

**Stellungnahme
aus Sicht der Lärmwirkungsforschung
zur Beurteilung der Fluglärmbelastung für
Wohnende unter der Anfluggrundlinie
am Flughafen Düsseldorf in der ersten
Nachtstunde von 22 bis 23 Uhr**

Auftraggeber

Bürger gegen Fluglärm e.V.
vertreten durch ihren Vorsitzenden,
Herrn Christoph Lange,
Ingerweg 12, 40670 Meerbusch

Konzept von

Dr. Dirk Schreckenberg
ZEUS GmbH,
Zentrum für angewandte Psychologie,
Umwelt- und Sozialforschung
Sennbrink 46, 58093 Hagen

Stellungnahme aus Sicht der Lärmwirkungsforschung zur Beurteilung der Fluglärmbelastung für Wohnende unter der Anfluggrundlinie am Flughafen Düsseldorf in der ersten Nachtstunde von 22 bis 23 Uhr

Auftraggeber:

Bürger gegen Fluglärm e.V.
vertreten durch ihren Vorsitzenden, Herrn Christoph Lange

Ingerweg 12, 40670 Meerbusch

Konzept von:

Dr. Dirk Schreckenberger

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

Tel.: 02331 – 47 83 374

Email: schreckenberger@zeusgmbh.de

URL: <https://www.zeusgmbh.de/>

Datum:

12.07.2025

1 Aufgabenstellung

Nach § 29b LuftVG sind Flugplatzunternehmer, Luftfahrzeughalter und Luftfahrzeugführer verpflichtet, beim Betrieb von Luftfahrzeugen in der Luft und am Boden vermeidbare Geräusche zu verhindern und die Ausbreitung unvermeidbarer Geräusche auf ein Mindestmaß zu beschränken, wenn dies erforderlich ist, um die Bevölkerung vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Lärm zu schützen. Auf die Nachtruhe der Bevölkerung ist in besonderem Maße Rücksicht zu nehmen.

Das Bundesverwaltungsgericht (BVerwG) schließt daraus, dass nach dem allgemeinen rechtsstaatlichen Verhältnismäßigkeitsgrundsatz der Schutz der Bevölkerung vor nächtlichem Fluglärm in verhältnismäßiger Weise gewährleistet werden müsse und damit ein „Abschwellen“ der Fluglärmbelastung vom Tag zur Nacht hin hinreichend sicherzustellen ist.

Im BVerwG-Urteil vom 13. Oktober 2011 zum Flugbetrieb Flughafen Berlin-Brandenburg heißt es:

"Sollte sich die erste Nachtstunde [...] zu einer Stunde entwickeln, in der die Fluglärmbelastung der Anwohner in der Regel größer ist als in den Abendstunden, wäre dies eine mit dem Abwägungsgebot und § 29b Abs. 1 Satz 2 LuftVG nicht vereinbare Entwicklung."

(BVerwGE 141, 1-69, Rn. 200).

Weiterhin heißt es in einem BVerwG-Urteil vom 04. April 2012 zur Planfeststellung am Flughafen Frankfurt

"Auch dann bleibt die Verhältnismäßigkeit nur gewahrt, wenn das Konzept eines zum Kern der Nacht hin abschwellenden und danach wieder ansteigenden Flugverkehrs auch in diesem Zeitsegment durchgehalten und der Flugverkehr zur Vermeidung tagähnlicher Belastungsspitzen durch geeignete Vorkehrungen effektiv und konkret begrenzt wird."

"Auch die erste Nachtrandstunde von 22.00 bis 23.00 Uhr ist schutzwürdig; sie darf nicht als bloße Verlängerung des Tagflugbetriebs angesehen werden "

(BVerwG, Urteil vom 4. April 2012 – 4 C 8/09, 4 C 9/09, 4 C 1/10, 4 C 2/10, 4 C 3/10, 4 C 4/10, 4 C 5/10, 4 C 6/10 –, Rn. 372 – 373)

Im Urteil des Oberverwaltungsgerichts NRW vom 22. März 2017 heißt es hingegen:

"Soweit nach Angaben der Kläger Anwohner des Flughafens in der Zeit zwischen 22.00 und 23.00 Uhr wegen der Beschränkung des Flugverkehrs auf Landungen beim Ausbleiben wechselnder Betriebsrichtungen stärker von Fluglärm betroffen werden als während der Stunden des Tages, verstößt das nicht gegen zwingende Anforderungen der Gewichtungsvorgabe des § 29b Abs. 1 Satz 2 LuftVG. Auch bezogen auf die Beachtung dieser Vorgabe darf die Zeit von 22.00 bis 23.00 Uhr nicht isoliert gesehen werden. Entscheidend dafür, ob auf die Nachtruhe der Bevölkerung ausreichend Rücksicht genommen wird, ist das Lärmschutzkonzept für die Gesamtnacht"

(Oberverwaltungsgericht für das Land Nordrhein-Westfalen, Urteil vom 22. März 2017 – 20 D 30/14.AK –, Rn. 88 – 92")

Der Gutachter Dr. Dirk Schreckenberger von der ZEUS GmbH, Hagen, wurde gebeten, den Sachverhalt in Bezug auf die Fluglärmbelastung von Menschen, die am Flughafen Düsseldorf unter der Anfluggrundlinie wohnen aus Sicht der Lärmwirkungsforschung zu bewerten und in einer Stellungnahme insbesondere auf folgende Fragen einzugehen:

1. Lässt sich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung feststellen, dass nach den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden die erste Nachtstunde (22 bis 23 Uhr) regelmäßig als „Verlängerung des Flugbetriebs während des Tages“ oder gar so wahrnehmbar ist, dass „die Nacht zum Tag“ gemacht wird (also die Belastung in dieser Stunde als stärker belastend wahrgenommen wird, als während des Tages)?
2. Lässt sich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung feststellen, dass nach den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden die erste Nachtstunde eine Stunde ist, in der die Fluglärmbelastung der Anwohner in der Regel größer ist als in den Abendstunden?
3. Lässt sich das in der Rechtsprechung aus § 29b LuftVG in Verbindung mit dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz entwickelte „Konzept eines Ab- und Anschwellens des Flugverkehrs“ vom Tag in die Nacht und umgekehrt – auch – auf Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung stützen?
4. Ist es aus Lärmwirkungssicht zum Schutz der Bevölkerung vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Lärm geboten, die Fluglärmbelastung in den ersten Nachtstunden gegenüber der Fluglärmbelastung am Tage und/oder in den Abendstunden abzusenken?
5. Bedarf es aus Lärmwirkungssicht bei der aus den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf ersichtlichen Belastung der unter der Anfluggrundlinie Wohnenden in der ersten Nachtstunde unter Berücksichtigung der verbleibenden Nachtruhe eines besonderen Ausgleichs? Wie könnte ein solcher Ausgleich aus Lärmwirkungssicht erfolgen?

2 Zusammenfassung der Beantwortung der zur Stellungnahme vorgelegten Fragen

Fragestellung 1 – Wahrnehmung der Belastung in der ersten Nachtstunde 22-23 Uhr

Lässt sich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung feststellen, dass nach den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden die erste Nachtstunde regelmäßig als „Verlängerung des Flugbetriebs während des Tages“ oder gar so wahrnehmbar ist, dass „die Nacht zum Tag“ gemacht wird (also die Belastung in dieser Stunde als stärker belastend wahrgenommen wird, als während des Tages)?

Dem Gutachter wurden Informationen zu Flugbewegungen und Fluglärmpegel am Flughafen Düsseldorf von Bürger gegen Fluglärm e.V. vorgelegt (Abschnitt 3.1). Aus ihnen geht hervor, dass über die vergangenen Jahre im Durchschnitt in der Stunde 22-23 Uhr ca. 8 (bzw. 5) mehr Landungen als in der Stunde davor sowie ca. 6-7 mehr Landungen (bzw. 3) gegenüber der Spitzenstunde am Tage (6-22 Uhr) in den sechs verkehrsreichsten Monaten (bzw. im Gesamtjahr) stattgefunden haben. Zwar sind hierbei die Starts nicht mitgezählt, allerdings entfallen diese in der Stunde 22-23 Uhr und außerdem erleben die je nach Betriebsrichtung 05 bzw. 23 unter der Anfluggrundlinie Wohnenden nur die Landungen, sofern in Wohngebieten unter überlagerten An- und Abflugpfaden nicht regelmäßig die Betriebsrichtungen ein oder mehrmals am Tag wechseln. Somit ergibt sich aus den vorgelegten Zahlen bezogen auf die Landungen ein Anschwellen der Zahl der Flugbewegungen in der Stunde 22-23 Uhr.

Im Hinblick auf die Änderung der Fluglärmpegel in der Stunde 22-23 Uhr zeigen Messwerte an drei DFDL-Messstellen im September 2024 exemplarisch folgendes Bild (Tabelle 6). Die Messwerte zeigen deutlich höhere Flugbewegungszahlen in den Stunden 22-23 Uhr im Vergleich zu den Abendstunden davor bei entweder vergleichbar hohen Modalwerten oder um ca. 10 dB niedrigeren Modalwerten. In den Stunden, in denen die Modalwerte der Einzelpegel in den Abendstunden vor 22 Uhr so hoch sind wie in der Stunde 22-23 Uhr oder, wie an der Messstelle Lohhausen 1 um 5-10 dB höher, handelt es sich um Stunden mit deutlich geringeren Flugbewegungszahlen als in der Stunde 22-23 Uhr, so dass der Dauerschallpegel für diese Stunden, der sich aus der Höhe der Einzelpegel und der Zahl der Geräuschereignisse im Bezugszeitraum speist, geringer ausfallen sollte als der Dauerschallpegel in der Stunde 22-23 Uhr.

Tabelle 1: Übersicht der Modalwerte der A-bewerteten Einzelpegel von Überflügen zu ausgewählten Stunden im September 2024 in dB, abgeschätzt auf Basis der in Abbildung 3 (S. 14) dargestellten Messwerte.

DFDL-Messstelle	Modalwerte der A-bewerteten Einzelpegel von Überflügen zu ausgewählten Stunden in dB im September 2024				
	22-23 Uhr	21-22 Uhr	20-21 Uhr	19-20 Uhr	18-19 Uhr
Lohhausen 1	ca. 80 dB	ca. 85 dB, aber in geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 75-80 dB, aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 85-90 dB, aber in geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 85-90 dB, aber in geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr
Tiefenbroich	ca. 80 dB	ca. 65-70 dB	ca. 80 dB aber in deutlich	ca. 70 dB	ca. 70 dB

			geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr		
Brüderich	ca. 80 dB	ca. 70 dB	ca. 80 dB, aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 80 dB, aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 70 dB

