (2009), dem Autor der Originalstudie, nicht in die Analyse einbezogen. Gjestland führte eine alternative Meta-Analyse mit 18 Arbeiten aus demselben Zeitraum wie die WHO-Metaanalyse durch, welche die HYENA-Daten nicht enthielt. Nach dieser Metaanalyse würden 10 % Hochbelästigte erst bei einem Lden von 53 dB auftreten. Der Unterschied von 8 dB im Vergleich zum vorgeschlagenen Richtwert aus der Analyse von Guski et al. ist beachtlich. In ihrer Erwiderung (Guski et al. 2019) auf die Kritik von Gjestland begründen die Autoren ihre Entscheidung für den Einschluss und Ausschluss von Studien in ihrem systematischen Review. Sie demonstrieren, dass die übliche Praxis, die Studien nach Studienumfang zu gewichten, nicht zu unerwünschten Nebeneffekten führt. Insgesamt kommen sie zu der Einschätzung, dass keine spezifischen Fehler oder Ungenauigkeiten in der Analyse der vorhandenen Evidenz und keine falschen Schlussfolgerungen vorliegen. Der WHO-Richtwert sei somit nicht un gerechtfertigt niedrig.

Das komplexe und dynamische Beziehungsgeflecht zwischen akustischen und nicht-akustischen Faktoren wie z. B. die Einstellung zur Lärmquelle, konnte bislang nicht ausreichend geklärt werden, weil es an ganzheitlichen Ansätzen mangelt, die außer der einseitigen Wirkung von Exposition auf Belästigung weitere Faktoren und deren Interaktionen betrachten. Aus der NORAH-Studie im Umfeld des Frankfurter Flughafens ließ sich hier ein bedeutender Einfluss nicht-akustischer Faktoren wie wahrgenommene Kontrolle, Vertrauen gegenüber Autoritäten und die Einstellung zum Luftverkehr insgesamt ablesen. Es gibt einen gesicherten Zusammenhang zwischen Belastung durch Lärm und Belästigung, Einfache Formeln, wie sie z.B. im Review von Guski vorgestellt wurden, sollen es ermöglichen, das absolute Ausmaß der Belästigungsreaktion allein aus Kenntnis der mittleren Lärmbelastung abzuschätzen. Dies erscheint uns in Unkenntnis der bedeutenden nicht akustischen Faktoren kaum möglich.

3.2 Fluglärm und Herz-Kreislauf-Erkrankungen

Eine große Anzahl von Studien befasste sich mit Wirkungen von Fluglärm auf das Herz-Kreislauf-System. Unter der Annahme, dass Verkehrslärm allgemein eine Stressreaktion hervorruft, kann man mit Auswirkungen auf das vegetative System rechnen und Wirkungen auf Blutdruck und Herzfrequenz erwarten. Infolgedessen kann Verkehrslärm eine Belastung des Herz-Kreislauf-Systems darstellen.

Zunächst sollen die Ischämische Herzkrankheit (die den Herzinfarkt umfasst), der Schlaganfall (Stroke) und die

Herzinsuffizienz (Heart failure) in ihrem möglichen Zusammenhang mit Fluglärm behandelt werden. Zu Herzinsuffizienz liegt keine Aussage der WHO vor.

3.2.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche für Ischämische Herzkrankheit und Schlaganfall durch die WHO (van Kempen et al. 2017, 2018)

Die Aussagen der WHO zur Ischämischen Herzkrankheit (IHD) und zum Schlaganfall (Stroke) werden zusammengefasst dargestellt. Wie für alle Wirkungsgrößen in den Reviews der WHO (Ausnahme Belästigung) wurden auch für diese Größen nur Kohortenstudien als von hoher Ausgangsevidenz betrachtet. Die übrigen verwendeten GRADE-Kriterien zur Beurteilung der Evidenz sind im Anhang zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen (A2.1) detailliert erläutert.

3.2.1.1 Ischämische Herzkrankheit (IHD)

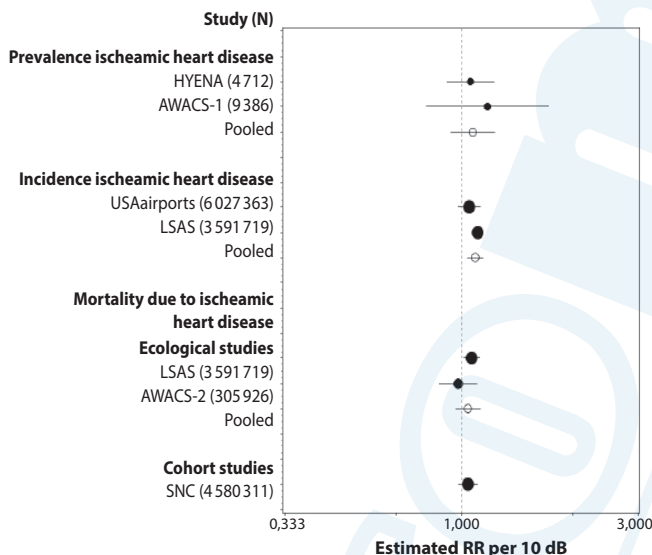


Abbildung 4: Assoziation zwischen der Exposition gegenüber Fluglärm (Lden) und Ischämischer Herzerkrankung. Die gepunktete vertikale Linie entspricht keinem Effekt des Fluglärms. Die gefüllten Kreise entsprechen dem geschätzten Relativen Risiko (RR) pro 10 dB und dem 95 % Konfidenzintervall. Die offenen Kreise repräsentieren die gepoolten random effects-Schätzer und das 95 % Konfidenzintervall (van Kempen et al. 2017, Fig. 5.1)

Die Studien, die den Einfluss von Fluglärm untersucht haben, fanden Hinweise für ein erhöhtes Risiko für die Ischämische Herzerkrankung. Die Exposition gegenüber Fluglärm war mit der Prävalenz, der Inzidenz und der Mortalität von IHD assoziiert (► **Abbildung 4**). Nur die Assoziation zwischen Fluglärm und der Inzidenz von IHD war statistisch signifikant. Das geschätzte Relative Risiko betrug hierfür RR = 1.09 (95 % CI: 1.04–1.15) pro 10 dB (Lden) bei gemeinsamer Auswertung von 2 Studien (Correia et al.

2013, Hansell et al. 2013) mit insgesamt 9619082 Teilnehmern, bei denen 158977 inzidente IHD-Erkrankungen auftraten. Da die meisten Studien ein ökologisches oder Querschnitt-Design aufwiesen (► **Tabellen A2.1, A2.2 im Anhang**), wurde die Qualität der Evidenz meist als „sehr niedrig“ bewertet. Nach den von der WHO bestimmten Regeln (WHO 2018) können sie daher für die Festlegung von Richtwerten nicht herangezogen werden. Diese Ergebnisse sind allerdings konsistent mit neueren Längsschnittstudien, die einen positiven Zusammenhang zwischen Fluglärm und IHD-Mortalität berichteten (Héritier et al. 2017, Seidler und Wagner 2015).

3.2.1.2 Schlaganfall (stroke)

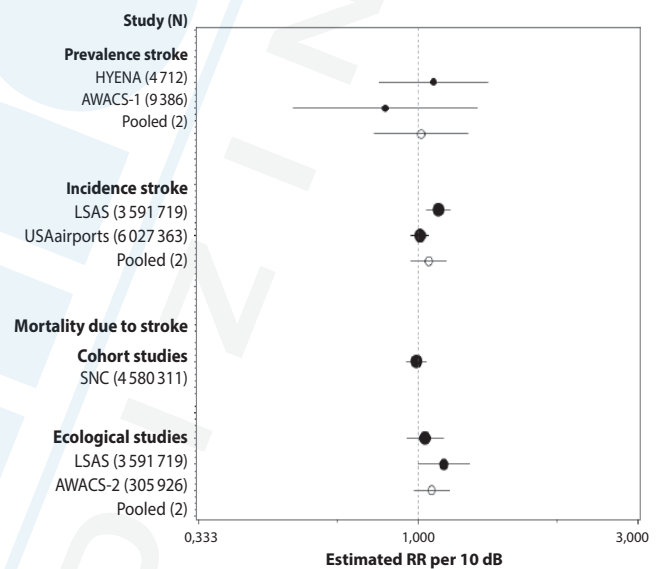


Abbildung 5: Assoziation zwischen der Exposition gegenüber Fluglärm (Lden) und Schlaganfall. Die gepunktete vertikale Linie entspricht keinem Effekt des Fluglärms. Die schwarzen Kreise entsprechen dem geschätzten Relativen Risiko (RR) pro 10 dB und dem 95 % Konfidenzintervall. Die offenen Kreise repräsentieren die gepoolten random effects-Schätzer und das 95 % Konfidenzintervall (van Kempen et al. 2017, Fig. 6.1)

Basierend auf den Ergebnissen von ökologischen und Querschnitt-Studien war ein Anstieg von Fluglärm mit einem Anstieg der Prävalenz und Inzidenz von Schlaganfall assoziiert (► **Abbildung 5**). Keine dieser Assoziationen war statistisch signifikant (► **Tabelle A2.3, A2.4 im Anhang**). Die Ergebnisse, die für die Prävalenz und Inzidenz von Schlaganfall gefunden wurden, wurden unterstützt durch ökologische Studien (Hansell et al. 2013, van Poll et al. 2014) zur Assoziation zwischen Verkehrslärm und der Mortalität durch Schlaganfall. In der analysierten Kohortenstudie wurde kein Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und der Mortalität durch Schlaganfall beobachtet. Die Evidenz aus diesen Studien wurde erneut als sehr gering bewertet. Die Ergebnisse sind allerdings konsistent mit den Ergebnissen neuerer Längsschnittstudien, die ebenfalls keine klaren

Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Fluglärm und der Schlaganfall-Mortalität fanden (Huss et al. 2010, Seidler & Wagner 2015, van Kempen et al. 2018).

3.2.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Studien zum Herzinfarkt und zum Schlaganfall, die vom Team Charité bewertet wurden, sind im Anhang dargestellt (► **Tabelle A2.5**). Hier sollen 3 besonders wichtige Studien, die auch in die Bewertung durch die WHO eingeflossen sind, ausführlicher besprochen werden:

Die Kohortenstudie aus der Schweiz (Huss et al. 2010) benutzte Daten aus der nationalen Datenbank zum Gesundheitszustand der Schweizer (4,6 Millionen Personen). Von diesen Personen waren im Zeitraum zwischen 2000 und 2005 insgesamt 15 532 an einem Herzinfarkt verstorben. Die Fluglärmexposition wurde anhand von Modelldaten für alle Schweizer Flughäfen quantifiziert und in fünf Kategorien eingeteilt. Beim Vergleich der am stärksten gegenüber Fluglärm belasteten Gruppe ($> = 60$ dB) mit der am geringsten exponierten Gruppe (< 40 dB) wurde eine um 30 % erhöhte (adjustiert, nicht signifikant) Herzinfarkt-mortalität gefunden. Für die Gesamtsterblichkeit und die Herz-Kreislauf-Mortalität sowie andere Todesursachen war der Zusammenhang noch weniger deutlich.

Eine Analyse aus den USA (Correia et al. 2013) verglich Daten von Krankenhausaufnahmen (Medicare mit 6 Millionen Versicherten über 65 und 400 000 mit Herz-Kreislauf-erkrankungen) mit Daten zum Fluglärm (Schätzungen aus 2 218 Postleitzahlbezirken) um 89 Flughäfen für das Jahr 2009. Wenn man – gemittelt über alle Flughäfen – nur die 10 % mit der höchsten Fluglärmexposition verwendet, ergab sich für einen Anstieg um 10 dB eine statistisch signifikante Zunahme der Krankenhausaufnahmen wegen Herz-Kreislauf-Erkrankungen um 3,5 % (CI 0,2 %–7,0 %). Bei diesem Wert wurden die individuellen demographischen Angaben (Alter, Geschlecht, Ethnizität) berücksichtigt. Bei zusätzlicher Kontrolle für aggregierte Confounder (prozentualer Anteil der Hispanics in der Wohngegend, Haushaltseinkommen) beziehungsweise für Luftverschmutzung war der Zusammenhang nur noch grenzwertig statistisch signifikant.

In einer Studie um den Flughafen London-Heathrow mit 3,6 Millionen Anwohnern untersuchten Hansell et al. (2013) den Zusammenhang zwischen Krankenhausaufnahmen wegen Schlaganfall, koronarer Herzkrankheit (ca. 200 000 zwischen 2001 und 2005) und Fluglärm nach kodierter Meldeadresse. Zu soziodemographischen Confoundern (Alter, Geschlecht, Ethnizität, Ernährung, Fettleibigkeit, Sport und Rauchen) lagen kleinräumig aggregierte Daten auf der Ebene von Postleitzahlen vor. Die Krankenhausaufnahmen zeigten einen statistisch signifikanten line-

aren Trend für Taglärm und für Nachtlärm. Personen in der gegenüber Taglärm am höchsten belasteten Gruppe (LAeq, 16h > 63 dB) hatten im Vergleich zu Personen in der am geringsten exponierten Gruppe (LAeq, 16h < 51 dB) ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko (um 14 % (CI 8 % bis 20 %) für alle Herz-Kreislauf-Erkrankungen) Im Gegensatz zur Studie von Correia et al. (2013) waren die Daten hier viel kleinräumiger verfügbar: Die Fluglärm-daten lagen auf einem 10 m²-Raster vor, während die Krankenhausaufnahmen im kleinräumigen britischen Postleitzahlssystem vorhanden waren (dies umfasst im Mittel 23 Haushalte pro Postleitzahlbezirk). Damit war das Verzerrungsrisiko hier vergleichsweise klein.

Die Ergebnisse der NORAH-Studie zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen aus Seidler et al. (2015) werden gemeinsam mit den Folgepublikationen in 2.3 besprochen.

3.2.3 Neuere Studien: Team Charité

Neuere Studien zum Themenbereich Fluglärm und kardiovaskuläre Erkrankungen sind im Anhang in ► **Tabelle A2.6** und teilweise **Tabelle A2.5** zusammengestellt.

In der NORAH Fall-Kontrollstudie (Seidler et al. 2015, Seidler et al. 2016a, Seidler et al. 2016b, Seidler et al. 2018) wurde das Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen (Herzinfarkt, Schlaganfall, Herzinsuffizienz) in Abhängigkeit vom Fluglärm untersucht. Dazu wurden Daten aus dem Rhein/Main-Gebiet von ca. 1 Million Versicherten von 3 großen Krankenkassen herangezogen und mögliche Confounder konnten teilweise personenbezogen berücksichtigt werden. Die Studie umfasste ca. 20 000 Neuerkrankungen an Herzinfarkt (Seidler et al. 2016b); ca. 100 000 Neuerkrankungen an Herzversagen/Hypertensiver Herzerkrankung (Seidler et al. 2016a) und ca. 25 000 Neuerkrankungen an Schlaganfall (Seidler et al. 2018).

- Für tödlich verlaufenden Herzinfarkte wurde ab 60 dB ein signifikant erhöhtes Risiko im Vergleich zur der am niedrigsten belasteten Gruppe (OR = 2,70 95 % CI: 1.08-6.74) gefunden. Für die Gesamtgruppe der Herzinfarkte ergab sich allerdings keine erkennbare Expositions-Wirkungs-Beziehung.
- Für den Schlaganfall wurden weder erhöhte Risikoschätzer noch positive Expositions-Wirkungs-Beziehungen gefunden. Das Schlaganfallrisiko war jedoch signifikant um 7 % erhöht für Personen in der niedrigsten Schallpegelkategorie von < 40 dB, bei denen 6 oder mehr nächtliche Maximalpegel von > 50 dB aufgetreten waren.
- Für die alleinige Diagnose Herzinsuffizienz zeigten sich keine eindeutigen Zusammenhänge zum Fluglärm. Bei der kombinierten Diagnosegruppe Herzinsuffizienz/Hypertensive Herzkrankheit war das Risiko bei der Betrachtung kontinuierlicher Expositionsvariablen statistisch signifikant erhöht (Seidler et al. 2016a, Seidler et al. 2016b).

- In der niedrigsten Schallpegelkategorie von <40 dB waren Personen enthalten, bei denen nächtliche Maximalpegel von >50 dB auftraten und bei denen das Risiko für hypertensive Herzerkrankung erhöht war.

Ergebnisse aus früheren ähnlichen Untersuchungen (Hansell et al. 2013), mit Einschränkung (Greiser & Greiser 2009) wurden damit zum Teil bestätigt (Tabelle A2.5 im Anhang). Eine experimentelle Studie von Schmidt et al. (2015) fand bei Patienten mit vorbestehender koronarer Herzkrankheit (KHK) einen Effekt von eingespielten nächtlichen Überflugereignissen auf die Endothelfunktion, den systolischen Blutdruck und die Schlafqualität.

In der umfangreichen Kohortenstudie von Héritier et al. (2017) zum Zusammenhang von Verkehrslärm mit allen kardiovaskulären Todesfällen der Schweizer Bevölkerung zwischen 2000 und 2008 fanden sich ab 40 dB annähernd lineare und signifikante Assoziationen zwischen dem Dauerschallpegel des Fluglärms und Herzinfarkt, Herzversagen und ischämischen Schlaganfall, wobei die Größenordnung der Effekte gut mit den Ergebnissen früherer Meta-Analysen übereinstimmen. Die Autoren sahen Hinweise, dass kurzzeitige Lärmereignisse einen zusätzlichen Beitrag zu den beobachteten Wirkungen leisten.

In der Studie von Vienneau et al. (2015) zum Health Risk Assessment wurden publizierte Expositions-Wirkungs-Beziehungen für Lärm und weitere Expositionen im Hinblick auf die kardiovaskuläre Mortalität und Morbidität in der Schweiz analysiert. Betrachtet man die Lärmquellen, dann sind sowohl bei den verlorenen Lebensjahren als auch bei den Krankenhaustagen ca. 80 % dem Straßenverkehrslärm und 3–4 % dem Fluglärm zuzuordnen. Tendenziell zeigte die NORAH-Studie ein ähnliches Ergebnis.

3.2.4 Gesamtbewertung

In der Summe aller bewerteten Studien kann festgehalten werden, dass Lärm und insbesondere auch Fluglärm bei höheren Lärmpegeln (ab 60 dB 24 h Dauerschallpegel) eine Belastung des Herz-Kreislauf-Systems darstellen kann.

Auch die NORAH-Studie zu Krankheitsrisiken lieferte Belege dafür, dass das Auftreten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen im Zusammenhang mit erhöhten Verkehrslärm-Expositionen stehen kann. Dies gilt insbesondere für den Herzinfarkt und die Herzinsuffizienz, die bei Dauerschallpegeln über 60 dB vermehrt auftraten. Bemerkenswert ist ferner, dass auch bei niedrigen Dauerschallpegeln unter 40 dB Hinweise auf Gesundheitsrisiken gefunden wurden, wenn gleichzeitig nächtliche Maximalpegel von mehr als 50 dB vorlagen.