Ausgehend von den von Bürger gegen Fluglärm e.V. vorgelegten Zahlen liegt der Stundendauerschallpegel 22-23 Uhr an zwei der drei DFLD-Messstellen Messstellen Tiefenbroich, Lintorf und Kettwig-Schmachtenberg. in den sechs verkehrsreichsten Monaten im Jahr 2024 regelmäßig um 2 bis knapp 5 dB im $L_{Aeq,1h}$ über dem Tagesdauerschallpegel $L_{Aeq,Tag}$ und um 3 bis 4 dB über dem Stundenpegel $L_{Aeq,1h}$ in der Abendstunde 21-22 Uhr und um 2 dB über dem Stundenpegel $L_{Aeq,1h}$ in der Stunde 20-21 Uhr. Es handelt sich hierbei um Größenordnungen in der Differenz sowohl was die Zahl der stündlichen Flugbewegungen betrifft als auch die resultierenden Unterschiede in den Stundendauerschallpegeln, die wahrnehmbar sind (Ortscheid & Wende, 2004; Haubrich et al., 2020). Rechnet man noch den Belästigungs-Malus für den erhöhten Ruheanspruch in der Stunde 22-23 Uhr gegenüber den Abendstunden ab 20 Uhr in Höhe von rd. 5 dB hinzu (vgl. Abbildung 21, S. 36), dann kann geschlussfolgert werden, dass der Anstieg der Landungen in der Stunde 22-23 Uhr nicht nur als Verlängerung des Tages-Flugbetriebs wahrnehmbar ist, sondern auch für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden als deutlich belästigungssteigernd einzustufen ist; hinzu kommt dabei noch der Change-Effekt in der Lärmbelastung aufgrund von Fluglärmänderungen im Tagesverlauf äquivalent zu einem A-bewerteten Differenzpegel von 7,5 dB (vgl. Abschnitt 3.8.3.2).

Fragestellung 2 – Beeinträchtigung durch die Flugverkehrsgeräuschbelastung in der ersten Nachtstunde im Vergleich zur Geräuschbelastung in den Abendstunden

Lässt sich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung feststellen, dass nach den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden die erste Nachtstunde eine Stunde ist, in der die Fluglärmbelastung der Anwohner in der Regel größer ist als in den Abendstunden?

Mit Verweis auf die Antwort zur Fragestellung 1 sowie folgenden Ausführungen wird dies bejaht.

- Die besondere Gestörtheit und Belästigung durch Fluglärm in der Stunde 22-23 Uhr ist aufgrund des höheren Ruheanspruchs zu dieser Stunde bei vergleichbarer Geräuschbelastung höher als die Belästigung in den Abendstunden; der Unterschied entspricht einem Malus gegenüber den Abendpegeln ab 20 Uhr von ca. 5 dB (vgl. Abbildung 21, S. 36).
- Die fluglärmbedingte Schlafgestörtheit ist vor allem zu Nachtrandstunden, also zu Beginn der Nacht in der Phase des Einschlafens und am Ende der Nacht aufgrund verfrühten Aufwachens in den Morgenstunden aufgrund von Fluglärm erhöht. Dies gilt sowohl für selbstberichtete Schlafgestörtheit (Abbildung 24, S. 38; Abbildung 22, S. 37), als auch für die physiologisch erfasste Schlafqualität (Abbildung 9, S. 23), Abbildung 12, S. 26).

- In der Einschlafphase betrifft dies weniger die physiologischen Aufwachreaktionen, definiert als Wechsel in die Schlafstadien S1 (leichtester Leichtschlaf) und Wach, sondern die Schwierigkeiten einzuschlafen bzw. in den Tiefschlaf zu gelangen, verbunden mit höheren Wachanteilen im Vergleich zu Nächten ohne Fluglärm.
- Je mehr sich Schlafperioden mit verkehrsreichen Stunden überlagern, umso stärker sind die Schlafstörungen (vgl. Abschnitt 3.5.1.6, S. 25), weswegen sich „frühschlafende“ Erwachsene (mit Schlafzeit vor 23:00 Uhr, vgl. Abbildung 23, S.38) durch den Nachtpegel stärker belästigt fühlen als „Spätschlafende“ (Schlafzeitbeginn nach 23:30 Uhr).
- Vor allem Kinder, die beispielsweise im Grundschulalter im Durchschnitt eine Schlafzeit von 21 bis 7 Uhr haben, sind vom Fluglärm in der Stunde 22-23 Uhr betroffen, da bei höherer Fluglärmexposition die Tiefschlafdauer verkürzt ist, die Einschlafzeit verlängert und schließlich die Schlafeffizienz tendenziell verringert ist. Das wiederum kann Auswirkungen auf die kognitive Entwicklung von Kindern haben, wenn insbesondere ihre Wissensverarbeitung und -konsolidierung im Tiefschlaf stattfindet und gerade diese Phase bei Schlafbeginn um 21 Uhr in die Stunde 22-23 Uhr fällt und dann beeinträchtigt wird.

Fragestellung 3 – Beurteilung des Konzepts eines Ab- und Anschwellens des Flugverkehrs Tag/Nacht und umgekehrt aus Lärmwirkungssicht

Lässt sich das in der Rechtsprechung aus § 29b LuftVG in Verbindung mit dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz entwickelte „Konzept eines Ab- und Anschwellens des Flugverkehrs“ vom Tag in die Nacht und umgekehrt auch auf Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung stützen?