Im Review der WHO, welches Studien bis 2015 einschließt, NORAH aber noch nicht umfasst, wurde die Evidenz als

niedrig angesehen und Studien zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Fluglärm wurden für die Richtwertfestsetzung nicht berücksichtigt. Dies erscheint, gerade auch im Hinblick auf die inzwischen neu erschienenen qualitativ guten Arbeiten zu diesem Thema, ergänzungsbedürftig.

3.3 Fluglärm und Blutdruck/Bluthochdruck

Auf dem Wege zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen beobachtet man häufig einen erhöhten Blutdruck. Dieser gilt als ein Hauptrisikofaktor für Schlaganfall, Herzinfarkt, chronisches Nierenversagen und vorzeitigen Abfall kognitiver Leistungen. Der Blutdruck wird normalerweise sehr genau in einem schmalen Bereich durch die Regelung der Blutgefäße und der Pumpleistung des Herzens gesteuert. Neben Risikofaktoren wie Rauchen, Übergewicht oder Bewegungsmangel kann auch Stress zu erhöhtem Blutdruck führen. Dieser bewirkt eine Beschleunigung des Herzschlags, also Erhöhung der Herzfrequenz und dadurch eine Veränderung der Blutgefäße, um Muskeln, Herz und Gehirn in schnelle Reaktionsbereitschaft zu versetzen. Die adäquate körperliche Reaktion auf Stress ist Aktion. Zuviel Stress, Stress zur falschen Zeit oder auch Stress ohne adäquate körperliche Reaktion kann zu einer Überbeanspruchung der aktivierten Körperfunktionen führen. Damit kann sich Stress auch belastend auf die Herz-Kreislauf-Funktionen auswirken.

3.3.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (van Kempen et al. 2017, 2018)

Erwachsene

Im systematischen Review der WHO wurden 12 Studien ausgewählt, die zwischen 2000 und 2014 publiziert wurden. ► **Tabelle A3.1** im Anhang gibt einen Überblick über diese Studien, zusammen mit der individuellen Qualitätsbewertung, die ein Bestandteil der Evidenzbewertung nach GRADE ist.

Eine Zusammenstellung der gefundenen Parameterschätzer gibt ► **Abbildung 6**.

Für die Querschnittstudien ergab sich ein gepoolter Parameterschätzer von 1.05 (95 % CI: 0.95–1.17). Es lag nur eine Kohortenstudie vor (SDPP, Stockholm). Für diese ergab sich ein gepoolter Parameterschätzer von 1.00 (95 % CI 0.77–1.30).

Die Qualität der Evidenz wurde getrennt für die Quer- und Kohortenstudien beurteilt. Die Evidenzbeurteilung ist im Anhang explizit dargestellt (A3.1). Sowohl für die Querschnittstudien wie auch für die Kohortenstudie ergab sich insgesamt eine geringe Evidenz. Bei den Querschnittstudien lag dies vor allem daran, dass diese grundsätzlich als von geringer Evidenz beurteilt wurden. Überdies wurde negativ

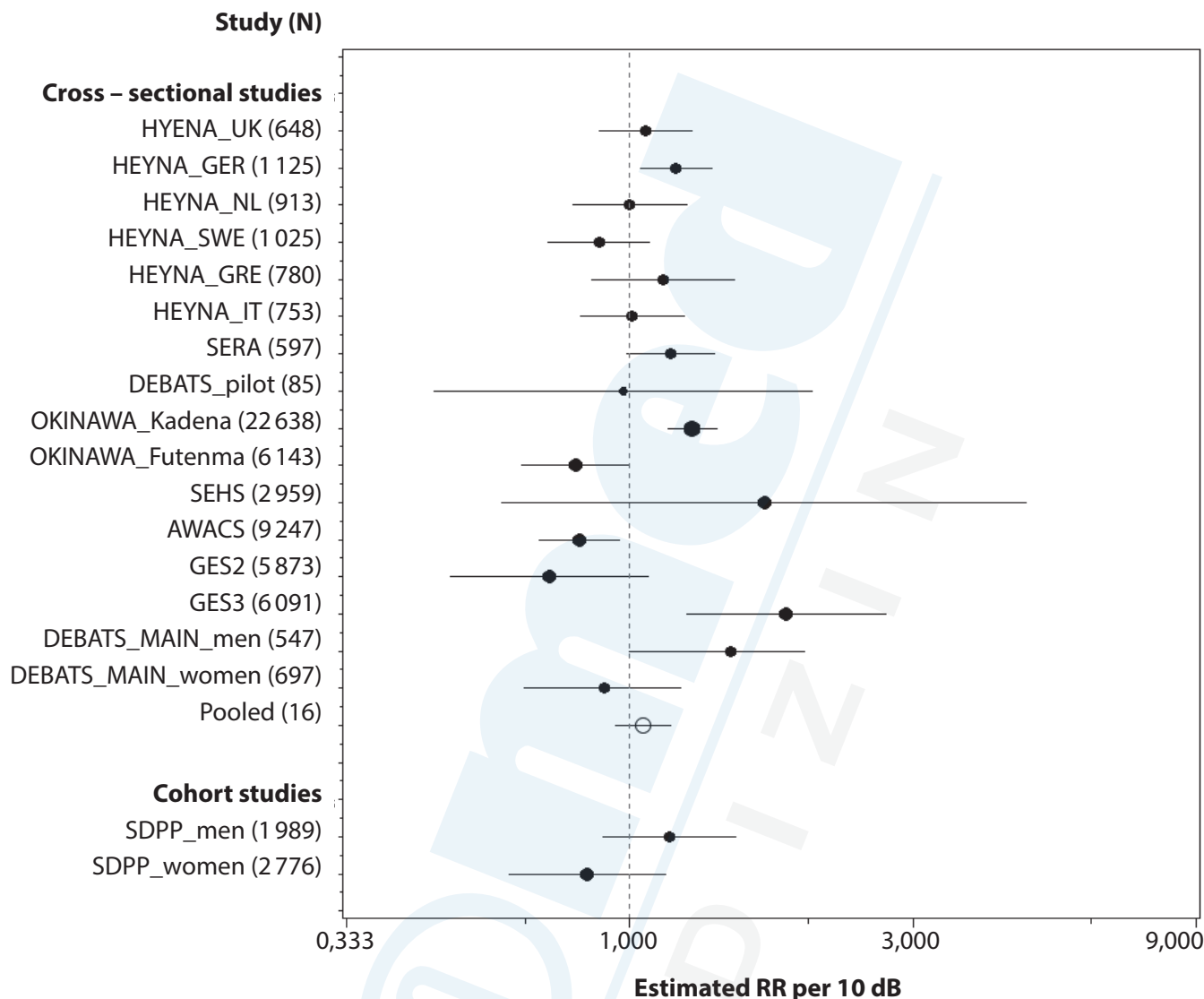


Abbildung 6: Assoziation zwischen Fluglärmbelastung (L_{den} in dB) und Bluthochdruck in Querschnitts- und Kohortenstudien. Die schwarze vertikale Linie entspricht dem Nulleffekt. Die schwarzen Punkte entsprechen dem RR pro 10 dB, diese sind mit ihrem 95 % Konfidenzintervall angegeben. Der weiße Kreis entspricht dem Summenmaß. (Abbildung aus: van Kempen et al, 2017, Seite 62)

beurteilt, dass bei vielen Studien den Studienteilnehmern das Studienziel bekannt war und die Responderate durchweg unter 60 % lag. Bei der Kohortenstudie, die grundsätzlich erst einmal besser bewertet wurde, führte aber der Verlust beim Follow-up von mehr als 20 % zu einer insgesamt geringen Evidenz dieser Studie.

Kinder

Von der WHO wurden 2 Studien identifiziert, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Fluglärm und Blutdruck bei Kindern beschäftigen. Eine Studie wurde im Zusammenhang mit der europäischen RANCH-Studie durchgeführt (van Kempen et al. 2006), eine weitere in Australien (Morrell et al. 2000), diese benutzte allerdings kein Expositionsmaß, das sich in L_{den} umrechnen ließe und die Ergebnisse liegen bis-

her nur als Vortragsmanuskript vor. Eine Zusammenfassung der Charakteristika dieser Studien findet sich in ► **Tabelle A3.2** im Anhang. Die Evidenz aus diesen Studien wurde als sehr gering eingeschätzt, da es sich um Querschnittstudien handelte, die Response kleiner als 60 % war und den Kindern vielleicht die Studienfragestellung bekannt war.

3.3.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Erwachsene

Einige der Studien zum Zusammenhang zwischen Fluglärm und Bluthochdruck bei Erwachsenen, die von der WHO in

die Meta-Analyse einbezogen wurden, bewertete das Team Charité nicht. So wurde die lange vor 2000 veröffentlichte Studie von Knipschild et al. (1977) ebenso wie neuere niederländische Fragebogenstudien, die nur als niederländische Reports bzw. Vortragsveröffentlichungen vorlagen, nicht einbezogen. Zwei Studien, HYENA und SDPP (Stockholm, Schweden) wurden im Gegensatz zu der Bewertung der WHO als von hoher Evidenz bewertet, diese beiden werden daher im Folgenden näher beschrieben:

Die SDPP-Studie aus der Umgebung des Stockholmer Flughafens war die einzige Kohortenstudie zu diesem Thema (Eriksson et al. 2010, 2007). Sie erfasste die Inzidenz von Bluthochdruck (Messung und Fragebogen) nach einer Beobachtungszeit von 10 Jahren in einer Diabetes-Interventionsstudie. Es wurde insbesondere überprüft, ob Effekte in Untergruppen (Geschlecht, Lärmbelastigung) gleich ausgeprägt waren. Es zeigte sich ein statistisch signifikanter Effekt von Fluglärm auf die Entwicklung einer Hypertonie bei Männern, nachdem Probanden, die kurz vor der Blutdruckmessung geraucht hatten (was den Blutdruck kurzfristig erhöht), ausgeschlossen wurden, pro 5 dB war das Risiko um 21 % erhöht, [relatives Risiko = 1,21 (CI 95 % Konfidenzintervall) 1,05–1,39]. Überdies war pro 5 dB das Risiko der belästigten Personen, einen Bluthochdruck zu entwickeln, um 42 % erhöht [relatives Risiko = 1,42 (95 % CI 1,11–1,82) per 5 dB]. Bei Frauen beziehungsweise bei unbelästigten Personen konnte dieser Zusammenhang nicht nachgewiesen werden.

Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projektes HYENA (Hypertension and Exposure to Noise near Airports) wurden die Auswirkungen von Lärm an 6 Flughäfen (Athen, Berlin, Amsterdam, London, Milan, Stockholm) bei insgesamt 4 861 Personen, die mindestens 5 Jahre in der Nähe der Flughäfen wohnten, untersucht (Jarup et al. 2008). Die Messungen des Blutdrucks erfolgten nach dem WHO-Protokoll. Wenn die Exposition mit nächtlichem Fluglärm um 10 dB (etwa die Hälfte der beobachteten Schwankungsbreite zwischen 35 und 55 dB) stieg, war die Chance, einen Bluthochdruck zu haben 14 % höher (95 % CI 1 %–29 %).

Kinder

Die Europäische RANCH-Studie hatte zum primären Ziel, den Einfluss von Fluglärm auf die Kognition von Kindern zu untersuchen. Bei 853 Kindern aus der Umgebung der Flughäfen Schiphol (Niederlande) und Heathrow (UK) konnte auch der Zusammenhang zwischen Fluglärm und Blutdruck analysiert werden (van Kempen et al. 2006). Der Zusammenhang zwischen Blutdruck und Fluglärm (tags an Schule, tags und nachts an der Wohnung) war für die Kinder aus den Niederlanden überwiegend signifikant, für die Kinder aus London jedoch nie. In der gepoolten Stichprobe waren die Zusammenhänge zwischen Lärm in der Wohnumgebung und Blutdruck signifikant (adjustiert: 0.1 mmHg (95 % CI 0.00–0.20) systolischer Blutdruck pro

dB Fluglärm). Die Ergebnisse dieser Studie sind noch nicht schlüssig.

Der Zusammenhang zwischen Bluthochdruck und Fluglärm wird dadurch unterstützt, dass eine Reihe von Studien einen höheren Gebrauch von blutdrucksenkenden Medikamenten in Abhängigkeit von der nächtlichen Fluglärmbelastung fanden (Floud et al. 2011), sowie mit Einschränkung Greiser et al. (2006) (► **Tabelle A3.3 im Anhang**).

3.4 Neuere Studien 2015-18: Team Charité

Eine Übersicht über neuere Studien gibt ► **Tabelle A3.4 im Anhang**.

Eine neuere Studie um Flughäfen in Frankreich zeigte ein fluglärmbedingtes Bluthochdruckrisiko nur bei Männern (Evrard et al. 2017) ähnlich wie die Studie in Stockholm (Eriksson et al. 2007, 2010).

Folgeauswertungen der NORAH-Fall-Kontrollstudie mit Krankenkassendaten (Zeeb et al. 2017) untersuchten die Assoziation zwischen neu diagnostiziertem Bluthochdruck und Verkehrslärm. Sie ergaben für die Gesamtgruppe keine positiven Assoziationen, jedoch in der Untergruppe derer mit der anschließenden Diagnose „hypertensive Herzkrankheit“ (einen Anstieg um 13,9 % pro 10 dB für den Fluglärm). Die Autoren schlossen daraus, dass die Ergebnisse Lärmeinflüsse nur bei klinisch schwereren Bluthochdruckdiagnosen unterstützten. Da individuelle weitere Größen wie das Rauchverhalten nicht einbezogen werden konnten, bleibt die Möglichkeit einer Verzerrung offen.

In einer umfangreichen Kohortenstudie zum Zusammenhang von Verkehrslärm mit allen kardiovaskulären Todesfällen der Schweizer Bevölkerung zwischen 2000 und 2008 fanden sich für den Dauerschallpegel des Fluglärms keine signifikanten Assoziationen für Tod durch Bluthochdruck (Héritier et al. 2017). Auch hier bleibt die Möglichkeit einer Verzerrung offen, da individuelle Confounder nicht einbezogen werden konnten.

Die NORAH-Studie zum Blutdruck schloss nur Probanden ohne bekannten Bluthochdruck ein (Eikmann et al. 2015). Der beobachtete Zusammenhang zwischen systolischem Blutdruck bei blutdruckgesunden Probanden und nächtlichem Fluglärm war mit 1,2 mmHg pro 10 dB(A) Expositionsanstieg nachts gering und statistisch nicht signifikant. Das in NORAH gefundene kleine Ausmaß des Effektes war ähnlich groß wie – zum Teil statistisch signifikante – Beobachtungen aus den wenigen anderen Studien, die den Zusammenhang zwischen gemessenem Blutdruck und Lärm untersuchten (Haralabidis et al. 2008).

Eine erneute Untersuchung derjenigen Athener Bürger im Jahre 2013, die sich schon 2005 an der HYENA-Studie be-

teiligt hatten, (Dimakopoulou et al. 2017) zeigte, dass die Inzidenz eines Bluthochdruckes bei höherer nächtlicher Belastung mit Fluglärm deutlich erhöht war.

Im Rahmen der Schweizer SAPALDIA-Studie wurde der Zusammenhang zwischen Arterienverhärtung und Lärmbelastung untersucht (Foraster et al. 2017). Dieses Maß ist mit Bluthochdruck verknüpft. Es zeigte sich eine Assoziation mit nächtlichem stark variierendem Eisenbahnlärm. Mit dem Fluglärm zeigte sich kein Zusammenhang, allerdings war die SAPALDIA-Studie nicht als Fluglärmstudie geplant, die ganz überwiegende Mehrzahl der Probanden ist entweder gar nicht oder sehr gering mit Fluglärm belastet.

3.5 Gesamtbewertung Fluglärm und Blutdruck/ Bluthochdruck

Die Evidenz der Studien zu Bluthochdruck und Fluglärm wurde von der WHO wegen der Möglichkeiten der Verzerrung der Ergebnisse der Einzelstudien als gering bis sehr gering eingestuft. Sie wurden daher in die Richtlinienentwicklung nicht mit einbezogen. Die WHO-Gutachter, die zuständig für diesen Wirkungsbereich waren, hatten allerdings im Gegensatz zu den Gutachtern der anderen Wirkungsbereiche die strengsten und zum Teil irrelevante Kriterien für die Evidenzbeurteilung benutzt: Querschnittstudien, Studien mit einer Response kleiner als 60 % (kleiner als 80 % bei Follow-up-Studien) galten grundsätzlich als von geringer Evidenz. Ebenso führte die Kenntnis des Studienziels auf Seiten des Teilnehmers zu einer Abwertung, auch wenn Blutdruck gemessen wurde und mehr als zwei Expositionsstufen untersucht wurden. Dem Team Charité erscheint es allerdings kaum möglich, dass Probanden, selbst wenn sie wissen, dass sie an einer Fluglärmstudie teilnehmen, ihren gemessenen Blutdruck so beeinflussen können, dass er in Zusammenhang mit der genauen individuellen (den Probanden unbekannt) Fluglärmbelastung steht. Wichtige Ergebnisse, wie die deutlichere Rolle des Nachtlärms gegenüber dem Taglärm (HYENA) oder der deutlichere Effekt bei Männern gegenüber Frauen (SDPP, Stockholm und 6 Städte-Studie, Frankreich) ebenso wie aufschlussreiche Erkenntnisse aus Studien nach 2015 (HYENA, Athen follow-up) fanden in der Bewertung der WHO keine Berücksichtigung.

Die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Fluglärm und Herz-Kreislaufkrankungen und insbesondere Bluthochdruck ist nach Ansicht des Teams Charité höher zu bewerten als von den WHO-Begutachtern vorgeschlagen. Die genaue Größe des Effektes ist noch unklar. Einige der neueren Studien zeigen, dass der Effekt eher klein ausgeprägt ist.

4 Fluglärm und metabolische Effekte

Metabolische Effekte des Fluglärms, wie Effekte auf Diabetes und Fettleibigkeit, wurden bisher erst in wenigen Studien untersucht. Stress könnte zu solchen Effekten beitragen.

Dieser kann den Cortisol-Spiegel erhöhen, die Insulin-Sekretion senken und die Insulinempfindlichkeit herabsetzen. Außerdem könnten Schlafstörungen durch Modulationen des Appetitverhaltens und eine generelle Dysregulation von metabolischen und endokrinen Funktionen dazu beitragen (van Kempen et al. 2017).

4.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (van Kempen et al. 2017)

Für die systematische Literaturanalyse der WHO lag nur eine Studie vor (► Tabelle A6.1/6.2). Beobachtungen um den Flughafen Stockholm zeigen eine Assoziation der Verkehrslärmexpositionen mit dem Taillenumfang, nicht jedoch mit dem BMI (Body-Mass Index) oder dem neuen Auftreten von Diabetes (Eriksson et al. 2014, Pyko et al. 2015). Pro 10 dB mittleren Fluglärms während der Beobachtungszeit von 10 Jahren war die Zunahme des Taillenumfangs 3,46 cm höher. Dies wurde in der systematischen Übersicht der WHO (van Kempen et al. 2017) als ein sehr starker Effekt eingeschätzt und dieser Teil der Kohortenstudie als von hoher Evidenz angesehen. Für Diabetes wurde die Evidenz moderat eingeschätzt. Hier ergab sich ein relativ unpräziser Effektschätzer für das relative Risiko, einen Diabetes neu zu entwickeln von 1.01 (95 % CI: 0.78–1.31) per 10 dB mittlerem Fluglärm.