Dies wird mit „ja“ beantwortet werden. Das unterschiedliche Ruhebedürfnis in der Nacht relativ zum Tag zeigt sich am prägnantesten an der Bonus-Malus-Darstellung von Brink et al. (2010). – vgl. Abbildung 21, S. 36).

Danach steigt in den Abendstunden, teils auch ab den späten Nachmittagsstunden die Belästigungs-/Störungsempfindung bis in die Nachtstunden an und in den Nachtstunden von 22-23 Uhr sowie in der letzten Nachtstunde 5-6 Uhr einen Höhepunkt im Malus erreichen. Relativ zu den Abendstunden ab 20 Uhr davor, besteht in der Stunde 22-23 Uhr ein erhöhter Ruheanspruch äquivalent zu einem 5 dB Malus.

Fragestellung 4 – Prüfung der Notwendigkeit einer Absenkung der Flugverkehrsgeräuschbelastung in der ersten Nachtstunde für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden

Ist es aus Lärmwirkungssicht zum Schutz der Bevölkerung vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Lärm geboten, die Fluglärmbelastung in den ersten Nachtstunden gegenüber der Fluglärmbelastung am Tage und/oder in den Abendstunden abzusenken?

Auch diese Frage wird mit „ja“ beantwortet.

Dafür sprechen Befunde

- zu den schlafbeeinträchtigenden Wirkungen des Fluglärms (Kapitel 3.5);
- zu den Gesundheitsrisiken, die durch nächtlichen Fluglärm und durch Störungen des Schlafs entstehen (Kapitel 3.6);

- zur Bedeutung, die ein gesunder, ungestörter Schlaf für im Schlaf stattfindende, notwendige Gedächtnisprozesse hat, kognitive Prozesse, die gerade auch für eine gesunde, geistige Entwicklung von Kindern notwendig sind.
- – all dies spricht aus Lärmwirkungssicht dafür, dass beginnend in den späten Abendstunden, die ersten Nachtstunden eine lärmsensible Tageszeit sind, die im besonderen Maße Schutz erfordern. Zwar finde sich immer wieder Aussagen darüber, dass lärmbedingte, physiologische Aufwachreaktionen in der zweiten Nachthälfte im stärkeren Maße auftreten als in der ersten Nachthälfte. Aber, zum einen sind diese Aufwachreaktionen eng definiert als Schlafstadienwechsel in S1 (Leichtschlaf) und Wach; andere Schlafstörungen wie Latenzen beim Einschlafen oder Erreichen des Tiefschlafs oder die Schlafenttiefung, d.h. ein (z.B. lärmbedingter) Wechsel von Tiefschlaf in Leichtschlaf S2 oder REM-Schlaf, fallen hierbei raus. Zum anderen ist die Aufwachwahrscheinlichkeit am Ende der Nacht ohnehin höher, da die Entmüdung zunimmt. Deshalb ist fluglärmbedingtes Aufwachen in dieser Phase gesundheitlich anders zu bewerten als Störungen, die das Einschlafen oder das Erreichen und Aufrechterhalten des Tiefschlafs – vor allem in der ersten Nachthälfte – beeinträchtigen.

Für ein Abschwellen der Lärmbelastung bereits ab 22-23 Uhr spricht, dass für einen gesunden Schlaf und zur Vermeidung negativer Nachwirkungen (Tagesschläfrigkeit am Folgetag, Störungen der Gedächtniskonsolidierung, die vor allem im Tiefschlaf, der insbesondere in der ersten Nachthälfte auftritt) wichtig ist), der Einschlafprozess und das Fallen in sowie Verbleiben im Tiefschlaf nicht gestört werden darf. Dies gilt vor allem für Kinder, die im Grundschulalter im Mittel eine Schlafzeit von 21:00 bis 07:00 Uhr haben. Zwar ist die Aufwachwahrscheinlichkeit, definiert als ein Schlafstadienwechsel in den leichtesten Leichtschlaf (S1) und Wach, in der zweiten Nachthälfte aufgrund der stattfindenden Entmüdung höher, allerdings ist ein lärmbedingtes Aufwachen in zeitlicher Nähe zu dem geplanten Aufwachen in der gesundheitlichen Bedeutung anders zu bewerten als ein lärminduziertes, nicht spontanes und nicht geplantes Aufwachen in der ersten Nachthälfte. Mögliche teilweise Kompensationen von Störungen in der ersten Nachthälfte während einer ruhigen zweiten Nachthälfte sind beschränkt, wenn ein Aufstehen zu fixen Zeit erforderlich ist, der Fluglärm dann wieder anschwillt und die psychischen und physischen Bewältigungskosten im Nachgang, die das Bemühen um die Aufrechterhaltung des Gesamtschlafs erforderlich sind, unberücksichtigt bleiben.

Fragestellung 5 – Prüfung des Ausgleichsbedarfs für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden

Bedarf es aus Lärmwirkungssicht bei der aus den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf ersichtlichen Belastung der unter der Anfluggrundlinie Wohnenden in der ersten Nachtstunde unter Berücksichtigung der verbleibenden Nachtruhe eines besonderen Ausgleichs? Wie könnte ein solcher Ausgleich aus Lärmwirkungssicht erfolgen?

Das aus den vorliegenden Zahlen (vgl. Kapitel 3.1) ableitbare Anschwellen von Flugbewegungen und resultierenden Fluglärmbelastungen für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden in der ersten Nachtstunde von 22-23 Uhr stellt eine belästigungs- und störungssteigende Verteilung der Flugbewegungen über den Tag dar. Der Anstieg des Aufkommens landender Flugzeuge zu dieser Tageszeit hat eine andere (höhere) Belästigungswirkung als es ein vergleichbarer Aufkommensanstieg zu anderen Tagesstunden, z.B. frühen Nachmittagsstunden bedeuten würde.