4.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Die systematische Literaturrecherche der Charité identifizierte die gleiche Studie wie das Review der WHO. Diese wurde bereits unter A6.1 beschrieben. Im Gegensatz zu van Kempen et al. beurteilte das Team Charité den starken Effekt des Fluglärms auf die Fettleibigkeit jedoch eher kritisch. Dieser sollte in weiteren Studien bestätigt werden, bevor von einer hohen Evidenz für einen solchen Effekt ausgegangen werden kann.

4.3 Neuere Studien 2015–18: Team Charité

In der Schweizer SAPALDIA-Studie (8 Orte, 60 % der Teilnehmer <= 30 dB(A) Fluglärm) fand sich eine positive Assoziation zwischen Verkehrslärm und dem Neuaufreten von Diabetes. Das Risiko für die Entstehung von Diabetes war 1.86 (95 % CI: 0.96–3.59)-fach höher, wenn die Belastung mit Fluglärm (Lden) um 12 dB höher lag (Eze et al. 2017a). Auch dieses Maß ist wegen der geringen Anzahl von Fällen in der belasteten Gruppe sehr unpräzise (sehr weiter Konfidenzbereich). Bei Diabetikern war weiterhin die Veränderung des HbA1c-Wertes signifikant mit dem Fluglärm assoziiert (0.34 % pro 10 dB(A); Eze et al. 2017b). Für eine Einschätzung durch die WHO lag diese letztere Studie noch nicht vor.

Die starke Assoziation zwischen Taillenumfang und Fluglärm, wie sie sich in der schwedischen Studie gezeigt hatte, konnte in SAPALDIA nicht bestätigt werden (Foraster & Eze 2018). Allerdings ergaben sich Zusammenhänge zwischen Markern der Adipositas und dem Straßenverkehrslärm. In einer experimentellen Studie konnte das SAPALDIA-Team eine Störung der Glukoseregulation durch nächtlichen Lärm nachweisen (Thiesse 2018). Diese Störung war jedoch nicht durch eine Störung der Schlafqualität vermittelt, wie ursprünglich vermutet worden war.

4.4 Gesamtbewertung Fluglärm und metabolische Effekte

Die beiden bisher vorliegenden Studien zu Fluglärm und metabolischen Effekten geben erste Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang. Diese Zusammenhänge müssen in weiteren Studien bestätigt werden, ehe sie als gesichert angesehen werden können.

5 Fluglärm und Schlaf

Der gesunde, ungestörte Schlaf verläuft in wiederkehrenden rhythmischen Zyklen (bei rund acht Stunden ungestörter Schlafzeit etwa 4 bis 5) vom Leichtschlaf bis zum REM-Schlaf. Der Tiefschlaf dominiert in der ersten Nachthälfte und nimmt über die zweite Nachthälfte ab, während es beim REM-Schlaf umgekehrt ist. Dementsprechend wird der Schlaf mit der Zunahme der bereits verbrachten Schlafzeit flacher und damit die Wahrscheinlichkeit, etwa durch äußere Geräusche geweckt zu werden, größer. Einzelne kurze Aufwachreaktionen erfolgen auch beim gesunden Schlaf. Der nicht erholsame Schlaf beziehungsweise Schlafstörungen werden mit Einschränkungen der Gesundheit, der geistigen und körperlichen Leistungsfähigkeit und der Teilhabe am beruflichen und sozialen Leben verbunden (Leitlinie S3 der deutschen Gesellschaft für Schlafforschung und Schlafmedizin DGSM). Umweltbedingte Schlafstörungen sind nach ICSD 3 (2014) Unterbrechungen des Schlafes und seiner restaurativen Wirkung aufgrund externer Störreize wie etwa umweltbedingten Lärms jeglicher Art.

5.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (Basner und McGuire 2018)

Die systematische Literaturrecherche von Basner & McGuire (Basner & McGuire 2018) zu Umweltlärm und seinen Effekten auf den Schlaf beschränkte sich auf Veröffentlichungen zwischen 2000 und 2015. Interventionsstudien, die Effekte von Veränderungen der Flugbedingungen beobachten, wurden explizit ausgeschlossen (Brown & van Kamp 2017).

Am zuverlässigsten ließen sich Aufwachreaktionen durch Fluglärm mit Hilfe der Polysomnographie aufdecken. Bas-

ner & McGuire identifizierten eine einzige Studie, die dieses Untersuchungsverfahren in einer Feldstudie in der Umgebung des Flughafens Köln angewendet hat („STRAIN“: Study on human specific Response to Aircraft Noise; (Basner et al. 2006). Eine genauere Beschreibung der Studie findet sich unter Punkt 2. Basner & McGuire legten in der Veröffentlichung von 2018 eine Neuauswertung dieser Untersuchungen vor, die sich geringfügig von der früheren Auswertung derselben Daten aus dem Jahre 2006 unterscheidet. Durch den Verzicht auf Einbeziehung vieler komplexer Störgrößen wurden die sich ergebenden Modellgleichungen besser anwendbar.

Die Wahrscheinlichkeit, bei einem Anstieg von Fluglärm um 10 dB (L_{night} , innen) zu erwachen (kortikale Arousal oder Schlafstadienwechsel), zeigte sich mit einem unbereinigten Odds Ratio von 1.35 (95 % CI 1.22–1.50) signifikant erhöht. Nach den GRADE-Kriterien wurde die Studie mit einer moderaten Evidenz bewertet. Zwar lag eine signifikante Expositions-Wirkungsbeziehung vor, aber die starke Selektion der Teilnehmer könnte zu einer Verzerrung geführt haben.

Basner & McGuire fanden weiterhin 9 Studien, die sich mit dem Effekt von Fluglärm auf selbstberichtete Schlafstörungen (Erwachen, Einschlafen, Ein- und Durchschlafstörungen) beschäftigten. 6 dieser Studien fragten spezifisch nach dem Effekt von Fluglärm auf den Schlaf. 5 der Studien wurden in Vietnam durchgeführt, nur eine in Deutschland. 3 der Studien, alle aus der Schweiz, fragten lärmunspezifisch nach Schlafstörungen. Alle Studien wurden bisher nur als Vortragsmanuskripte veröffentlicht. Allerdings gelang es den Autoren des WHO-Reviews, fehlende Informationen durch persönlichen Kontakt mit den Autoren zu gewinnen. Eine Übersicht über diese Studien findet sich in ► **Tabelle Anhang A4.1.**

► **Abbildung 7** zeigt eine Übersicht über die gefundenen Schätzer für den Effekt des Fluglärms auf starke Schlafstörungen in den einzelnen 9 Studien, sowie jeweils die zusammengefassten Schätzer für lärmenspezifische und -unspezifische Fragestellungen.

Bei lärmunspezifischer Fragestellung war das Odds-ratio 1.13 (95 % CI 0.92–1.39) pro 10 dB und nicht signifikant, während es bei einer spezifischen Fragestellung mit 2.37 (95 % CI 1.69–3.34) pro 10 dB sehr hoch und signifikant war. Die Ergebnisse der Meta-Analyse von Basner & McGuire lassen sich gut mit den Ergebnissen der älteren Meta-Analyse von Miedema (Miedema & Vos 2007) vergleichen, die bisher häufig zur Beurteilung von Gremien wie WHO und EU herangezogen wurde. Die neuen Auswertungen gestatten die Beschreibung der Beziehung zwischen Fluglärm und dem Anteil stark schlafgestörter Personen in relativ einfachen quadratischen Formeln für 3 Kategorien von Schlafstörungen:

- a) (6 Studien zu **Einschlafschwierigkeiten**; $N=6\,368$)
 % Starke Schlafstörungen = $16\,3369 - 0.9663 \times L_{\text{night}} + 0.0214 \times (L_{\text{night}})^2$

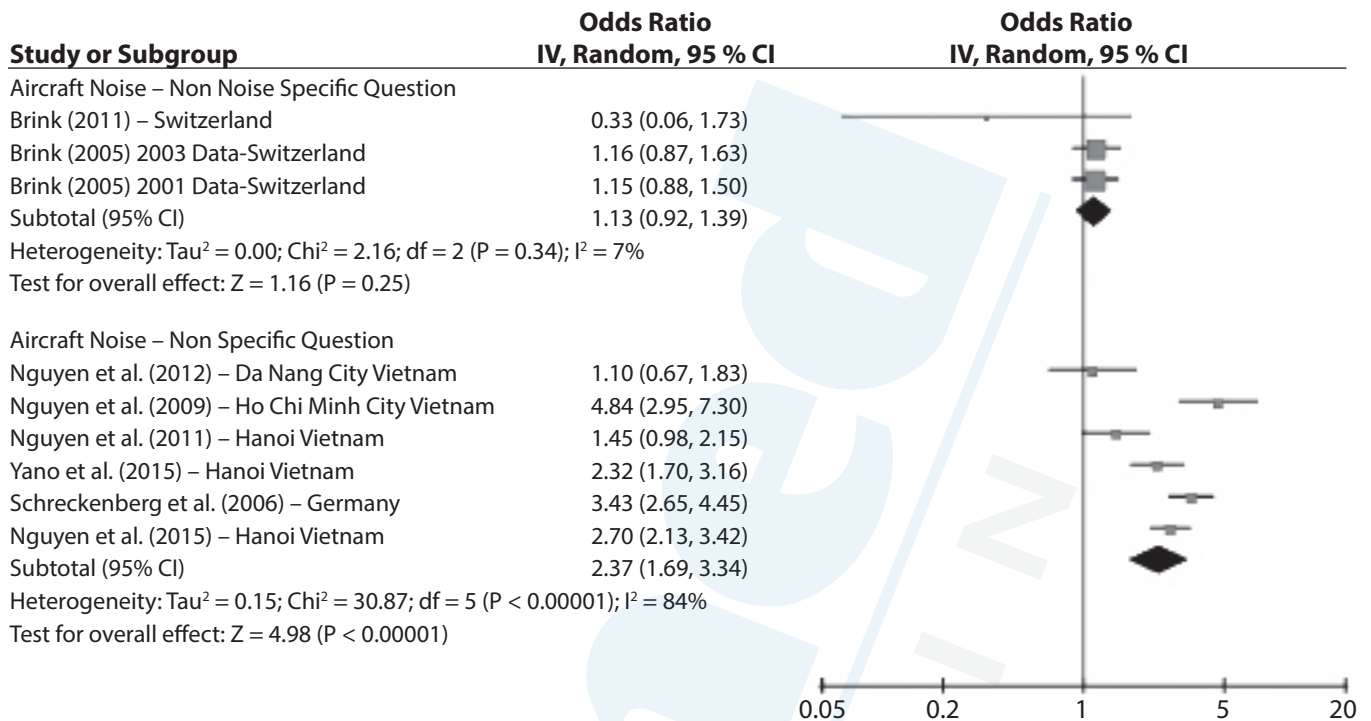


Abbildung 7: Metaanalyse über die Effekte von Fluglärm auf selbstberichtete Schlafstörungen (kombinierter Schätzwert) basierend auf Odds Ratios für eine 10 dB-Erhöhung des Lnight-Levels für Fluglärm (Basner & Mc Guire 2018)

- b) (5 Studien zum **Erwachen**; N=4044):
 $\% \text{ Starke Schlafstörungen} = 12\,0411 - 0.5646 \times \text{Lnight} + 0.0137 \times (\text{Lnight})^2$
- c) (1 Studie zu **Ein- und Durchschlafschwierigkeiten**; N=2309):
 $\% \text{ Starke Schlafstörungen} = 16\,7885 - 0.9293 \times \text{Lnight} + 0.0198 \times (\text{Lnight})^2$

Die WHO (WHO 2009) hatte mit den damals bestimmten Formeln berechnet, wie viele stark schlafgestörte Personen bei unterschiedlichem nächtlichem Fluglärm zu erwarten wären: Bei 45 dB Lnight wurden so 5,2 % stark schlafgestörte Personen erwartet und bei 65 dB 18,8 %. Die aktuelle Formel von Basner & McGuire zeigte dagegen 14,8 % stark schlafgestörte bei 45 dB und 40,0 % stark schlafgestörte bei 65 dB an. Bei 40 dB sind nach den neuen Formeln somit bereits 11 % durch Fluglärm stark schlafgestört und für das Benchmarkniveau der WHO, „3 % durch Fluglärm stark schlafgestörte“ (WHO 2018), fand sich nach den obigen Formeln kein Nachtlärm im Bereich reeller Zahlen, bei dem dies erreicht werden könnte (unterer Scheitelpunkt der Parabel liegt oberhalb von 3 %).

Bei gleicher Belastung gaben in den neueren Studien deutlich mehr Personen an, erheblich schlafgestört durch Fluglärm zu sein.

Studien zu fluglärmbedingten Schlafstörungen, gemessen anhand von nächtlichen Körperbewegungen, zeigten innerhalb der Literaturrecherche nur eine schwache Evidenz, für deren systematische Analyse zu wenige Studien mit unver-

gleichbaren Outcomes vorlagen. Diese Einschränkungen gelten auch für den Bereich „Kinderschlaf“.

5.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Die im vorigen Absatz erwähnten Studien zu fluglärmbedingten subjektiven Schlafstörungen wurden vom Team Charité nicht bewertet, da sie nicht als Publikationen vorlagen. Dagegen wurde eine Interventionsstudie als positiv bewertet, die in keinem der systematischen Reviews der WHO aufgeführt wurde. Es handelt sich um eine Auswertung von Daten um den Flughafen Zürich, bei denen der Effekt von Veränderungen der Nachtflüge auf erhebliche Schlafstörungen (unspezifische Fragestellung) quantifiziert wurde und wichtige weitere Faktoren adäquat berücksichtigt wurden (Boes et al. 2013). Dort fand man nach einer Änderung der Nachtflüge auf einzelnen Startbahnen eine Zunahme des Nachtlärms von bis zu 9 dB (bei einem Mittelwert von 35,8 dB). Damit einhergehend nahmen selbstberichtete Schlafstörungen (im Mittel 25,3 %) der stärker belasteten Individuen pro 1 dB Erhöhung des Nachtlärms um 0,6 % zu. Extrapoliert würde dies 12 % bei einer Erhöhung von 20 dB entsprechen, also eher in der Größenordnung der Abschätzung von Miedema & Vos (2007).

Polysomnographische Studien wurden durch das Team Charité ebenfalls als hoch qualitativ bewertet. Basner et al. (2006) benutzten diese Technik in ihrer Feldstudie

STRAIN am Flughafen Köln/Bonn mit 64 schlafgesunden Personen. Sie fanden bei Maximalpegeln oberhalb von 33 dB im Schlafrum eine Zunahme fluglärmbedingter Aufwachreaktionen im Vergleich zu spontanen Aufwachreaktionen. Die Aufwachwahrscheinlichkeit stieg um 21 %, wenn der Maximalpegel jeweils 10 dB lauter war. Eine weitere Studie (NORAH; Müller et al. 2015), die nicht in das systematische Review von Basner & McGuire eingegangen ist, wiederholt diese Untersuchungen an einem größeren Kollektiv (n = 202) in der Umgebung des Frankfurter Flughafens. Der gefundene Zusammenhang ist in **Abbildung 8** wiedergegeben. Der Anstieg der Expositions-Wirkungsbeziehung ist sehr ähnlich zu dem in Köln/Bonn (Basner et al. 2006): Die Aufwachwahrscheinlichkeit stieg in Frankfurt um 25 % pro 10 dB. Allerdings lag die Kurve hier deutlich unter der in Köln/Bonn beobachteten. Absolute Aufwachwahrscheinlichkeiten hängen offensichtlich von weiteren Faktoren ab, die sich an den Flughäfen unterscheiden, aber bisher nicht verstanden sind.

In der NORAH-Studie wurde weiter beobachtet, dass insbesondere Frühschläfer (22:00 Uhr bis 6:30 Uhr) von der Einführung der Kernruhezeit (23:00 bis 5:00 Uhr) am Frankfurter Flughafen im Jahr 2011 profitierten. Auch die selbstberichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen, erhoben durch telefonische und Online-Befragungen (Schreckenberget al. 2015), lagen in den Jahren 2012 und 2013 bei abnehmendem nächtlichen Dauerschallpegel (L_{Aeq}

22–6 Uhr) im Durchschnitt niedriger als im Jahr 2011. Unterschiede zwischen subjektiver und objektiver Schlafqualität fanden sich hier ebenfalls.

5.3 Neuere Studien 2015–18: Bewertung Team Charité

Aktuellere internationale Studien beschäftigten sich mit der Erhebung subjektiver Schlafstörungen aufgrund von Fluglärm. Holt et al. (2015) fanden in einer umfangreichen telefonischen Befragung mit 745 868 Teilnehmern (BRFFS; USA) keine signifikanten Unterschiede bei selbstberichteten Schlafstörungen im Vergleich zwischen Anwohnern unterschiedlich lärmexponierter Gebiete und Arealen ohne Fluglärm. Demgegenüber berichteten Kwak et al. (2016) höhere Mittelwerte für subjektive Ein- und Durchschlafstörungen sowie Tagesschläfrigkeit in fluglärmexponierten Gebieten. Auch Ragetli et al. (2016) fanden in ihrer telefonischen Befragung von 15 697 Personen in Kanada einen Zusammenhang von Schlafstörungen und Fluglärm: Innerhalb des Fluglärmgebietes (L_{night}, max. 69,7dB) wurden von 15,1 % der Befragten Schlafstörungen angegeben. Bei einer Distanz von bis zu 2000 m zur Fluglärmzone waren es nur noch 6 %. Insgesamt wurden hier mehr Schlafstörungen durch Straßenverkehrslärm berichtet (4,2 %) als für Flug- und Schienenverkehrslärm (1,5 % und 1,1 %). Trotz ihrer Größe wiesen auch die neuen Studien einige methodische Schwächen auf. Eine Übersicht gibt **Abbildung A4.2** im Anhang.