Eine Verrechnung in einer Gesamtbetrachtung, wonach bezogen auf die gesamte Flughafenregion ein Abschwellen des Fluglärms zur Nachtzeit hin stattfindet, stellt aus Lärmwirkungssicht kein Konzept dar,

um betroffene Anwohnende vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Fluglärm zu schützen. Eine Verrechnung der Fluglärmbelastungen in der ersten Nachtstunde mit der anschließenden Nachtruhe schützt Anwohnende ebenfalls nicht, da eine etwaige Kompensation von Schlafstörungen zu Beginn der Nacht nicht vollständig erfolgt und Nachwirkungen in Form von Leistungsdefiziten und Tagesmüdigkeit auftreten, gerade im Bemühen im Falle von Schlafstörungen darum, lärmbedingte Veränderungen in der Makrostruktur des Schlafs gering zu halten.

Ein Ausgleichsbedarf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden ist nachvollziehbar und aus Lärmwirkungssicht begründbar. Grundsätzlich gibt es dabei verschiedene Ausgleichsoptionen – eine Abkehr von der verbleibenden Nachtruhe dabei ausgeschlossen – von denen hier drei genannt werden. Für alle Optionen gilt, dass für deren Realisierbarkeit die Erfüllung weiterer Kriterien (z.B. Flugsicherheit) geprüft werden muss und sie nicht allein aus Sicht der Lärmwirkungsforschung abschließend bewertet werden können, da hierzu technische, organisatorische und regulatorische Aspekte einzubeziehen sind.

- a) (Monetäre) Kompensation aufgrund des Anschwellens des Flugverkehrsaufkommens (Landungen) in der ersten Nachtstunde.
- b) Reduktion eines Teils der Landungen in der ersten Nachtstunde und ggf. Umverteilung auf Tagesstunden tagsüber zwischen 6 und 22 Uhr.
- c) Die Einführung einer alternierenden Pause in den Landungen um 22-23 Uhr, in der Form wie es in Großbritannien durch operative Verfahren durchgeführt wird (Department for Transport, 2017). Das könnten unter (b) erwähnte Umverteilungen von Landungen auf andere Tagesstunden sein, die aber nicht fix festgelegt werden, sondern alternierend eingeführt werden.

Die grundsätzliche Option der monetären Kompensation ist aus Lärmwirkungssicht kritisch zu bewerten, da das Aufrechnen von Gesundheit gegenüber materiellen Vorteilen ethisch bedenklich ist und zum anderen eine interventions-induzierte Ungleichheit bedeuten kann, wenn gerade einkommensschwache Personen durch monetäre Kompensation dazu verleitet werden, Gesundheitsrisiken in Kauf zu nehmen.

Strenggenommen sind sowohl die Lärmbetroffenen als auch das Flugverkehrs- bzw. Fluglärmmanagement vor Ort diejenigen, die die eigentliche Expertise für die Identifikation geeigneter Ausgleichsmaßnahmen haben. Befunde aus der Lärmwirkungsforschung legen die Mitwirkung aller Beteiligten bei der Findung von Ausgleichsmaßnahmen nahe da umgekehrt der wahrgenommene Mangel daran sowie damit verbunden eine als mangelnd erlebte Fairness von Entscheidungsprozeduren die Situation für Lärmbetroffene nur verschlimmert. Internationale Beispiele, z.B. aus Großbritannien wie eine Einbeziehung der Perspektive von Lärmbetroffenen in eine Flugroutenplanung erfolgen kann, liegen vor (vgl. Abschnitt 4.1.5).

3 Hintergrund

3.1 Flugbewegungen am Flughafen Düsseldorf

3.1.1 Flugbetrieb zu Nachtstunden 22 bis 6 Uhr am Flughafen Düsseldorf

Der Flugbetrieb zu Nachtstunden von 22 bis 6 Uhr folgt folgenden Regelungen:

Aus dem Angerlandvergleich vom 13.05.1965:

- Nachtstartverbot 22-6 Uhr;
- die Begrenzung der Benutzung der zweiten Start- und Landebahn auf Spitzenzeiten oder als Ersatz bei nicht verfügbarer Hauptstartbahn;
- die Verpflichtung des Flughafens zum nach dem Stand der Technik bestmöglichen Schutz der Bevölkerung vor Lärm.

Nach der Betriebsgenehmigung vom 09. November 2005

- 22 – 23 Uhr:
 - Die Anzahl der koordinierten Landungen beträgt bis zu 33
 - keine Starts
- 23 – 06 Uhr:
 - Keine Koordination von Flugbewegungen;
 - Starts und Landungen sind möglich
 - für Propellerflugzeuge mit Lärmzeugnis bis 9 t und ohne Lärmzeugnis;
 - wenn der Flughafen als Ausweichflughafen aus meteorologischen oder Sicherheitsgründen genutzt werden muss;
 - für Landungen besteht eine Verspätungstoleranz bis 23:30 Uhr
 - Strahlflugzeuge mit Düsseldorf als Home Base dürfen verspätet bis 24:00 Uhr und zwischen 5-6 Uhr landen.