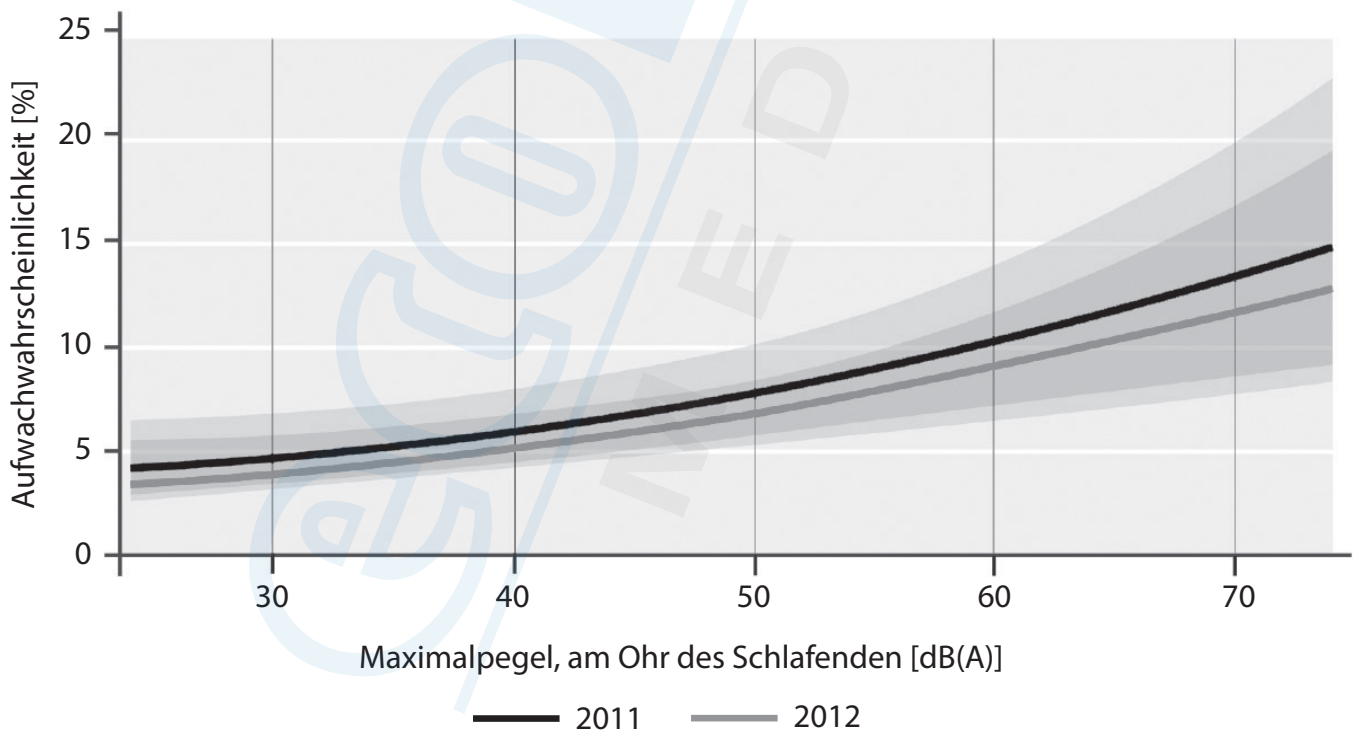


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen nächtlichem Fluglärm, angegeben als Maximalpegel am Ohr des Schlafenden, und der relativen Aufwachwahrscheinlichkeit am Flughafen Frankfurt (aus Penzel et al. 2017, nach Müller et al. 2015).

5.4 Gesamtbewertung Fluglärm und Schlaf

Insgesamt zeigte sich ein Zusammenhang zwischen dem Anstieg des Fluglärmpegels und der Häufigkeit der selbstberichteten Schlafstörungen bzw. des nächtlichen Erwachens, insofern dieses polysomnographisch erhoben wurde, wobei die Stärke dieser Zusammenhänge variiert. Die Evidenz der Studien ist nach WHO moderat, wobei allerdings die gleiche Sachlage beim Wirkungsbereich „Bluthochdruck“ zu einer niedrigeren Einstufung geführt hat. Sie wurden demnach zur Richtlinienfindung herangezogen. Es wurde ein Richtwert von 40 dB festgelegt, bei dem allerdings schon 11 % stark schlafgestört sind, das Benchmark-Niveau von 3 % wurde also auch bei diesem Wert nicht erreicht. Ferner sei darauf hingewiesen, dass die neuen Gleichungen, die Gültigkeit für Europa haben sollen, überwiegend aus vietnamesischen Studien abgeleitet wurden.

Grundsätzlich gilt für Schlafstörungen dasselbe, wie es auch schon für die Belästigungsreaktion formuliert wurde: Das absolute Ausmaß von Schlafstörungen anhand einfacher Formeln alleine aus der Lärmbelastung abschätzen zu wollen, erscheint uns in Unkenntnis der bedeutenden nicht akustischen Faktoren kaum möglich zu sein. Dies gilt selbst für polysomnographisch beobachtete Schlafstörungen, wie der Vergleich der Beobachtungen aus Köln und Frankfurt zeigt.

6 Fluglärm und Kognition

Kognitive Funktionen stehen als Sammelbegriff für psychische Prozesse der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung. Hierzu zählen im Wesentlichen Wahrnehmungs-, Aufmerksamkeits-, Gedächtnis- und Denkprozesse. Während der Einfluss von Fluglärm auf die Bewältigung kognitiver Aufgaben bei Erwachsenen hauptsächlich im Labor untersucht wurde, wurden Untersuchungen an Kindern sowohl im Feld als auch im Labor durchgeführt. Die interessierenden kognitiven Funktionen beziehen sich im Wesentlichen auf die Bereiche Aufmerksamkeit, Gedächtnis (Arbeitsgedächtnis, Langzeitgedächtnis), problemlösendes Denken, Sprachverarbeitung (Lesekompetenz, Leseverständnis) und psychomotorische Reaktionen.

6.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (Clark & Paunovic 2018a)

Im systematischen Review der WHO wurden 25 Veröffentlichungen zu epidemiologischen Studien identifiziert, die bis Juni 2015 publiziert wurden und sich mit dem Zusammenhang zwischen Kognition und Fluglärm beschäftigten. Alle diese Studien beschäftigten sich mit dem Einfluss von Fluglärm auf kognitive Funktionen bei Kindern. ► **Tabelle A5.1** im Anhang gibt einen knappen Überblick über diese Veröffentlichungen, wie sie vom Team Charité zusammengestellt wurde.

Die eingesetzten Instrumente zur Erfassung kognitiver Funktionen waren sehr unterschiedlich. Überdies konnten nur aus zwei Studien (RANCH, NORAH) quantitative Beziehungen zwischen Fluglärm und Kognition abgeleitet werden, da in allen anderen (älteren) Studien im Wesentlichen nur zwei Expositionsstufen unterschieden wurden. Clark & Paunovic (2018a) verzichteten daher auf eine Meta-Analyse, gaben aber eine GRADE-Bewertung der Qualität der Evidenz, getrennt nach fünf kognitiven Funktionsbereichen: (1) Lesen und mündliches Verständnis (2) Standardisierte schulische Bewertungstests (3) Kurz- und Langzeitgedächtnis (4) Aufmerksamkeit und (5) Arbeitsgedächtnis. Mit Ausnahme von Funktionsbereich (2) wurden die übrigen meist in einer Studie gemeinsam untersucht. War für einen Funktionsbereich wenigstens eine Veröffentlichung enthalten, die sich auf eine longitudinale Studie oder eine Interventionsstudie (Beobachtungen während der Verlagerung eines Flughafens) stützt, so ergab sich nach Clark & Paunovic zunächst eine hohe Ausgangsevidenz. Wurden jedoch spezifische methodische Standards nicht eingehalten oder waren die Ergebnisse widersprüchlich, wurde die Evidenzbewertung schrittweise abgesenkt. Dies ist eine andere Form der GRADE-Bewertung als sie für die anderen Wirkungsbereiche in den WHO-Reviews angewandt wurde. Im Einzelnen ergaben sich folgende Bewertungen:

6.2 Lesen und mündliches Verständnis

Von den 14 Veröffentlichungen, die über den Zusammenhang zwischen Fluglärm und Lesen und mündliches Verständnis berichteten, fanden 10 eine statistisch signifikante Verschlechterung unter Fluglärm und zwei eine Tendenz in diese Richtung. Die ursprünglich hohe Evidenz dieser Studien (es gab longitudinale und Interventionsstudien) wurde wegen einiger Inkonsistenzen zwischen den Studien auf moderate Evidenz gesenkt.

6.2.1 Standardisierte schulische Bewertungstests

7 Studien berichteten über den Zusammenhang zwischen standardisierten schulischen Bewertungstests und Fluglärm. 4 dieser Studien fanden eine Beeinträchtigung unter Fluglärm. Die ursprünglich hohe Evidenz dieser Studien (Längs- und Interventionsstudien) wurde wegen mangelnder individueller Confounder-Kontrolle bei einigen auf eine moderate Evidenz gesenkt. In den US-Studien waren die Schulen und nicht die einzelnen Schüler die zugrunde gelegte Analyseeinheit.

6.2.2 Kurz- und Langzeitgedächtnis

11 Veröffentlichungen untersuchten den Zusammenhang zwischen Fluglärm und Gedächtnis. 6 von diesen fanden eine Beeinträchtigung. Die ursprünglich hohe Evidenz die-

ser Studien (es gibt eine Longitudinale) wurde wegen Inkonsistenzen auf moderate Evidenz herabgesetzt.

6.2.3 Aufmerksamkeit

10 Studien untersuchten den Zusammenhang zwischen Fluglärm und Aufmerksamkeit. Von ihnen fanden 5 eine statistisch signifikante Assoziation. Wegen Inkonsistenzen zwischen den Studien und mangelnder Confounder-Kontrolle bei einigen dieser Studien wurde die ursprünglich hohe Evidenz auf niedrige Evidenz herabgestuft.

6.2.4 Arbeitsgedächtnis

9 Veröffentlichungen, ausschließlich Berichte aus Querschnittstudien, beschrieben die Assoziation zwischen Fluglärm und Arbeitsgedächtnis. Keine fand eine signifikante Assoziation. Wegen Inkonsistenzen zwischen den Studien wurde die ursprünglich geringe Evidenz auf sehr geringe Evidenz herabgesetzt.

Die im Review von Clark und Paunovic (2018a) bewerteten Studien wurden trotz zum Teil moderater Evidenzbeurteilung für eine Festlegung von Richtwerten nicht herangezogen, da eine Meta-Analyse mit Angabe eines gemeinsamen Schätzers nicht durchgeführt wurde.

6.3 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

3 epidemiologische Studien, die Münchener Flughafenstudie, RANCH und NORAH wurden vom Team Charité als von hoher Evidenz bewertet; diese 3 werden daher im Folgenden näher beschrieben (► **Tabelle A5.1**). Zusätzlich werden experimentelle Studien an Erwachsenen aufgeführt, die vom Team Charité ebenfalls als von hoher Evidenz bewertet wurden. Der Einfluss von Fluglärm auf kognitive Funktionen hängt sowohl von der Art der Aufgabe, mit der das jeweilige kognitive System untersucht wird, als auch vom kognitiven Teilsystem selbst ab. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Laboruntersuchung von (Becker et al. 1995), die eine Überwachungsaufgabe zum Test der Daueraufmerksamkeit verwendete, um die Auswirkungen von Fluglärm zu untersuchen. Im Ergebnis zeigte sich zunächst, dass sich in Bedingungen ohne Feedback keine Leistungsunterschiede zwischen den einzelnen Beschallungssituationen ergaben, was bedeutet, dass die Leistungen unter Ruhe identisch mit denen der 70- und 95 dB-Überflüge waren. In den Bedingungen mit Feedback zeigten sich allerdings statistisch signifikante Unterschiede. Feedback führte bei Aufgaben dieser Art normalerweise zu Leistungsverbesserungen, da die Probanden aus den Rückmeldungen lernen. Während unter Ruhe die Testpersonen vom Feedback profitieren konnten, zeigte sich ein deutlicher Abfall der Leistungen

für die Beschallungsbedingungen, das heißt, unter Fluglärm konnte die Feedbackinformation nicht angemessen verarbeitet werden. Ob und welche Effekte sich finden ließen, hing damit wesentlich von der Art der Aufgabe ab. Auch die zeitliche und dynamische Charakteristik der Geräusche nahm Einfluss auf das Ausmaß der Beeinträchtigung kognitiver Prozesse. So wirkten sich Schallereignisse, die durch zeitlich strukturierte Pegelveränderungen charakterisiert sind, besonders störend auf kognitive Verarbeitungsprozesse aus (zusammenfassend Szalma & Hancock (2011)).

Besonders anfällig für Störungen durch Lärmereignisse ist jenes kognitive Teilsystem, das für die Verarbeitung akustischer beziehungsweise verbaler Information zuständig ist. Für die Forschung waren daher die Untersuchung der Lesekompetenz und des Leseverständnisses bei Kindern in Abhängigkeit von der Fluglärmbelastung von besonderem Interesse.

Eine Studie in München (Hygge et al. 2002) verglich die kognitiven Leistungen von Kindern aus der Umgebung des alten Münchener Flughafens vor und nach dessen Schließung mit der von Kindern aus der Umgebung des neuen Flughafens vor und nach dessen Öffnung. Dabei zeigte sich, dass die Lesefähigkeit von Kindern am alten Flughafen gegenüber unbelasteten Kindern deutlich schlechter war. Nach der Schließung des Flughafens verschwanden diese Unterschiede. Das Gegenteil wurde in der Umgebung des neuen Flughafens beobachtet: Nach der Öffnung des Flughafens verschlechterte sich die Lesefähigkeit der Kinder, die nun neu lärmbelastet waren, gegenüber nicht lärmbelasteten Kindern. Bei den anderen kognitiven Parametern waren die Ergebnisse nicht ganz so eindeutig. Diese Ergebnisse, die ein „natürliches“ Experiment ausnutzen, legen eine ursächliche Beteiligung des Fluglärms nahe, zeigten aber auch, dass die Effekte bei einer Verminderung des Lärms reversibel sind.

In einer großen, von der EU geförderten Studie (RANCH, (Stansfeld et al. 2005) wurden 2 844 Kinder in der Umgebung der Flughäfen von London, Amsterdam und Madrid untersucht. In jeder Stadt wurden Kinder erfasst, die an ihrem Schulort unterschiedlich belastet waren. Die Autoren berücksichtigten darüber hinaus unterschiedliche Belastungen durch Straßenverkehrslärm sowie eine Fülle individueller sozialer und Lebensstilfaktoren. Durch die Verwendung normierter Lesetests konnte festgestellt werden, dass Kinder, die einer 20 dB höheren Fluglärmbelastung am Schulort (30–77 dB Leq 16h) ausgesetzt waren, eine verminderte Leseleistung zeigten, die in England um acht Monate und in den Niederlanden um 4 Monate hinter der ihrer weniger belasteten Altersgenossen lag. Für Spanien ließen sich solche Angaben nicht machen, da altersstandardisierte Werte fehlten. ► **Abbildung 9** zeigt die gemeinsame Expositions-Wirkungsbeziehung. Für Straßenverkehrslärm ergaben sich keine Effekte auf die Leseleistung, was den Schluss zulässt, dass fluglärmspezifische Beschallungscharakteristika hier eine Rolle spielen.

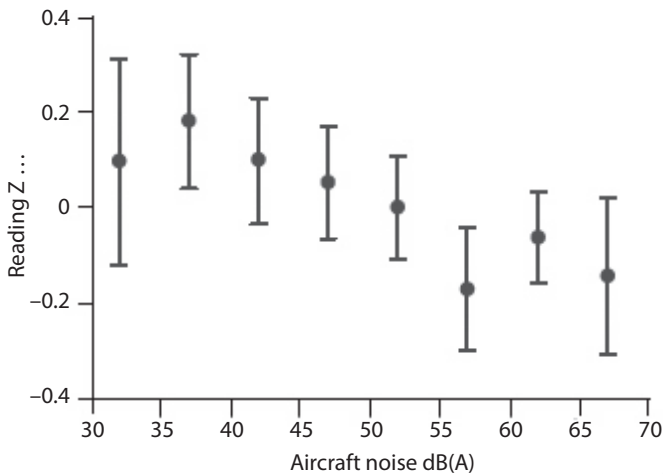


Abbildung 9: Expositions-Wirkungs-Kurve der RANCH-Studie zum Zusammenhang zwischen Fluglärm (16h L_{eq}) und Leseverständnis bei Kindern (Quelle: Stansfeld et al. 2005, S. 1945)

Die gefundenen Effekte bestanden auch 6 Jahre später noch (Clark et al. 2013). Die Effektstärken entsprachen denen der Basisstudie, allerdings konnten sie nur im Londoner Studienteil untersucht werden und zeigten sich nicht mehr statistisch signifikant, weil weniger als die Hälfte der Kinder an der Nachuntersuchung teilgenommen hatte.

Die jüngste Studie (NORAH), die sich mit den Auswirkungen des Fluglärms auf kognitive Funktionen, insbesondere das Lesen bei Kindern, beschäftigt, wurde im Gebiet um den Flughafen Frankfurt durchgeführt (Klatte et al. 2016). Insgesamt wurden 1 243 Zweitklässler aus 29 unterschiedlich mit Fluglärm belasteten Gebieten untersucht. Die Pegelvariation deckte dabei einen Bereich zwischen 39 und 59 dB $L_{eq\ 08-14}$ ab.

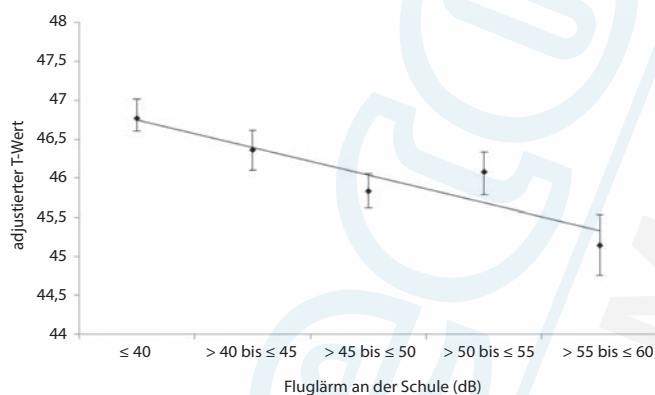


Abbildung 10: Expositions-Wirkungs-Kurve der NORAH-Studie zum Zusammenhang zwischen Fluglärm (6 h $L_{eq\ 08-14}$) und Leseverständnis bei Kindern (Quelle: Klatte et al. 2016, S. 137). Die Testwerte T in dieser Abbildung können mit $z = (t - 50) / 10$ in z-Werte umgewandelt werden, wie sie für die Abbildung 13 (RANCH-Studie) verwendet wurden. T-Werte von (45, 46, 47) entsprechen also z-Werten von (-0.5, -0.4, -0.3) Danach ist ersichtlich, dass der Abfall der Expositions-Wirkungs-Kurve in beiden Studien nahezu identisch ist, bei insgesamt aber deutlich niedrigeren Pegeln für NORAH.

Im Ergebnis zeigte sich ein statistisch signifikanter Effekt der Fluglärmexposition auf das Leseverständnis der Kinder. Pro 20 dB Erhöhung des Fluglärmpegels verringerte sich die Leseleistung um 1/5 Standardabweichung, was bei dem verwendeten Test einem Entwicklungsrückstand in der Lesekompetenz von 2 Monaten entspricht. Dies wurde von den Autoren der Studie als ein kleiner Effekt bezeichnet, insofern man ihn mit dem Effekt anderer Faktoren auf die Leseleistung vergleicht: Kinder, die viele Bücher besaßen, waren in ihrer Leseleistung den Kindern, die keine Bücher besaßen, um 4 Monate voraus. Ein Unterschied von 5,5 Monaten bestand in der Leseentwicklung zwischen Kindern, die über schwache und solchen, die über gute Deutschkenntnisse verfügten.

► **Abbildung 10** macht in Verbindung mit ► **Abbildung 9** deutlich, dass der gefundene Anstieg der Kurven für den Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und Testwerten in beiden Studien nahezu identisch war.

6.4 Neuere Studien 2015–18: Bewertung Team Charité

Neuere Studien über den Zusammenhang zwischen Kognition und Fluglärm liegen nicht vor. Die Ergebnisse von Klatter für NORAH lagen 2015, dem Endzeitpunkt der WHO-Bewertung, zwar erst in Berichtsform vor, wurden aber von der WHO schon aufgenommen und sind daher auch von uns schon in Abschnitt 2 beschrieben.

6.5 Gesamtbewertung Fluglärm und Kognition

Das Review der WHO bewertete die Evidenz aus den Studien zu Kognition und Fluglärm nach einem, allerdings im Rahmen der WHO-Reviews ungewöhnlichen, Beurteilungsprozedere als moderat. Trotzdem wurden diese Studien zur Richtwertfestlegung nicht verwendet, da keine Meta-Analyse durchgeführt wurde.

Insgesamt legten die bewerteten Studien auch aus Sicht des Teams Charité einen Zusammenhang zwischen Kognition und dabei insbesondere des Leseverständnisses bei Kindern und Fluglärm nahe. Darüber hinaus ergaben sich in den NORAH- und RANCH-Studien deutliche Belege für Expositions-Wirkungsbeziehungen.

7 Fluglärm und Lebensqualität/Psychische Erkrankungen

Die Definition psychischer Erkrankungen und deren Erfassung werden in den begutachteten Studien unterschiedlich vorgenommen. Die Spanne reicht von manifesten psychischen Störungen, die mit einer Einweisung in die psychiatrische Abteilung entsprechender Krankenhäuser verbunden ist (Auswertung von Einweisungsraten), bis zu selbstberichteten psychischen Störungen (z. B. Angststörungen), die

über Fragebögen erfasst wurden. Eine kausale Herleitung des Zusammenhangs von Fluglärmbelastung und psychischer Erkrankung gestaltet sich aus theoretischer Sicht schwierig. Fluglärminduzierte Bedrohungsängste oder Hilflosigkeitserfahrungen müssten bei chronischer Lärmbelastung in manifeste Angststörungen oder Depressionen umschlagen. Studien, die eine solche Kausalkette belegen, fehlen bisher.

7.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO zu Lebensqualität, Wohlbefinden und psychische Gesundheit (Clark und Paunovic 2018b)

Von der WHO wurden insgesamt 17 Studien identifiziert, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Fluglärm und Lebensqualität/Psychische Erkrankungen beschäftigen (► Tabelle A7.1). Die meisten Studien waren Querschnittstudien, deren Evidenz von vorneherein als gering bewertet wurde. Für den Zusammenhang zwischen Fluglärm und selbstberichteter Lebensqualität bzw. Gesundheit (Clark et al. 2012, Stansfeld et al. 2005, van Kempen et al. 2010, Schreckenberget al. 2010a, Schreckenberget al. 2010b), wurden 7 Studien identifiziert, 3 davon bezogen sich auf Kinder (RANCH-Studie). Bei 5 der 7 Studien fanden sich keine substantiellen Zusammenhänge. Aufgrund der Inkonsistenzen wurde die Evidenz als sehr gering eingestuft. Die Evidenz für einen Effekt von Fluglärm auf die Einnahme von Medikamenten gegen Depression und Angstzustände (Floud et al. 2011) war ebenso wie die Evidenz für einen Effekt auf Fragebogenangaben zu Depressionen und Angstzuständen (Hardoy et al. 2005) sehr gering. 5 der 17 identifizierten Studien zur Lebensqualität/psychischen Gesundheit hatten den Zusammenhang zwischen Fluglärm und emotionalen Störungen bzw. Verhaltensstörungen zum Gegenstand (Clark et al. 2012, Clark et al. 2013, Crombie et al. 2011, Stansfeld et al. 2005, Stansfeld 2009). Die Analysen bezogen sich alle auf Daten aus dem RANCH-Projekt. Aufgrund der inkonsistenten Befunde wurde den Studien insgesamt die Bewertung „geringe Qualität“ zugeordnet. Bezogen auf den Zusammenhang zwischen Fluglärm und Hyperaktivität bei Kindern wurden 3 Studien identifiziert (Clark et al. 2013, Crombie et al. 2011, Stansfeld 2009). Die Evidenz für einen Zusammenhang von Fluglärm mit hyperaktiven Symptomen bei Kindern wurde – u. a. auch aufgrund inkonsistenter Befunde – als gering eingestuft.

7.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Ein Großteil der Studien wurde in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführt. (► Tabelle A7.2) Ca. 70 % der begutachteten Studien bezogen sich auf den Londoner Flughafen Heathrow. Bei diesen Studien erfolgte eine Einteilung der Fluglärmbelastung in 2 (niedrig versus hochbelastetes Wohngebiet) oder 4 Kategorien. Bei den älteren Studien aus

den 1980er Jahren bestand die methodische Herausforderung vor allem in der Kontrolle von soziodemographischen und weiteren personenbezogenen Variablen (Confounder), um auszuschließen, dass gefundene Effekte auf eine wohngebietspezifische Zusammensetzung der Wohnbevölkerung zurückgeführt werden können. Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung von Confounder-Variablen sind die Ergebnisse der älteren Studien wenig belastbar.

Ein erster Versuch, eine erhöhte psychische Sensibilität gegenüber Lärm als Personenvariable mit der Erhöhung des Risikos einer psychischen Erkrankung in Zusammenhang zu bringen, stammte von (Stansfeld 1992). In einer experimentellen Untersuchung konnte er zwar zeigen, dass Lärmempfindliche im Vergleich zu nicht lärmempfindlichen Personen psychophysiologisch mit einer erhöhten Herzrate und einer Erhöhung der Hautleitfähigkeit auf Fluglärm reagieren. Ein Zusammenhang zwischen Lärmempfindlichkeit und einem Globalmaß für psychische Erkrankungen, in dem verschiedene Aspekte psychischer Beeinträchtigungen zusammengefasst wurden, konnte jedoch nicht gefunden werden. Andere Autoren wie Kaneko und Goto (Kaneko & Goto 2008) diskutierten eine erhöhte psychische Vulnerabilität als generellen Ausgangspunkt für unterschiedlichste Stressfolgen auf Fluglärm. In einer Teilstudie des RANCH-Projektes, bei der Kinder im Alter von 9 und 10 Jahren untersucht und Confounder-Variablen angemessen berücksichtigt wurden (Crombie et al. 2011), zeigte sich ein statistisch signifikanter expositionsabhängiger Anstieg der mit Hilfe eines standardisierten Gesundheitsfragebogens erfassten Hyperaktivität (untersuchter Pegelbereich 30–77 dB, 16h Leq). Ein ähnlicher Befund hatte sich bereits in einer Studie am Flughafen Heathrow (Haines et al. 2001) unter Verwendung des gleichen Messinstrumentes (Elternfragebogen zur psychologischen Morbidität von Kindern mit spezieller Skala zur Hyperaktivität) ergeben. Erklärt wurde dies durch einen pegelabhängigen Anstieg der physiologischen Aktivierung. Allerdings konnte in der Längsschnittstudie (six-year follow-up) von Clark et al. (2013) kein Zusammenhang zwischen Fluglärmbelastung und hyperaktiven Symptomen bei Kindern festgestellt werden.

7.3 Neuere Studien: Team Charité

Beschreibungen dieser Studien sind in ► Tabelle A7.3 zusammengefasst.

In der NORAH-Studie wurde kein klarer Zusammenhang zwischen Fluglärmexposition und dem Auftreten von unipolaren Depressionsepisoden gefunden. Einerseits bestand keine lineare Beziehung, sondern ein umgekehrt U-förmiger Verlauf, wobei das Risiko bis 55 dB anstieg und bei höherer Exposition wieder abfiel. Andererseits wiesen Personen, die einem geringen nächtlichen mittleren Pegel (< 40dB Lden, 22-06h) und gleichzeitig einem nächtlichen Maximum > 50 dB ausgesetzt waren, eine signifikante Risikoerhöhung

(OR = 1,07) auf (Seidler & Wagner 2015, Seidler et al. 2017). Der umgekehrt U-förmige Zusammenhang zwischen Depressionsepisoden und Fluglärmexposition lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass der scheinbare Effektabfall bei hohen Pegeln in sozialen Confoundern zu suchen ist.

In einer weiteren deutschen Studie (Beutel et al. 2016) wurde der Zusammenhang zwischen den subjektiven Angaben zur Lärmbelastigung und auftretenden Depressionen analysiert. Starke Lärmbelastigung ging mit einer Verdoppelung der Häufigkeit von Angstzuständen und Depressionen in der Bevölkerung einher. Die Autoren diskutieren, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass Angstzustände und Depression mit einer höheren Lärmempfindlichkeit zusammenhängen. Lärmbelastigung könnte damit ein Symptom von Angstzuständen und Depressionen sein. Da objektive Messungen zur Lärmexposition nicht vorlagen und auch kein Bezug zur Belastigung mit Fluglärm direkt hergestellt werden konnte, liefert diese Studie keinen Beitrag zur Aufklärung des Zusammenhanges zwischen Fluglärmexposition und Depression.

2 Querschnittsstudien aus dem Jahr 2018 beschäftigten sich mit dem Zusammenhang zwischen Fluglärmexposition und selbstbeurteilter psychischer Gesundheit (Baudin 2018, Wright et al. 2018). In der Studie von Baudin et al. wurden Anwohner von 3 französischen Flughäfen mit Hilfe des General Health Questionnaire (GHQ-12) befragt. Die Lärmexposition wurde in 4 Pegelklassen eingeteilt ($L_{den} < 50$, 50–54, 55–59, > 60 dB). Für die Gesamtstichprobe ergab sich kein direkter Zusammenhang zwischen Lärmexposition und psychischer Gesundheit. Allerdings waren sowohl die empfundene Belastigung durch den Fluglärm als auch die Lärmempfindlichkeit signifikant mit der selbstberichteten psychischen Gesundheit assoziiert. Dies kann als Hinweis interpretiert werden, dass psychologische Faktoren in den Zusammenhang zwischen Lärmexposition und psychische Gesundheit eingreifen. In der Studie von Wright et al. wurden Anwohner im Einzugsbereich des Flughafens Belfast untersucht. Die Lärmbelastigung wurde in 3 Pegelklassen unterteilt (16h Leq < 54 , 54–56,9, > 57 dB). Grundlage der Analyse waren Daten zur selbstberichteten psychischen Gesundheit, die im Rahmen einer Volkszählung erhoben wurden. Unter Berücksichtigung einer Reihe von Confoundern konnte hier kein substanzieller Zusammenhang zwischen Fluglärmexposition und psychischer Gesundheit nachgewiesen werden.

7.4 Gesamtbewertung

Insgesamt ist die Befundlage zum Zusammenhang zwischen Fluglärm und Lebensqualität/psychischen Erkrankungen wenig belastbar. Es gibt Hinweise, dass das Ausmaß von Hyperaktivität bei Kindern mit der Höhe der Fluglärmbelastung zunimmt. In der NORAH-Studie zeigte sich, dass das Risiko für eine Depression bei der Betrachtung konti-

nuierlicher Expositionsvariablen statistisch signifikant erhöht war. Bei der Auswertung nach Expositions-kategorien zeigte sich insbesondere in den höheren Expositionsstufen kein erhöhtes Risiko, was möglicherweise an sozialen Confoundern liegt. Bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Fluglärmexposition und selbstberichteter psychischer Gesundheit scheinen psychologische Variablen wie empfundene Lärmbelastigung und Lärmempfindlichkeit eine Rolle gespielt zu haben.

Von dem Expertenteam der WHO wurde die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Fluglärm und Lebensqualität/psychische Erkrankung als gering bis sehr gering angesehen. Die Studien aus diesem Wirkungsbereich konnten für eine Festlegung von Grenzwerten nicht herangezogen werden.

8 Fluglärm und Hörschäden

Hörverlust ist als Verschlechterung des Hörvermögens definiert und wird üblicherweise als Anstieg der Hörschwelle ausgedrückt. Tinnitus ist definiert als „Klingeln im Ohr“ und ist eine häufige und oft störende Begleiterscheinung von Hörverlust.

8.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (Sliwińska-Kowalska & Zaborowski 2017)

Ziel der WHO-Arbeitsgruppe war es, zu bewerten, ob eine Expositions-Wirkungs-Beziehung zwischen nicht-beruflicher Lärmexposition und permanentem Hörverlust bzw. Tinnitus aufgestellt werden kann.

In Hinblick auf den Fluglärm wurden lediglich einige ältere Studien identifiziert (Es handelte sich dabei um dieselben Studien, die auch vom Charité-Team bewertet wurden, ► **Tabelle A8.2**). Um in eine Bewertung überhaupt eingeschlossen zu werden, musste die Exposition individuell bestimmt und der Hörverlust audiometrisch untersucht worden sein. Keine der identifizierten Studien erfüllten diese Einschlusskriterien der WHO-Gruppe. Es lagen mithin keine Studien für eine GRADE-Bewertung vor. Studien aus diesem Wirkungsbereich konnten somit auch nicht für Richtwertfestsetzungen in Betracht gezogen werden.

8.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Es wurden 4 Studien aus unterschiedlichen Ländern zur Beeinträchtigung des Hörvermögens bei Kindern durch Fluglärm bewertet (► **Tabelle A8.1**). Die aktuellste (Chen & Chen 1993) konnte bei Kindern aus der Region einen Hörverlust messen, ihre statistische Auswertung ist jedoch unzu-

reichend. Die anderen 3 Studien stammen aus den 1970er- und 80er-Jahren und zeigten entweder keine nachweisbare Einschränkung oder haben aufgrund methodischer Mängel keine hinreichende Aussagekraft. Auf dieser Grundlage gibt es keine belastbaren Hinweise für eine Beeinträchtigung des Hörvermögens bei Kindern durch Fluglärm.

In WHO (1999) wurden folgende Expositionen genannt, die zu Hörschädigungen führen können: berufliche Lärmbelastung, Freizeitlärm wie das Hören von lauter Popmusik in Diskotheken, Konzerten oder über Kopfhörer, Blasmusik- oder Symphonieorchester, Lärm durch Schießen oder Motorradfahren. Hierbei wurden Hörschädigungen bei Expositionen mit einem LAeq, 24h-Pegel von mehr als 70 dB nachgewiesen. Belastungen dieser Größenordnung sind in Wohnbereichen in der Nähe ziviler Verkehrsflughäfen aber eher selten.

8.3 Neuere Studien zum Zusammenhang zwischen Hörverlust und Fluglärm: Team Charité

Es liegen keine neueren (ab 2015 erschienene) Studien über den Zusammenhang zwischen Fluglärm und Hörschäden vor.

8.4 Gesamtbewertung Fluglärm und Hörschäden

Insgesamt zeigten die Studien zur Beeinträchtigung des Hörvermögens bei Kindern durch Fluglärm entweder keine nachweisbare Einschränkung oder hatten aufgrund methodischer Mängel keine hinreichende Aussagekraft. Auf dieser Grundlage gibt es keine belastbaren Hinweise für eine Beeinträchtigung des Hörvermögens bei Kindern durch Fluglärm.

Hörschäden durch Fluglärm sind in der Bevölkerung bei einer Exposition von LAeq, 24h unter 70 dB nicht beobachtet worden. Die Daten zeigten, dass eine lebenslange Exposition gegenüber Umweltlärm mit LAeq, 24h < 70 dB bei der großen Mehrheit der Menschen (über 95 %) nicht zu Hörschäden führen würde (WHO 1999). Aufgrund der üblicherweise in der Umgebung ziviler Flughäfen auftretenden Maximalpegel sind Hörschäden auch nicht zu erwarten.

9 Fluglärm und Schwangerschaft/Geburt

Das Geburtsgewicht kann durch eine Vielzahl von Umweltfaktoren während der Schwangerschaft beeinflusst sein. So weist ein niedriges Geburtsgewicht trotz ausreichend langer Schwangerschaft darauf hin, dass der Fötus nicht ausreichend versorgt war. Als Umweltfaktor kann extremer chronischer Stress der Mutter zu einer Verringerung des Geburtsgewichtes führen. Umweltfaktoren können auch zu Frühgeburten und zu kindlichen Fehlbildungen führen.

9.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO (Nieuwenhuijsen et al. 2017)

Im systematischen Review der WHO wurden alle 6 Studien ausgewählt, die je zu diesem Thema publiziert wurden. Im Anhang (► Tabelle A9.1) findet sich eine Übersicht über diese Studien gemeinsam mit einer individuellen Qualitätsbeurteilung. Von dem Team der WHO (Nieuwenhuijsen et al. 2017) wurden 2 verschiedene Qualitätsbeurteilungen durchgeführt. Während die Bewertung nach der Newcastle-Ottawa-Skala das Verzerrungsrisiko dieser Studien als unklar bis niedrig einstufte, galt es nach dem GRADE-System für alle Studien als hoch. Insgesamt wurde die Evidenz aus diesen Studien als sehr gering eingeschätzt, da es sich um ökologische, Querschnitts- oder Fall/Kontrollstudien handelte. Die Resultate waren nicht einheitlich und eine Expositions-Wirkungsbeziehung konnte nur in einer Studie nachgewiesen werden. Überdies kontrollierten die meisten Studien nicht adäquat für Störgrößen.

Diese Studien konnten somit für eine Festlegung von Richtwerten nicht herangezogen werden.

9.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Vom Team Charité wurden die gleichen Studien bewertet wie im systematischen Review der WHO. Die Bewertungen finden sich ebenfalls in ► Tabelle A9.1. Die Bewertung ist insgesamt ähnlich negativ, wie die Bewertung der WHO. Aus Sicht des Teams Charité liegt dies auch darin begründet, dass überhaupt keine aktuellen Studien zum Zusammenhang zwischen Fluglärm und Geburt-Outcomes vorliegen. Die sechs veröffentlichten Studien zu diesem Thema sind 30 bis 40 Jahre alt und ihre Aussagekraft war schon zur damaligen Zeit schwach. Methodisch sind sämtliche Untersuchungen unzureichend, beispielsweise wurden so wichtige Faktoren wie das Rauchen der Mutter nicht berücksichtigt. Zudem griffen selbst etwas neuere Veröffentlichungen für ihre Auswertungen auf ältere Daten zurück.

9.3 Neuere Studien 2015–18: Team Charité

Neuere Studien lagen nicht vor. Neuere Studien zum Zusammenhang zwischen Lärm und Geburtsoutcomes beschäftigten sich ausschließlich mit den Auswirkungen des Straßenverkehrs.