3.1.2 Analysen zum Flugbetrieb und der Fluglärmbelastung in der ersten Nachtstunde 22-23 Uhr

Von Bürger gegen Fluglärm e.V. vorgelegte Berechnungen der stündlichen Fluglärmbelastung im Jahr 2024 auf Basis von Messwerten an den Messstellen des Deutschen Fluglärmdienst e.V. (DFLD) zeigen an zwei von drei Messstellen (MS Tiefenbroich und Kettwig/Schmachtenberg), dass der Fluglärm in der Stunde 22-23 Uhr höher ist als in den übrigen Tag-/Nachtstunden davor und danach. An der Messstelle Lintorf ist es die Fluglärmbelastung in der Stunde davor, 21-22 Uhr, die höher ist als im Tagesdurchschnitt und mit 56,8 dB $L_{Aeq,1h}$ an den maximalen Stundenpegel von 57,2 dB $L_{Aeq,1h}$ (Stunde 6-7 Uhr) heranreicht (Abbildung 1).

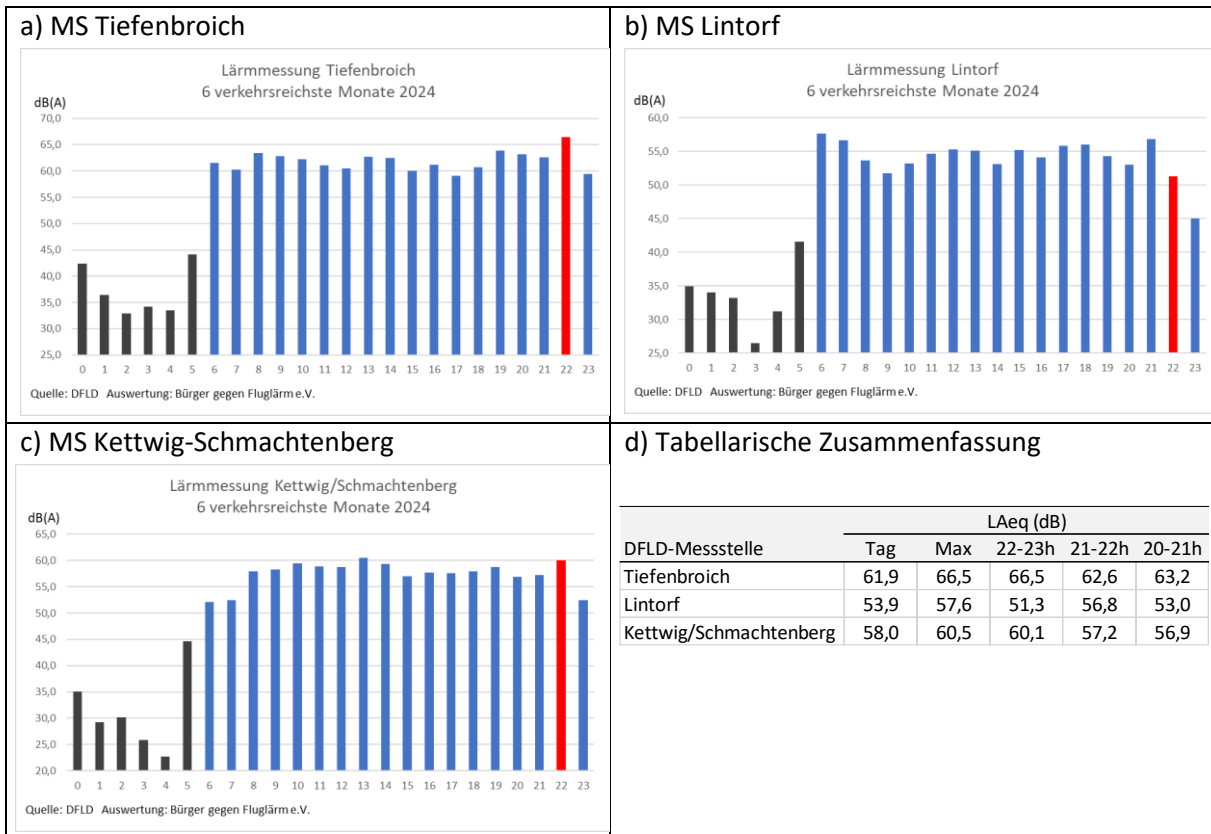


Abbildung 1: Stundendauerschallpegel des Fluglärms im Tagesverlauf in den 6 verkehrsreichsten Monaten des Jahres 2024 an den drei DFLD-Messstellen Tiefenbroich, Lintorf und Kettwig-Schmachtenberg. Quelle: Bürger gegen Fluglärm e.V.

Eine von Bürger gegen Fluglärm e.V. vorgelegte Statistik der Flugbewegungen, insbesondere Landungen in den Jahren 2012 bis 2024 (Tabelle 2 und Abbildung 2) zeigt im Verlauf über diese Jahre am Flughafen Düsseldorf im Durchschnitt in den sechs verkehrsreichsten Monaten ca. 8 mehr Landungen in der Stunde 22-23 Uhr im Vergleich zur Stunde davor, 21-22 Uhr. Bezogen auf die Landungen jeweils im Gesamtjahr sind es ca. 5 Landungen mehr. Gegenüber der Stunde am Tag (6-22 Uhr) mit der höchsten Zahl an Landungen (Spitzenstunde), sind es in der Stunde 22-23 Uhr im Durchschnitt 6-7 mehr Landungen in den sechs verkehrsreichsten Monaten bzw. ca. 3 mehr Landungen im Vergleich zur Spitzenstunde tagsüber .