9.4 Gesamtbewertung Fluglärm und Schwangerschaft/Geburt

Eindeutige Erkenntnisse zu denkbaren Gesundheitseffekten (z. B. Fehlbildungen, Frühgeburten, niedriges Geburtsgewicht) von Fluglärm lassen sich auf der Grundlage der

verfügbaren Studien nicht gewinnen, auch wenn manche Studien einen möglichen Zusammenhang von sehr großem Fluglärm und früheren Geburten oder geringerem Geburtsgewicht zeigen.

Für belastbare Ergebnisse zu prä- und postnatalen sowie weiteren physischen Wirkungen auf Kinder wären neue Studien nötig, die nach dem heutigen Stand der Wissenschaft konzipiert sind und wichtige Kofaktoren ausreichend genau miteinfassen.

10 Fluglärm und Stresshormone

Eine ursächliche Beteiligung von Stress an den Wirkungen von Fluglärm auf den Menschen wird für die meisten Wirkungsgrößen, die bisher schon behandelt wurden, diskutiert. Insbesondere sind Stresshormone an Prozessen der Herz-Kreislaufregulation beteiligt. Hier soll nur speziell auf Studien eingegangen werden, die sich gezielt mit der Auswirkung von Fluglärm auf die Ausschüttung von Stresshormonen beschäftigen.

10.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO

Zum Einfluss von Fluglärm auf die Ausschüttung von Stresshormonen lag kein systematisches Review der WHO vor. Eine Einstufung der Ausschüttung von Stresshormonen als „kritisch“ oder „wichtig“ erfolgte nicht, da die Voraussetzungen (Schweregrad, Häufigkeit oder erwartete Verfügbarkeit von Evidenz für eine Assoziation mit der Lärmexposition) nach Auffassung der WHO nicht erfüllt waren (Genauerer siehe unter „Methodik“).

10.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Hier wird ein Überblick über die Literatur bis 2015 gegeben, wie er vom Team Charité erarbeitet wurde. Eine Übersicht über diese Studien findet sich in ► **Tabelle A10.1**.

Unstrittig ist die Ausschüttung von Stresshormonen bei hohen akuten Fluglärmpegeln, wie eine Laboruntersuchung zu den Auswirkungen von militärischem Tieffluglärm (Maximalpegel 105 dB(A) bei kurzen Pegelanstiegszeiten) zeigt (Marth et al. 1988). Hier wurde nachgewiesen, dass im Vergleich zur Situation vor der Lärmexposition die Konzentration des Hormons ACTH, das für das Auslösen einer Kette weiterer hormoneller Reaktionen verantwortlich ist, deutlich ansteigt; in 28 % der Fälle wurden sogar pathologische Werte erreicht.

Eine weitere experimentelle Studie mit einer eher moderaten Fluglärmbelastung wurde an 75 gesunden Freiwilligen

(Alter im Mittel 26 Jahre) durchgeführt (Schmidt et al. 2013). Die Probanden wurden während der Nacht in ihrer häuslichen Umgebung mit 3 verschiedenen Geräuschkennszenarien exponiert: Zum einen ohne und zum anderen mit 30 bzw. 60 Überflügen. Der durchschnittliche Maximalpegel der Überflüge betrug 60 dB, der über die Nacht gemessene Leq lag für die Bedingung mit 60 Überflügen bei 46,3 dB. Die morgendlichen Adrenalin-Konzentrationen erhöhten sich von 28,3 (keine Überflüge) über 33,2 (30 Überflüge) zu 34,1 (60 Überflüge) mit statistisch signifikanten Unterschieden zwischen den Mitteln. Für Cortisol zeigten sich keine expositionsabhängigen Unterschiede. Neben einer Stimulation der Adrenalin-Produktion war außerdem die endotheliale Funktion gestört.

Bei der Messung des Cortisolspiegels ist zu berücksichtigen, dass sich die Cortisolkonzentration über den Tagesverlauf ändert: morgens zeigt sich der Cortisolspiegel am höchsten und flacht während des Tages kontinuierlich ab. Maschke und Hecht konnten in einer Untersuchung, in der Probanden in ihrer Wohnung über 37 Nächte jeweils mit 32 zufällig verteilten, simulierten Starts und Landungen beschallt wurden (8h Leq = 42 dB), zeigen, dass der Cortisolspiegel zusätzlich zur circadianen Entwicklung auch einer wöchentlichen Schwankungscharakteristik unterliegt (Maschke & Hecht 2002). Ein Effekt der Beschallung ergab sich nur bei der Betrachtung des Cortisolverlaufs über mehrere Wochen hinweg. Ein beschallungsabhängiger Trend im Cortisolspiegel konnte nur bei Männern gefunden werden. Allerdings konstatierten die Autoren, dass die Probanden über den Beschallungszeitraum unterschiedliche Muster der Stressadaptation und damit des Cortisolverlaufs entwickelten.

In einer Reihe von epidemiologischen Studien zu Fluglärmwirkungen wurden auch Stresshormone bestimmt: In der Münchener Studie, welche die Auswirkungen der Verlegung des Flughafens auf gesundheitliche Parameter bei Kindern untersuchte, fanden sich erhöhte Werte von Epinephrin und Norepinephrin unter höherer Fluglärmbelastung (Evans et al. 1995, Evans et al. 1998). In der groß angelegten DLR-Studie zu den Auswirkungen nächtlichen Fluglärms auf die Ausschüttung von Stresshormonen (Maaß & Basner 2006) konnten jedoch keine Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung (Pegelvariation zwischen 45 und 80 dB(A), L_{max}) und Hormonkonzentrationen im Morgenurin (Katecholamine, Cortisol) nachgewiesen werden.

Im Rahmen des HYENA-Projekts wurde ebenfalls die Auswirkung von Fluglärm auf die Ausschüttung von Cortisol (Selander et al. 2009) untersucht. Hier fanden sich, im Gegensatz zur zuvor genannten Studie, statistisch signifikante Anstiege des Cortisolspiegels bei Frauen in Abhängigkeit von der Fluglärmbelastung (> 60 dB, 24 h Leq). Warum sich die Effekte allerdings nur bei Frauen zeigten, ist unklar. In einer früheren experimentellen Studie (Maschke & Hecht 2002) waren dagegen die Männer als eher stressgefährdet durch Fluglärm beschrieben worden.

10.3 Neuere Studien 2015–18: Team Charité

Eine neuere Untersuchung, die die circadian bedingten Cortisolswankungen berücksichtigt, wurde von Lefèvre et al. (2017) an 3 Flughäfen in Frankreich durchgeführt (► **Tabelle A10.2**). Während die Fluglärmexpositionen zu keiner Erhöhung des morgendlichen Cortisolspiegels führten, zeigte sich, dass die normale Abnahme des Cortisolspiegels im Speichel zur Nacht unter Fluglärm reduziert war. Auch war die Variation des Cortisolspiegels bei Fluglärmexposition tagsüber geringer.

10.4 Gesamtbewertung Fluglärm und Stresshormone

Fluglärm kann die Ausschüttung von Stresshormonen verändern, wie experimentelle Studien zeigen. Insgesamt ist aber die Befundlage zum Zusammenhang zwischen Fluglärm und Stresshormonen – auch aufgrund der komplexen methodischen Rahmenbedingungen – aktuell noch zu heterogen, um sie quantifizieren zu können.

11 Fluglärm und Krebs

Im Gegensatz zu anderen Wirkungskenngrößen gibt es für Krebs keine überzeugenden mechanistischen Hypothesen für einen Zusammenhang mit dem Lärm. Stress und Chronodisruption werden diskutiert, sind aber kaum belegt. Einige wenige Studien, vornehmlich Sekundärdatenanalysen, untersuchten den Zusammenhang.

11.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO

Eine systematische Literaturrecherche zu Krebserkrankungen im Zusammenhang mit Fluglärm wurde von der WHO 2017/2018 nicht vorgelegt. Eine Einstufung von Krebs als „kritisch“ oder „wichtig“ erfolgt nicht, da die Voraussetzungen (Schweregrad, Häufigkeit oder erwartete Verfügbarkeit von Evidenz für eine Assoziation mit der Lärmexposition) nach Auffassung der WHO nicht erfüllt sind (Genauerer siehe unter „Methodik“).

11.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

Im Folgenden wird ein Überblick über die Literatur seit 1990 gegeben, wie er vom Team Charité erarbeitet wurde. Die Charakterisierung der Einzelstudien findet sich in ► **Tabelle A11.2** im zugehörigen Anhang.

Zum Thema Fluglärm und Krebs liegen nur wenige Studien vor. Die Arbeit von Visser et al. (2005) zeigte keinen Zusammenhang. Die Publikation von Greiser (2009) gab für den

Flughafen Köln-Bonn bei Frauen erhöhte Erkrankungsrisiken für sämtliche bösartigen Neubildungen an. Für diesen Befund wird eine Erhöhung der Erkrankungsrisiken für Brustkrebs sowie für Non-Hodgkin-Lymphome und Leukämien verantwortlich gemacht. Diese Studie ist jedoch wegen mangelnder Trennung von prävalenten und inzidenten Fällen und der Vielzahl an durchgeführten Tests als methodisch nicht belastbar einzustufen. Keine Erhöhung der Erkrankungsrisiken für Brustkrebs sowie für maligne Lymphome und Leukämien ergab sich am Flughafen Bremen für Fluglärm, wohl aber für die kombinierte Einwirkung von Straßen- und Schienenverkehrslärm (Greiser et al. 2015).

In der NORAH-Studie zu Krankheitsrisiken am Flughafen Frankfurt (Seidler et al. 2015) konnte für eine Brustkrebs-Erkrankung bei Frauen kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit den Dauerschallpegeln der 3 Verkehrslärmarten festgestellt werden. Die beobachteten umgekehrt u-förmigen Verläufe sind angesichts des angenommenen biologischen Wirkmodells überraschend (Hoffmann, Erdmann 2015) und stellen einen kausalen Zusammenhang in Frage.

11.3 Neuere Studien 2015–18: Team Charité

Die vertiefte Analyse der NORAH-Studie zum Krebs (Hegewald et al. 2017) zeigte für die Gesamtgruppe ebenfalls keine Assoziation mit den Verkehrslärmquellen. Die Odds Ratio war signifikant erhöht für die Untergruppe der Östrogenrezeptor (ER)-negativen Patientinnen in der höchsten Expositions-kategorie, allerdings bei sehr eingeschränkter Fallzahl. Für den Straßenverkehrslärm wurde in dieser Lärmkategorie und höheren Lärmkategorien bei 10fach höherer Zahl von ER-negativen Patientinnen kein erhöhtes Risiko gefunden.

Es gibt mehrere aussagekräftige Analysen zum Krebsrisiko durch Verkehrslärm aus Dänemark. Diese erlauben allerdings keine Aussagen zum Fluglärm, da dieser entweder nicht untersucht wurde oder keinen signifikanten Einfluss zeigte. Der Vollständigkeit halber sind diese Arbeiten im ► **Anhang A11** aufgeführt.

11.4 Gesamtbewertung Fluglärm und Krebs

Insgesamt zeigten die wenigen Studien zum Thema Fluglärm und Krebs entweder keinen klaren Zusammenhang oder wiesen schwerwiegende methodische Mängel auf. Daher gibt es derzeit keine belastbaren Untersuchungen, die einen Einfluss von Fluglärm auf die Krebsentstehung begründen würden.

12 Fluglärm und ökonomische Folgen

12.1 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch die WHO

Zu ökonomischen Folgen von Fluglärm lag kein systematischer Review der WHO vor.

12.2 Ergebnis der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité (Studien bis 2015, Penzel et al. 2017)

In 2 Arbeiten (Greiser & Glaeske 2013, Greiser 2013) wurden Prognosen über die Entwicklung von Krankheitskosten in Abhängigkeit von nächtlichem Fluglärm für das Umfeld der Flughäfen Köln-Bonn und Frankfurt gemacht. Diese basierten auf vom Autor selbst abgeleiteten Risikokoeffizienten sowie auf Krankheitskostenrechnungen des Statistischen Bundesamtes. Dabei wurden die zu erwartenden Erkrankungsfälle und die dadurch entstehenden Krankheitskosten abgeschätzt. Allerdings lagen für die meisten Krankheiten keine abgesicherten Risikokoeffizienten vor, und individuelle Angaben zu Confoundern fehlten. Die Studien sind daher als nicht belastbar anzusehen (► Tabelle A12.1).

Ansonsten sei auf den Überblick über die Literatur von 1990 bis 2015 verwiesen, der vom Team Charité erarbeitet wurde (Penzel 2017), in dem weitere Studien zu den Aspekten Kosten und gesundheitsbezogene Lebensqualität diskutiert wurden.

12.3 Neuere Studien 2015–18: Team Charité

Es liegt eine neuere Studie vor, die eine sehr grobe Aussage zur Gesundheitslast durch Fluglärm macht und keine spezifischen Daten zur Fluglärmexposition enthält (Vienneau et al. 2015) (► Tabelle A12.2). Sie machte keine Angaben zu Gesundheitskosten.

12.4 Gesamtbewertung Fluglärm und ökonomische Folgen

Der Forschungsstand zu den ökonomischen Folgen von Fluglärm ist außerordentlich lückenhaft. Abschätzungen fluglärmbedingter direkter oder indirekter Gesundheitskosten sind aufgrund methodischer Mängel aktuell nicht verlässlich möglich.

13 Diskussion

Zusammenfassung zum Stand der Forschung zu Fluglärmwirkungen

Die Literatur zu Fluglärmwirkungen auf Gesundheit und Befinden der Bevölkerung wurde von Expertenteams der WHO und vom Team Charité zusammengestellt und bewertet.

Literaturanalyse der WHO zum Fluglärm

Die WHO beauftragte verschiedene Expertenteams mit systematischen Reviews zu Umweltlärm und Belästigung,

kardiovaskulären und metabolischen Effekten, Schlaf, Kognition, Lebensqualität und psychischen Erkrankungen, Hörverlust und Tinnitus sowie Schwangerschaft und Geburt. Diese bewerteten Zusammenhangsmaße aus der Literatur bis 2015 und dienten als Grundlage zur Aktualisierung der europäischen Lärmrichtlinien. Die Evidenz für ein bestimmtes Zusammenhangsmaß zwischen Fluglärm und Belästigung sowie Fluglärm und Schlafstörungen wurde als moderat eingeschätzt. Die entsprechende Evidenz aus den Studien zu kardiovaskulären und metabolischen Effekten, zu Lebensqualität und psychischen Erkrankungen, zu Hörverlust und Tinnitus und zu Schwangerschaft und Geburt wurde als gering bis sehr gering eingestuft. Kognition schließlich wurde nicht einbezogen, da keine Meta-Analyse durchgeführt werden konnte.

Die Reviews der WHO sind in allen Bereichen jeweils einzeln sehr gut, umfangreich und transparent durchgeführt worden.

Das Ziel der WHO-Reviews ging aber über eine Sammlung verschiedener unabhängiger Reviews zu unterschiedlichen Wirkungsgrößen hinaus: Aus den Studien sollte ein Richtwert für Fluglärm bestimmt werden, bei dessen Einhaltung vorher festgelegte Risiken oder Risikoerhöhungen nicht überschritten werden. Dazu müssten Schätzer für quantitative Expositions-Wirkungskurven aus Meta-Analysen signifikant sein und für starke (strong) Richtwertempfehlungen muss die Evidenz für dieses Zusammenhangsmaß wenigstens moderat sein. Daher leitet die WHO die starke Richtwertempfehlung $L_{den} = 45$ dB nur aus Studien zur Belästigung ab und der Richtwert für Nachtlärm $L_{night} = 40$ dB wird aus Studien zu Schlafstörungen entwickelt. Dabei fällt auf, dass die Kriterien für die Evidenzbeurteilungen nach dem durch die WHO adaptiertem GRADE-System in den einzelnen Reviews unterschiedlich interpretiert wurden.

Interpretationsunterschiede der GRADE-Kriterien zwischen den einzelnen WHO-Reviews sind bei den einzelnen Wirkungsgrößen teilweise schon beschrieben und werden im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Im Wirkungsbereich Belästigung wurde Querschnittstudien eine hohe Ausgangsevidenz zugeschrieben, in allen anderen Bereichen allerdings eine nur geringe Ausgangsevidenz. Überdies wurden im Wirkungsbereich Belästigung zur Evidenzbeurteilung der Einzelstudien nicht die GRADE-Kriterien herangezogen, sondern weniger strenge Kriterien, die in erster Linie die Qualität der Berichterstattung bewerten. Damit war die Chance bei gleicher Sachlage aufgrund positiver Evidenzbeurteilung zu starken Richtwertempfehlungen zu führen, im Bereich Belästigung am größten.
- Weil nur eine Studie vorlag, wurde die Evidenz für die Inzidenz des Bluthochdrucks abgewertet. Für den Bereich Schlaf wurde diese Regel nicht angewendet.
- Die Art der Kombination der Auf- und Abwertekriterien war unterschiedlich, im Bereich von Herz-Kreislauf

führte das Vorliegen von zwei Abwerte- und 2 Aufwertkriterien wieder zur Ausgangsevidenz, während es beim Schlaf zu einer verbesserten Evidenz führte

- Im Bereich Kognition wurde die Evidenz aus einer Zusammenstellung von Studien dann schon als hoch betrachtet, wenn wenigstens eine longitudinale Studie darin enthalten ist. Dies wurde in allen anderen Wirkungsbereichen nicht so gehandhabt. Im Bereich Bluthochdruck wurden z. B. Querschnittstudien und Kohortenstudien getrennt bewertet und erhielten alle eine geringe Evidenzbewertung.
- Folgende Unterschiede schränken die Vergleichbarkeit weiter ein:
- Die bewerteten Studien deckten für die einzelnen Bereiche einen unterschiedlichen Zeitrahmen ab, die meisten die Zeit zwischen 2000 und 2014, einige aber auch bewerteten alle bis 2015 verfügbaren Studien. Dadurch wurden die wichtigen NORAH-Studien in einigen Reviews berücksichtigt, in anderen nicht.
- Die bewerteten Studien hatten unterschiedliche Länder-schwerpunkte. Beim Blutdruck, der von einer niederländischen Gruppe bewertet wurde, wurden 3 unveröffentlichte Studien aus den Niederlanden einbezogen. Bei selbstberichteten Schlafstörungen waren es ausschließlich 5 nur als Vortragsmanuskripte vorliegende Studienberichte aus Vietnam. Von diesen ist fraglich, ob sie auf europäische Verhältnisse übertragbar sind.

Trotz der sehr guten und transparenten Durchführung der einzelnen Reviews ist daher eine Konsistenz zwischen den Evidenzurteilen der einzelnen Reviewer nicht immer gegeben.

Mit dem Prozentanteil hoch Belästigter bestimmt insbesondere ein Wirkungsmaß den WHO-Richtwert, das sich als wenig stabil herausgestellt hat. Für die Belästigungsreaktion wurden bereits vor beinahe 20 Jahren EU-Normgleichungen entwickelt (Miedema & Oudshoorn 2001), die aus der Kenntnis der Dauerschallpegel alleine die Berechnung des Ausmaßes einer Belästigungsreaktion möglich machen sollten. Nach den Ergebnissen des neuen WHO-Reviews (Guski et al. 2017) unterschätzen diese alten EU-Gleichungen aber die Belästigungsreaktion in den Studien, die Guski für die neuere Meta-Analyse ausgesucht hat. Eine andere Auswahl von Studien aus dem selben Zeitraum (Gjestland 2018) deutet wiederum auf eine Gültigkeit der alten EU-Normgleichungen hin. Allerdings unterschätzen selbst die neuen Guski-Gleichungen die Belästigungsreaktion an den Flughäfen in Deutschland, die im Rahmen der NORAH-Studie untersucht wurden. Zunehmend sind nicht-akustische Faktoren wirksam, die die absolute Höhe der Belästigungsreaktion in der Bevölkerung wesentlich mitbestimmen. Diese Faktoren sind jedoch bisher nicht ausreichend untersucht. Bei Anwendung der genannten Gleichungen ist ebenfalls zu bedenken, dass sich die derzeitige Belastung durch Fluglärm von früheren Belastungssituationen unterscheidet, die Relation zwischen Dauerschallpegel und Anzahl an Flugbewegungen hat sich verändert. Ein Lärmdauerschallpegel, der früher durch

wenige laute Flugzeuge erreicht wurde, wird heute in gleicher Stärke durch viele leisere Flugzeuge erreicht.

Insgesamt ist festzuhalten:

Die Evidenz für Expositions-Wirkungsbeziehungen wurde für alle anderen Wirkungsbereiche als die Belästigung bei gleichem Sachverhalt in den WHO-Reviews schlechter beurteilt. Die Evidenzurteile zu Studien über Herz-Kreislauf-erkrankungen (van Kempen et al. 2017) sind im Vergleich besonders negativ ausgefallen.

Literaturanalyse des Teams Charité zum Fluglärm

Ein Team unter der Leitung der Charité bewertete im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche Publikationen aus dem Zeitraum 1990 bis 2018 anhand einheitlicher Bewertungskriterien und stellte die Ergebnisse qualitativ guter Studien zusammen. Zusätzlich zu den von der WHO untersuchten Wirkungen wurden Zusammenhänge des Fluglärms mit Stresshormonen, Krebs und die ökonomischen Folgen analysiert.

Die Literaturrecherche der WHO umfasst Arbeiten, die bis 2014/2015 veröffentlicht waren. Die Literaturanalyse des Teams Charité berücksichtigte demgegenüber auch Arbeiten, die zwischen 2015 und 2018 veröffentlicht wurden. Gerade in den letzten Jahren sind unsere Kenntnisse über die Wirkung von Fluglärm insbesondere durch die NORAH-Studie deutlich erweitert worden. So gab es in den Bereichen Belästigungsforschung (Schreckenberget al. 2015), Schlaf (Müller et al. 2015) und Herz-Kreislauf (Héritier et al. 2017) – um nur einige zu nennen – wichtige neue Erkenntnisse.

Das Ziel des Charité-Reviews war weder eine Meta-Analyse noch eine Richtwertfestlegung. Ziel war die Feststellung, für welche Wirkungsmessgrößen ein Zusammenhang mit Fluglärm belegt ist. Dazu mussten qualitativ gute Studien vorliegen, die einen solchen Zusammenhang zeigen. Die Bewertungen wurden von einem Team gemeinsam nach einheitlichen Kriterien durchgeführt. Nach der Literaturrecherche des Teams Charité sind Wirkungen des Fluglärms auf die Belästigung, das Herz-Kreislaufsystem (Bluthochdruck, Herzinfarkt), die Schlafqualität (Aufwachreaktionen, selbstberichtete Schlafstörungen), sowie Kognition (Lesefähigkeit) belegt. Ferner gibt es Hinweise auf die vermehrte Ausschüttung von Stresshormonen und auf psychische und metabolische Veränderungen. Dazu liegen methodisch gute Studien vor. Hörschäden und Effekte auf Geburt-Outcomes sind durch keine neueren methodisch guten Studien belegt.

Vergleich der Ergebnisse

In ► **Tabelle 3** sind die Ergebnisse der systematischen Reviews der WHO und des Teams Charité einander gegenübergestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche durch das Team Charité und die WHO 2018

Auswirkungen von Fluglärm auf	Team Charité: Fluglärm zeigt folgende Wirkungen (unter besonderer Berücksichtigung von NORAH):	WHO-Empfehlungen für Richtwerte mit Begründung (Abschnitt 3.4.1 des Richtlinienberichtes (WHO 2018) (Daten der Reviews bis 2014/15; NORAH nicht enthalten)
Belästigung	Expositions-Wirkungs-Beziehungen sind belegt. Die Kurven in den neuesten deutschen Untersuchungen (NORAH) liegen deutlich höher als die standardisierte Lärm-Belästigungs-Kurve der EU von 2001 und auch höher als die gemittelte Kurve aus dem WHO-Review von 2017. Es gibt Hinweise auf eine zunehmende Bedeutung anderer Faktoren als dem Dauerschallpegel und nicht-akustischer Faktoren für die Belästigung, dazu zählen auch erfolgte oder geplante Änderungen des Flughafens.	Ein 10 % Risiko für hohe Belästigung (HA highly annoyed) durch Fluglärm wird als relevant angesehen. Nach der quadratischen Funktion aus dem Review von Guski et al. 2017 ($\% HA = -50.9693 + 1.0168 \times L_{den} + 0.0072 \times L_{den}^2$) wird dieser Wert bei rund 45 dB (= Richtwertempfehlung) erreicht. Die Evidenz für diesen Zusammenhang gilt als moderat. (Kommentar: Anders als für andere Wirkungsbereiche werden Querschnittstudien für den Bereich Belästigung als von hoher Evidenz eingestuft)
Herz-Kreislauf-Erkrankungen	In stärker durch Fluglärm belasteten Regionen sind die Verordnung und der Gebrauch von Herz-Kreislauf-Medikamenten erhöht. Bei Fluglärmbelastungen, die über 60 dB(A) liegen, werden Herz-Kreislauf-Erkrankungen häufiger diagnostiziert. Ein erhöhtes Risiko für Herzinfarkt ließ sich in der NORAH-Studie nur für die Mortalität signifikant absichern. Für Schlaganfall und Herzinsuffizienz zeigte sich keine kontinuierlich ansteigende Expositions-Wirkungs-Beziehung	Eine 5 % Risikoerhöhung durch Fluglärm wird als relevant angesehen. Nach der Meta-Analyse von van Kempen et al. 2018 ist das relative Risiko für die Inzidenz einer ischämischen Herzerkrankung signifikant und beträgt 1.09 pro 10 dB. Der mittlere niedrigste Lärmpegel, der in den Studien gemessen wurde, war 47 dB Lden. Eine relevante Risikoerhöhung tritt demnach bei 52.6 dB auf. Keine Richtwertempfehlung, die Evidenz gilt als sehr gering, die Daten stammen aus ökologischen Studien
Blutdruck und Bluthochdruck	Ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen Bluthochdruck und Fluglärm erscheint gesichert. Das Ausmaß ist jedoch klein und neuere Studien finden im Allgemeinen kleinere Zusammenhangsmaße als ältere. Der Nachtlärm ist von besonderer Bedeutung (HYENA). In NORAH wurde bei blutdruckgesunden Probanden nur ein geringer (1 mm Hg/10 dB) statistisch nicht signifikanter Effekt des Fluglärms auf den <i>Blutdruck</i> beobachtet.	Eine 10 % Risikoerhöhung für Bluthochdruck durch Fluglärm wird als relevant angesehen. Es gibt nur eine Inzidenzstudie (Stockholm), deren gepooltes Ergebnis (Männer und Frauen) nicht signifikant ist. Die Ergebnisse der Querschnittstudien sind ebenfalls nicht signifikant. Die Evidenz gilt als gering – es gibt keine Richtwertempfehlung.
Metabolische Effekte	Es gibt erste Beobachtungen über vermutlich stress-induzierte Zunahme des viszeralen Körperfettes und zur erhöhten Inzidenz von Diabetes durch Fluglärm.	Wichtige aber nicht kritische Wirkungsgröße für Fluglärm; ohne Festlegung von Richtwerten. Die Evidenz aus den Diabetes-Studien gilt als sehr gering, da die Schätzer sehr unpräzise waren. Die Evidenz für Fettleibigkeit und Fluglärm (eine Studie) wurde als moderat eingeschätzt wegen der Größe des Schätzers
Schlaf	Einige primäre Wirkungen von Fluglärm (Aufwachreaktionen) sowie einige sekundäre Wirkungen (Beurteilung der Schlafqualität) sind belegt. Polysomnographische Untersuchungen aus Deutschland zeigen, dass die Aufwachwahrscheinlichkeit mit einem Anstieg des fluglärmbedingten Schallpegels am Ohr des Schlafers um 10 dB 20–25 % ansteigt. Nicht-akustische Faktoren spielen auch bei Schlafstörungen eine bedeutende Rolle	Ein 3 % Risiko für starke Schlafstörungen durch Fluglärm wird als relevant angesehen. Nach der quadratischen Funktion (Parabel) aus dem Review von Basner, McGuire 2018 wird dieser Wert nirgendwo erreicht, da der untere Scheitelpunkt der Parabel deutlich über 3 % liegt. 11 % der Teilnehmer an den Studien waren bereits bei 40 dB Lnight nachts stark schlafgestört. Da eine Extrapolation nicht möglich ist, wird dieser Wert als Richtwert für Nachtlärm gewählt. Die Qualität der Evidenz gilt als moderat
Kognition	Grundschulkinder in vergleichsweise stark von Fluglärm belasteten Gebieten lernen langsamer lesen. In der NORAH-Studie betrug die Leseverzögerung einen Monat pro 10 dB stärkerer Belastung. Nach starker Reduktion des Fluglärms (nach Schließung des alten Münchner Flughafens) scheint dieser Effekt reversibel zu sein.	Eine einmonatige Verzögerung des Lesenlernens wird als relevant angesehen. Die Qualität der Evidenz gilt als moderat, eine Richtwertempfehlung wird aber nicht gegeben, da das entsprechende Review keine Meta-Analyse enthält.
Lebensqualität, Psychische Erkrankungen	Insgesamt ist die Befundlage wenig belastbar. Es gibt Hinweise, dass das Ausmaß von Hyperaktivität bei Kindern mit der Höhe der Fluglärmbelastung zunimmt. Die Kurve für den Zusammenhang zwischen Krankenkassendaten zur Depression und Fluglärm in NORAH zeigte einen umgekehrt U-förmigen Verlauf und insbesondere in den höheren Expositionsstufen kein erhöhtes Risiko. Die Verordnung und der Gebrauch von Beruhigungsmitteln nehmen mit der Fluglärmbelastung zu.	Wichtige aber nicht kritische Wirkungsgröße für Fluglärm; ohne Festlegung von Richtwerten. Die Qualität der Evidenz gilt als niedrig bis sehr niedrig. Untersuchungen über den Zusammenhang mit Depression lagen zum Zeitpunkt der Erstellung des WHO-Reviews noch nicht vor.

Auswirkungen von Fluglärm auf	Team Charité: Fluglärm zeigt folgende Wirkungen (unter besonderer Berücksichtigung von NORAH):	WHO-Empfehlungen für Richtwerte mit Begründung (Abschnitt 3.4.1 des Richtlinienberichtes (WHO 2018) (Daten der Reviews bis 2014/15; NORAH nicht enthalten)
Hörschäden	Studien zeigen entweder keine nachweisbare Einschränkung oder haben aufgrund methodischer Mängel keine hinreichende Aussagekraft.	Eine 5 % Risikoerhöhung durch Fluglärm wird als relevant angesehen. Es lagen keine Studien vor, die die Einschlusskriterien erfüllten, daher keine Richtwerte
Schwangerschaft, Geburt	Studien mit ausreichender Evidenz fehlen.	Wichtige aber nicht kritische Wirkungsgröße für Fluglärm; keine Festlegung von Richtwerten. Die Studien werden als inkonsistent mit hohem Verzerrungsrisiko eingestuft, die Evidenz gilt als sehr niedrig.
Stresshormone	Fluglärm kann möglicherweise die normale nächtliche Abnahme des Cortisolspiegels beeinflussen.	Keine Bearbeitung durch WHO
Krebs	Es gibt Hinweise auf Zusammenhänge zwischen Straßenverkehrslärm und Brustkrebs bzw. Non-Hodgkin Lymphom. Derzeit liegen keine Studien vor, die einen Einfluss von Fluglärm auf Krebs mit ausreichender Evidenz begründen würden.	Keine Bearbeitung durch WHO
Ökonomische Folgen	Der Forschungsstand ist außerordentlich lückenhaft. Bisher durchgeführte Abschätzungen fluglärmbedingter direkter oder indirekter Gesundheitskosten sind aufgrund methodischer Mängel nicht verlässlich	Keine Bearbeitung durch WHO

Die Evidenz für einen *Effekt* von Fluglärm auf Belästigung und Schlafstörungen wird von den WHO-Reviewern und dem Team Charité insgesamt am höchsten eingeschätzt. Darüber hinaus bewerten die Reviewer der WHO die *Schätzer für den Zusammenhang* mit „moderate Evidenz“. Das Team Charité weist ferner darauf hin, dass es sich gezeigt hat, dass der Zusammenhang zwischen Belästigung und Fluglärm von einer Fülle nicht akustischer Faktoren, wie zum Beispiel der Erwartung von Veränderungen im Flugbetrieb, abhängt. Damit ist ein quantitativer Zusammenhang ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Faktoren weder zeitlich noch räumlich von einem Standort auf einen anderen Standort übertragbar.

Die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Fluglärm und Herz-Kreislaufkrankungen und insbesondere Bluthochdruck ist nach Ansicht des Teams Charité höher zu bewerten als von den WHO-Reviewern vorgeschlagen. Die hatten für diesen Wirkungsbereich die strengsten und zum Teil irrelevante (Kenntnis der Fragestellung) Kriterien für die Evidenzbeurteilung benutzt. Allerdings ist auch nach Einschätzung des Teams Charité die Evidenz für bestimmte Parameterschätzer als gering einzuschätzen, die genaue Größe des Effektes ist noch unklar.

Der Einfluss des Fluglärms auf Kognition und dabei besonders das Leseverständnis von Kindern ist nach Ansicht beider Reviews belegt. Es ist unklar, warum das WHO-Team auf eine Meta-Analyse wenigstens der beiden guten Studien RANCH und NORAH verzichtet hat.

In den 4 weiteren Wirkungsbereichen metabolische Effekte, Lebensqualität/psychische Erkrankungen, Hörschäden und Schwangerschaft und Geburt stimmen die Evidenzurteile der beiden Reviews überein: Die Evidenz ist gering, da ent-

weder die Studienlage bisher keine schlüssigen Aussagen ermöglicht (metabolische Effekte, psychische Erkrankungen) oder nur sehr alte und methodisch schlechte Studien vorliegen (Schwangerschaft und Geburtoutcomes, Hörschäden).

Insgesamt berichten WHO und Team Charité übereinstimmend über statistisch abgesicherte Zusammenhänge zwischen Fluglärmbelastung und Wirkungen (1) auf Selbstangaben zur empfundenen Belästigung (2), auf das Herz-Kreislaufsystem (ischämische Herzkrankheit und Hypertonie), (3) auf den Schlaf (Aufwachreaktionen, Schlafqualität) sowie (4) auf die Lesefähigkeit von Kindern. Für den Zusammenhang zwischen Fluglärm und den genannten Wirkungen liegen Expositions-Wirkungsbeziehungen vor, die bevölkerungsbezogene Risikoabschätzungen möglich machen. Allerdings muss dabei der Einfluss nicht akustischer Faktoren sowie die Unsicherheit bisher vorliegender Zusammenhänge angemessen berücksichtigt werden.

Es sei angemerkt, dass die Reviewer, die Literaturrecherchen und Meta-Analysen für die WHO durchgeführt haben, keine Empfehlungen für Richtwerte abgegeben haben. Diese Empfehlungen stammen von der „Guidelines Development Group“, in der die Reviewer nicht vertreten waren. Auch das Team Charité beschränkt sich auf die Bewertung des Wissensstands und gibt keine Empfehlungen für Richtwerte oder Grenzwerte ab.

14 Danksagung

Wir danken allen, die an der Expertise „Evaluierung der Forschung zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen“ (Penzel et al. 2017) und somit zum Review und zur Bewertung der Studien und Übersichtsarbeiten beigetragen ha-

ben. Zusätzlich zu den Autoren des vorliegenden Artikels sind zu nennen:

Prof. Dr. Joachim Vogt, Technische Universität Darmstadt, bewertete mit seinem Team im Rahmen eines Unterauftrags der Charité zur Erbringung wissenschaftlicher Arbeiten die Literatur zum Thema Belästigung bis 2014. Alle Texte, Tabellen und Abbildungen mit Bezug zu anderen Themen oder neueren Veröffentlichungen wie z. B. aus NORAH stammen von anderen Autoren. Ferner danken wir Dr. Ian Flindell, Universität Southampton, für die Bewertung des Moduls 1 der NORAH-Studie, Prof. Dr. Michael Schlander, Universität Heidelberg und Institute for Innovation & Valuation in Health Care (InnoValHC), Wiesbaden, Dr. rer. medic. Martin Glos, Maria Renelt, M.Sc., Charité Berlin, Dorothee Hoffmann, redaktionelle Bearbeitung, Berlin, Kathrin Sommerfeld, M.Sc., TU Darmstadt, Henrik Hertel, TU Darmstadt, Franziska Koch, M.Sc., TU Darmstadt, Ann-Christin Pfeifer, M.Sc., TU Darmstadt, Darya Yatsevich, B.Sc., TU Darmstadt, Svea Mißfeldt, M.Sc., Leuphana Universität, Lüneburg, Libin Yao, B.Sc., M.A., Institute for Innovation & Valuation in Health Care, InnoValHC, Wiesbaden.

15 Interessenskonflikt

Der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) hat das Interdisziplinäre Schlafmedizinische Zentrum der Charité mit der Erstellung einer Expertise „Evaluierung der Forschung zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen“ (Penzel et al. 2017) beauftragt. U. Krämer, R. Höger und H.-E. Wichmann erhielten von der Charité ein Honorar für die Mitarbeit an dieser Expertise. Die Bewertung der WHO-Reviews und die Erstellung dieser Publikation wurden nicht honoriert. Die Autoren erklären, dass sowohl die Expertise als auch diese Publikation ohne jede Beeinflussung erstellt wurden.

16 Anhang

In einem ausführlichen Anhang (Link: <https://www.ecomed-umweltmedizin.de/archiv/umweltmedizin-hygiene-arbeitsmedizin-band-24-nr-4-2019>) sind die Bewertungen der wichtigsten Einzelstudien durch die WHO-Arbeitsgruppen bzw. das Team Charité zusammengestellt.