Tabelle 2: Übersicht über Flugbewegungen, insbesondere Landungen am Flughafen Düsseldorf in den Jahren 2012 bis 2024 (Quelle: Bürger gegen Fluglärm e.V.)

Monat/Jahr	Flugbewegungen										Anz. Tge.	Differenzen in Landungen				
	Gesamt	Landungen								22-23 vs. 21-22 Uhr		22-23 Uhr vs. Spitzen-Std.				
		alle Std.	Tagstunden 6-22 Uhr			Nachtstunden 22-6 Uhr				geplant		tatsächlich	geplant	tatsächl.		
			alle Std.	21-22 Uhr	Spitzenstunde	geplant 22-23 Uhr	tatsächlich 22-23 Uhr	23-24 Uhr	0-5 Uhr							
6 verkehrsreichste Monate																
Mai - Oktober	2012	113.700	57.083	17,37	20,88	22,25	28,49	27,69	4,39	0,07	184	7,61	6,81	6,24	5,44	
	2013	112.261	56.119	17,21	20,6	21,34	27,4	26,65	2,8	0,07	184	6,80	6,05	6,06	5,31	
	2014	111.601	55.820	16,74	18,16	21,18	30,73	29,68	5,49	0,23	184	12,57	11,52	9,55	8,50	
	2015	111.119	55.582	16,58	17,51	21,02	30,58	30,71	5,73	0,15	184	13,07	13,20	9,56	9,69	
	2016	115.322	57.629	17,1	17,2	20,99	31,46	30,03	9,33	0,17	184	14,26	12,83	10,47	9,04	
	2017	118.057	58.950	17,63	17,37	22,47	29,99	29,82	8,29	0,09	184	12,62	12,45	7,52	7,35	
	2018	113.911	56.864	16,85	21,24	21,43	29,67	29,97	9,02	0,05	184	8,43	8,73	8,24	8,54	
	2019	118.225	59.075	17,64	24,01	24,01	31,16	32,38	6,33	0,03	184	7,15	8,37	7,15	8,37	
	2020	26.028	13.033	4,12	9,05	9,29	6,71	4,59	0,26	0,01	184	-2,34	-4,46	-2,58	-4,70	
	2021	46.830	23.456	7,12	10,34	12,65	14,41	12,11	1,41	0,03	184	4,07	1,77	1,76	-0,54	
	2022	78.802	39.394	11,36	15,86	16,31	24,7	25,49	6,57	0,19	184	8,84	9,63	8,39	9,18	
	2023	85.164	42.572	12,38	18,42	18,42	25,53	27,7	5,38	0,15	184	7,11	9,28	7,11	9,28	
	2024	84.710	42.371	12,45	15,91	17,17	24,68	25,47	5,35	0,15	184	8,77	9,56	7,51	8,30	
Gesamtjahre																
Januar - Dezember	2012	206.456	103.578	16,03	20,3	21,43	23,78	23,59	2,8	0,06	366	3,48	3,29	2,35	2,16	
	2013	199.519	100.014	15,56	19,48	20,43	22,94	22,8	2,07	0,04	365	3,46	3,32	2,51	2,37	
	2014	200.143	100.083	15,4	18,13	21,08	25,16	24,48	3,15	0,12	365	7,03	6,35	4,08	3,40	
	2015	199.160	99.650	15,22	17,28	21,42	25,44	25,74	3,55	0,12	365	8,16	8,46	4,02	4,32	
	2016	205.974	102.948	15,67	17,13	21,45	25,31	25,09	5,31	0,09	366	8,18	7,96	3,86	3,64	
	2017	209.245	104.553	15,98	16,87	22,19	24,54	25,26	5,41	0,06	365	7,67	8,39	2,35	3,07	
	2018	206.318	103.011	15,57	19,85	21,58	26,24	26,88	5,88	0,05	365	6,39	7,03	4,66	5,30	
	2019	214.395	107.151	16,4	22,74	23,2	26,6	27,03	3,96	0,02	365	3,86	4,29	3,40	3,83	
	2020	69.153	34.723	5,5	9,9	10,28	7,88	6,44	0,43	0,03	366	-2,02	-3,46	-2,40	-3,84	
	2021	70.811	35.437	5,51	8,23	9,92	9,89	8,04	0,88	0,02	365	1,66	-0,19	-0,03	-1,88	
	2022	128.133	64.115	9,55	15	15,23	19,42	18,89	3,81	0,1	365	4,42	3,89	4,19	3,66	
	2023	140.302	70.161	10,48	16,48	16,7	20,5	21,02	3,47	0,09	365	4,02	4,54	3,80	4,32	
	2024	143.989	72.044	10,82	15,31	16,16	20,59	20,46	3,2	0,09	366	5,28	5,15	4,43	4,30	
											Durchschnittliche Differenz, 6 verkehrsreichste Monate		8,38	8,13	6,69	6,44
											Durchschnittliche Differenz, Gesamtjahre		5,00	4,80	3,14	2,94