17 Literatur

Argalassova-Sobotova L, Lekaviciute J, Jeram S, Sevcikova L, Jurkovicova J (2013): Environmental noise and cardiovascular disease in adults. Research in Central, Eastern and South-Eastern Europe and Newly Independent States. *Noise Health* 15 (62), 22–31

Babisch W, Houthuijs D, Pershagen G et al. (2009): Annoyance due to aircraft noise has increased over the years—results of the HYENA study. *Environment international* 35 (8), 1169–1176

Bartels S, Márki F, Müller U (2015): The influence of acoustical and non-acousti-

cal factors on short-term annoyance due to aircraft noise in the field – The COSMA study. *Science of the Total Environment* 538, 834–843

Basner M, McGuire S (2018): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (3) 519. 1–45

Basner M, Samel A, Isermann U (2006): Aircraft noise effects on sleep: Application of the results of a large polysomnographic field study. *J Acoust Soc Am* 119 (5), 2772–2784

Becker AB, Warm JS, Dember WN, Hancock PA (1995): Effects of jet engine noise and performance feedback on perceived workload in a monitoring task. *The International Journal of Aviation Psychology* 5 (1), 49–62

Beutel ME, Jürgen C, Klein EM, Wild P, Lackner K, Blettner M, Binder H, Michal M, Wiltink J, Brähler E, Münzel T (2016). Noise Annoyance Is Associated with Depression and Anxiety in the General Population – The Contribution of Aircraft Noise. *PLoS One*. 2016 May 19; 11 (5)

Boes S, Nüesch S, Stillman S (2013): Aircraft noise, health, and residential sorting: evidence from two quasi-experiments. *Health economics* 22 (9), 1037–1051

Brown AL, van Kamp I (2017): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. A Systematic Review of Transport Noise Interventions and Their Impacts on Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (8). 873. 1–44

Chen T-J, Chen S-S (1993): Effects of aircraft noise on hearing and auditory pathway function of school-age children. *Int. Arch Occup Environ Health* 65 (2), 107–111

Clark C, Crombie R, Head J, van Kamp I, van Kempen E, Stansfeld SA (2012): Does traffic-related air pollution explain associations of aircraft and road traffic noise exposure on children's health and cognition? A secondary analysis of the United Kingdom sample from the RANCH project. *American Journal of Epidemiology* 176 (4), 327–337

Clark C, Head J, Stansfeld S (2013): Longitudinal effects of aircraft noise exposure on children's health and cognition: A six-year follow-up of the UK RANCH cohort. *Journal of Environmental Psychology* 35, 1–9

Clark C, Paunovic K (2018a): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. A Systematic Review on Environmental Noise and Cognition. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (2). 285. 1–23

Clark C, Paunovic K (2018b): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (11). 2400. 1–27

Correia AW, Peters JL, Levy JI, Melly S, Dominici F (2013): Residential exposure to aircraft noise and hospital admissions for cardiovascular diseases: multi-airport retrospective study. *BMJ* 347 (oct08 3), f5561

Crombie R, Clark C, Stansfeld SA (2011): Environmental noise exposure, early biological risk and mental health in nine to ten year old children: a cross-sectional field study. *Environmental health : a global access science source* 10, 39

Dimakopoulou K, Koutentakis K, Papageorgiou I et al. (2017): Is aircraft noise exposure associated with cardiovascular disease and hypertension? Results from a cohort study in Athens, Greece. *Occupational and environmental medicine* 74 (11), 830–837

Eikmann T, Zur Nieden A, Lengler A, Spilski J et al. (2015): Wirkung chronischer Lärmbelastung auf den Blutdruck bei Erwachsenen NORAH Endbericht Band 5. In: Guski R, Schreckenber D. NORAH Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld – Endbericht

Eriksson C, Bluhm G, Hilding A, Östenson C-G, Pershagen G (2010): Aircraft noise and incidence of hypertension—gender specific effects. *Environmental research* 110 (8), 764–772

Eriksson C, Hilding A, Pyko A, Bluhm G, Pershagen G, Östenson C-G (2014): Long-term aircraft noise exposure and body mass index, waist circumference, and type 2 diabetes: a prospective study. *Environmental health perspectives* 122 (7), 687–694

Eriksson C, Rosenlund M, Pershagen G, Hilding A, Östenson C-G, Bluhm G (2007): Aircraft noise and incidence of hypertension. *Epidemiology* 18 (6), 716–721

Evans GW, Bullinger M, Hygge S (1998): Chronic Noise Exposure and Physiological Response. A Prospective Study of Children Living Under Environmental Stress. *Psychological science* 9 (1), 75–77

Evans GW, Hygge S, Bullinger M (1995): Chronic Noise and Psychological Stress. *Psychological science* 6 (6), 333–338

Evrard A-S, Lefèvre M, Champelovier P, Lambert J, Laumon B (2017): Does air-

- craft noise exposure increase the risk of hypertension in the population living near airports in France? *Occupational and environmental medicine* 74 (2), 123–129
- Eze IC, Foraster M, Schaffner E et al. (2017a): Long-term exposure to transportation noise and air pollution in relation to incident diabetes in the SAPALDIA study. *International journal of epidemiology*, 1115-1125
- Eze IC, Imboden M, Foraster M et al. (2017b): Exposure to Night-Time Traffic Noise, Melatonin-Regulating Gene Variants and Change in Glycemia in Adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (12). 1492. 1-18
- Floud S, Vigna-Taglianti F, Hansell A et al. (2011): Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: Results of the HYENA study. *Occupational and environmental medicine* 68 (7), 518–524
- Foraster M, Eze IC, Schaffner E et al. (2017): Exposure to Road, Railway, and Aircraft Noise and Arterial Stiffness in the SAPALDIA Study. *Annual Average Noise Levels and Temporal Noise Characteristics. Environmental health perspectives* 125 (9), 97004
- Gjestland T (2018): A Systematic Review of the Basis for WHO's New Recommendation for Limiting Aircraft Noise Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (12). 2717, 1-9
- Greiser E (2009): Im Krankenhaus behandelte Krebserkrankungen als Folge einer Exposition gegenüber nächtlichem Fluglärm. Ergebnisse einer Fall-Kontroll-Studie im Umfeld des Flughafens Köln-Bonn. Gutachten im Auftrag des Rhein-Sieg-Kreises. Epi. Consult GmbH http://horst-becker.de/wp-content/uploads/2011/08/100428_Handout_PK_Greiser_Krebsstudie.pdf
- Greiser E (2013): Soziale und ökonomische Folgen nächtlichen Fluglärms im Umfeld des Flughafens Köln-Bonn. Im Auftrag der Bundesvereinigung gegen Fluglärm e.V. Epi. Consult GmbH, Zentrum für Sozialpolitik, Universität Bremen. Musweiler
- Greiser E, Glaeske G (2013): Social and Economic Consequences of Night-Time Aircraft Noise in the Vicinity of Frankfurt/Main Airport. Soziale und ökonomische Folgen nächtlichen Fluglärms im Umfeld des Flughafens Frankfurt/Main. *Gesundheitswesen* 75, 127–133
- Greiser E, Greiser C (2009): Risikofaktor nächtlicher Fluglärm Abschlussbericht über eine Fall-Kontroll-Studie zu kardiovaskulären und psychischen Erkrankungen im Umfeld des Flughafens Köln-Bonn. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (FKZ 370851101)
- Greiser E, Greiser C (2015): Umgebungslärm und Gesundheit am Beispiel Bremen (UBA-Bericht 105/2015). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_105_2015_umgebungslaerm_und_gesundheit_am_beispiel_bremen.pdf
- Greiser E, Jahnson K, Greiser C (2006): Beeinträchtigung durch Fluglärm: Arzneimittelverbrauch als Indikator für gesundheitliche Beeinträchtigungen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes FuE-Vorhaben Förderkennzeichen 205 51 100. Hg. v. Umweltbundesamt
- Guski R, Felscher-Suhr U, Schuemer R (1999): The concept of noise annoyance: How international experts see it. *Journal of Sound and Vibration* 223 (4), 513–527
- Guski R, Schreckenber 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). 1 - 39
- Guski R, Schreckenber D, Schuemer R, Brink M, Stansfeld SA (2019): Comment on Gjestland, T. A Systematic Review of the Basis for WHO's New Recommendation for Limiting Aircraft Noise Annoyance. *Int. J. Env. Res. Pub. Health* 2018, 15, 2717. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (7).1088. 1-6
- Guyatt GH, Oxman AD, Vist GE et al. (2008): GRADE. An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ* 336 (7650), 924–926
- Haines MM, Stansfeld SA, Job RFS, Berglund B, Head J (2001): Chronic aircraft noise exposure, stress responses, mental health and cognitive performance in school children. *Psychol. Med.* 31 (02). 265-277
- Hansell AL, Blangiardo M, Fortunato L et al. (2013): Aircraft noise and cardiovascular disease near Heathrow airport in London: small area study. *BMJ (Clinical research ed.)* 347, f5432
- Haralabidis AS, Dimakopoulou K, Vigna-Taglianti F et al. (2008): Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *European heart journal* 29 (5), 658–664
- Hardoy MC, Carta MG, Marci AR et al. (2005): Exposure to aircraft noise and risk of psychiatric disorders: the Elmas survey-aircraft noise and psychiatric disorders. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology* 40 (1), 24–26
- Héritier H, Vienneau D, Foraster M et al. (2017): Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: a nationwide cohort study from Switzerland. *European journal of epidemiology*. 307-315
- Holt JB, Zhang X, Sizov N, Croft JB (2015): Airport noise and self-reported sleep insufficiency, United States, 2008 and 2009. *Preventing chronic disease* 12, E49
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Röösli M (2010): Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction. *Epidemiology* 21 (6), 829–836
- Hygge S, Evans GW, Bullinger M (2002): A Prospective Study of Some Effects of Aircraft Noise on Cognitive Performance in Schoolchildren. *Psychological science* 13 (5), 469–474
- Jarosińska D, Héroux M-É, Wilkhu P et al. (2018): Development of the WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. An Introduction. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (4). 813; 1-7
- Jarup L, Babisch W, Houthuijs D et al. (2008): Hypertension and Exposure to Noise Near Airports: The HYENA Study. *Environ Health Perspect* 116 (3), 329–333
- Kaneko T, Goto K (2008): Dose-response relationship between aircraft noise and annoyance around an airport in Japan
- Klatte M, Spilski J, Mayerl J, Möhler U, Lachmann T, Bergström K (2016): Effects of Aircraft Noise on Reading and Quality of Life in Primary School Children in Germany. Results From the NORAH Study. *Environment and Behavior* 49 (4), 390–424
- Knipschild P (1977): Medical Effects of Aircraft Noise: Review and Literature. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 40 (3), 201–204
- Kwak KM, Ju Y-S, Kwon Y-J et al. (2016): The effect of aircraft noise on sleep disturbance among the residents near a civilian airport: a cross-sectional study. *Annals of occupational and environmental medicine* 28 (1), 38
- Lefèvre M, Carlier M-C, Champelovier P, Lambert J, Laumon B, Evrard A-S (2017): Effects of aircraft noise exposure on saliva cortisol near airports in France. *Occupational and environmental medicine*. DOI: 10.1136/oemed-2016-104208
- Maaß H, Basner M (2006): Effects of nocturnal aircraft noise - Volume 3. Stress hormones. DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - Forschungsberichte
- Marth E, Gallasch E, Fueger GF, Mose JR (1988): Aircraft noise. Changes in biochemical parameters. *Zentralblatt für Bakteriologie, Mikrobiologie und Hygiene. Serie B, Umwelthygiene, Krankenhaushygiene, Arbeitshygiene, präventive Medizin* 185 (4-5), 498–508
- Maschke C, Hecht K (2002): Gesundheitliche Auswirkungen von Fluglärm. Ergebnisse von ausgewählten Labor- und Feldstudien, zuletzt aktualisiert am 09.12.2002, zuletzt geprüft am 21.09.2012
- Miedema HME, Oudshoorn CGM (2001): Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ Health Perspect* 109 (4), 409–416
- Miedema HME, Vos H (2007): Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies. *Behavioral Sleep Medicine* 5 (1), 1–20
- Morrell S, Taylor R, Carter N, Peplow P, Job S (2000): Cross-sectional and longitudinal results of a follow-up examination of child blood pressure and aircraft noise – the inner Sydney child blood pressure study. *InterNoise 2000*. Nice, 2000
- Müller, U.; Aeschbach, D.; Elmenhorst, E.-M.; Mendolia, F.; Quehl, J.; Hoff, A. et al. (2015): NORAH Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld Endbericht, Band 4: Fluglärm und nächtlicher Schlaf, zuletzt geprüft am 07.02.2019
- Nieuwenhuijsen MJ, Ristovska G, Dadvand P (2017): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. A Systematic Review on Environmental Noise and Adverse Birth Outcomes. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (10). 1-16
- Penzel T (2017): Evaluierung der Forschung zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen. *Charité Universitätsmedizin Berlin*, Berlin
- Pyko A, Eriksson C, Oftedal B et al. (2015): Exposure to traffic noise and markers of obesity. *Occupational and environmental medicine* 72 (8), 594–601
- Quehl J, Müller U, Mendolia F (2017): Short-term annoyance from nocturnal aircraft noise exposure. Results of the NORAH and STRAIN sleep studies. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 90 (8), 765–778
- Ragetti MS, Goudreau S, Plante C, Perron S, Fournier M, Smargiassi A (2016): Annoyance from Road Traffic, Trains, Airplanes and from Total Environmental Noise Levels. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (1). 1-13

- Schmidt FP, Basner M, Kröger G et al. (2013): Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults. *European heart journal*
- Schreckenber D, Griefahn B, Meis M (2010a): The associations between noise sensitivity, reported physical and mental health, perceived environmental quality, and noise annoyance. *Noise Health*
- Schreckenber D, Meis M, Kahl C, Peschel C, Eikmann T (2010b): Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 7 (9), 3382–3405
- Schreckenber D, Faulbaum F, Guski R, Ninke L, Peschel C, Spilski J, Wothge J (2015): NORAH - Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld. Band 3: Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität. Kelsterbach: Gemeinnützige Umwelthaus GmbH (3), zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Seidler A, Hegewald J, Seidler AL et al. (2017): Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data. *Environmental research* 152, 263–271
- Seidler AL, Hegewald J, Schubert M, Weihofen VM, Wagner M, Dröge P, Swart E, Zeeb H, Seidler A (2018): The effect of aircraft, road, and railway traffic noise on stroke – results of a case-control study based on secondary data. *Noise Health*. 2018 Jul-Aug; 20 (95): 152-161
- Seidler A, Wagner M, Schubert M et al. (2016a): Aircraft, road and railway traffic noise as risk factors for heart failure and hypertensive heart disease-A case-control study based on secondary data. *International journal of hygiene and environmental health* 219 (8), 749–758
- Seidler A, Wagner M, Schubert M et al. (2016b): Myocardial Infarction Risk Due to Aircraft, Road, and Rail Traffic Noise. *Deutsches Ärzteblatt International* 113 (24), 407–414
- Seidler, Andreas; Wagner, Mandy (2015): NORAH Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld Endbericht, Band 6: Sekundärdatenbasierte Fall-Kontroll-Studie mit vertiefter Befragung. Flughafen Frankfurt
- Selander J, Bluhm G, Theorell T et al. (2009): Saliva cortisol and exposure to aircraft noise in six European countries. *Environmental health perspectives* 117 (11), 1713–1717
- Sliwińska-Kowalska M, Zaborowski K (2017): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. A Systematic Review on Environmental Noise and Permanent Hearing Loss and Tinnitus. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (10). 1-19
- Stansfeld S (2009): Aircraft and road traffic noise exposure and children's mental health. *Journal of Environmental Psychology*, 29, 203-207
- Stansfeld SA (1992): Noise, noise sensitivity and psychiatric disorder: epidemiological and psychophysiological studies. *Psychol. Med.* 22, 1–44
- Stansfeld SA, Berglund B, Clark C et al. (2005): Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *Lancet* 365 (9475), 1942–1949
- Szalma JL, Hancock PA (2011): Noise effects on human performance. A meta-analytic synthesis. *Psychological bulletin* 137 (4), 682–707
- Thiesse L, Rudzik F, Spiegel K, Leproult R, Pieren R, Wunderli JM, Foraster M, Héritier H, Eze IC, Meyer M, Vienneau D, Brink M, Probst-Hensch N, Rössli M, Cajochen C (2018). Adverse impact of nocturnal transportation noise on glucose regulation in healthy young adults: Effect of different noise scenarios. *Environ Int.* 2018 Dec; 121 (Pt 1): 1011-1023
- van Kempen E, Casas M, Pershagen G, Foraster M (2018): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (2). 1-59
- van Kempen E, Casas M, Petershagen G, Foraster M (2017): Cardiovascular and metabolic effects of environmental noise: Systematic evidence review in the framework of the development of the WHO environmental noise guidelines for the European Region. RIVM Report 2017-0078. Hg. v. National Institute for Public Health and the Environment. Bilthoven, The Netherlands
- van Kempen E, van Kamp I, Fischer P et al. (2006): Noise exposure and children's blood pressure and heart rate. The RANCH project. *Occupational and environmental medicine* 63 (9), 632–639
- van Kempen E, van Kamp I, Lebrecht E, Lammers J, Emmen H, Stansfeld S (2010): Neurobehavioral effects of transportation noise in primary schoolchildren. A cross-sectional study. *Environmental health: a global access science source* 9, 25
- van Poll, R.; Ameling, C.; Breugelmans, O.; Houthuijs, D.; van Kempen, E.; Marra, M.; Swart, W. (2014): Gezondheidsonderzoek Vliegbasis Geilenkirchen (Desk research) I. Hoofdrapportage: samenvatting, conclusies en aanbevelingen Gezondheidsonderzoek Vliegbasis Geilenkirchen: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM
- Vienneau D, Perez L, Schindler C et al. (2015): Years of life lost and morbidity cases attributable to transportation noise and air pollution: A comparative health risk assessment for Switzerland in 2010. *International journal of hygiene and environmental health* 218 (6), 514–521
- Visser O, van Wijnen JH, van Leeuwen FE. (2005) Incidence of cancer in the area around Amsterdam Airport Schiphol in 1988–2003: a population-based ecological study. *BMC Public Health* 2005; 5:127
- WHO (2009): Night noise guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe, zuletzt aktualisiert am 11.09.2009, zuletzt geprüft am 19.10.2012
- WHO (2018): Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Wothge J, Belke C, Möhler U, Guski R, Schreckenber D (2017): The Combined Effects of Aircraft and Road Traffic Noise and Aircraft and Railway Noise on Noise Annoyance-An Analysis in the Context of the Joint Research Initiative NORAH. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14 (8).871; 1-19
- Wright DM, Newell K, Maguire A, O'Reilly D (2018): Aircraft noise and self-assessed mental health around a regional urban airport. A population based record linkage study. *Environmental health: a global access science source* 17 (1), 74
- Wunderli JM, Pieren R, Habermacher M et al. (2016): Intermittency ratio: A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure. *Journal of exposure science & environmental epidemiology* 26 (6), 575–585
- Zeeb H, Hegewald J, Schubert M et al. (2017): Traffic noise and hypertension – results from a large case-control study. *Environmental research* (157), 110–117. (Argalasova-Sobotova et al. 2013)