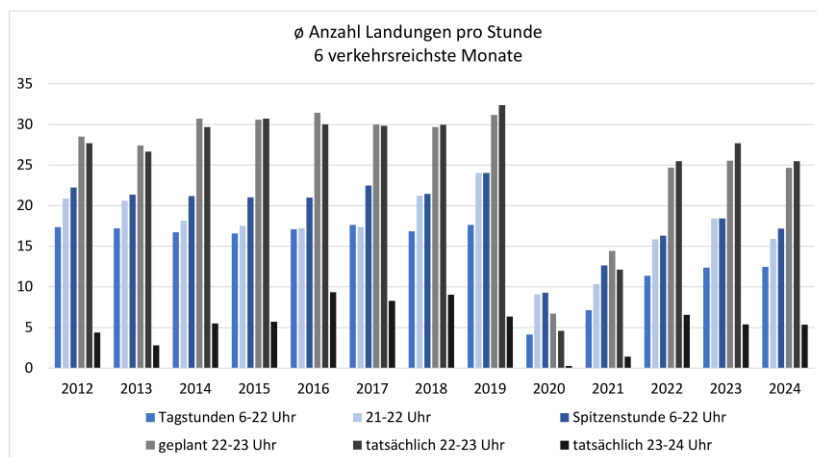


Abbildung 2: Analyse der Anzahl von Landungen am Flughafen Düsseldorf zu verschiedenen Tageszeiten. Quelle: Bürger gegen Fluglärm e.V.

Für einzelne FDG-Messstationen und Monate im Jahr 2024 wurden von Bürger gegen Fluglärm e.V. weiterhin die in Tabelle 3 zusammengefassten Zahlen vorgelegt. Die Tages- und Nachtpegel stammen dabei aus den betreffenden Monats-Messberichten der Flughafen Düsseldorf GmbH (FDG). Der Stundenpegel für die Nachtstunde 22-23 Uhr wurde von Bürger gegen Fluglärm e.V. mittels Umrechner des Deutschen Fluglärmdienst e.V. (DFLD) vorgenommen. Die Umrechnung ergibt, dass der Stundenpegel von 22-23 Uhr um etwa 9 dB über den achtstündigen Nachtpegel liegt. Bei dieser Umrechnung liegen alle Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ oberhalb des Tagespegels $L_{Aeq,Tag}$.

Tabelle 3: Tages- und Nachtpegel an drei FDG-Messstationen und aus der Maximalpegelverteilung tags und nachts abgeleitet der Stundendauerschallpegel von 22 bis 23 Uhr

Landungen				L_{Aeq} (dB)		
Messstation	BR	Monat	Tag	Nacht	22-23h	
11 Tiefenbroich	23	Jul 24	61,3	57,0	66,1	
		Okt 24	62,0	57,2	66,2	
02 Brüderich	05	Sep 24	61,5	55,0	64,1	
01 Lohausen	05	Sep 24	68,2	61,1	70,1	

Die in nachfolgender Abbildung 5 dargestellten Schriebe der Messwerte der unter der Anfluglinie liegenden DFLD-Messstationen Lohausen 1, Tiefenbroich, Brüderich 1 für Messstage im September 2024 zeigt eine starke Zunahme der Anzahl an Flugbewegungen gegenüber den Abendstunden davor. In visueller Inspektion zeigt sich, dass die Einzelpegel der Überflüge ca. 10 dB über den für die jeweilige Messstelle angegebenen achtstündigen Nachtdauerschallpegel, was die in Tabelle 3 dargestellte, abgeschätzte Differenz zwischen dem Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ 22-23 Uhr und dem achtstündigen A-bewerteten Nachtpegel von 9 dB bestätigt.



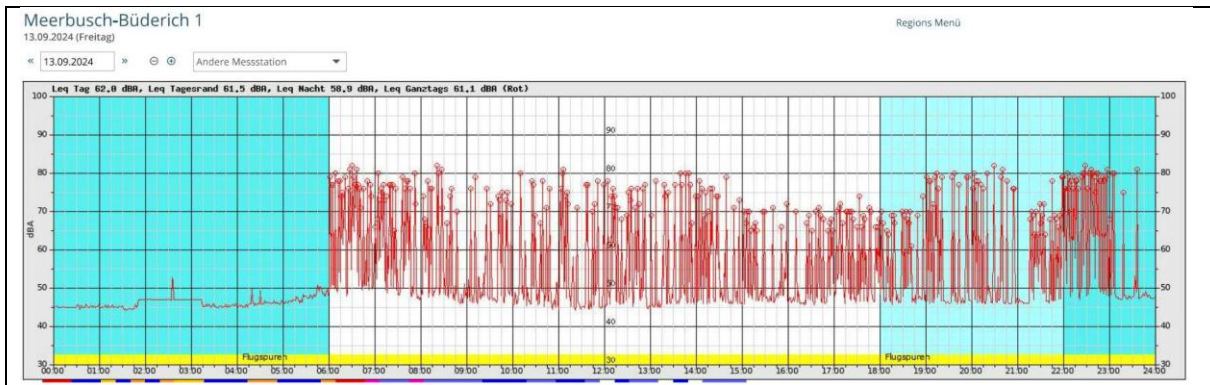


Abbildung 3: Einzelpegel von Überflügen an den DFDL-Messstellen Lohausen 1, Tiefenbroich und Brüderich

Die vorgelegten Daten führen insgesamt zu der Annahme, dass die in der Rechtsprechung entwickelte Anforderung eines Abschwelldes des Fluglärms zur Nacht hin, um den besonderen gesetzlichen Schutz der Nachtruhe zu gewährleisten, am Flughafen Düsseldorf in der ersten Nachtstunde 22-23 Uhr für die unter den Landungsflugpfaden lebenden Anwohnende nicht erfüllt wird.

Die möglichen Auswirkungen davon, werden nachfolgend beschrieben.

3.2 Gesundheitswirkungen von Fluglärm

Fluglärm, wie andere Quellen des Umgebungslärm, kann die Gesundheit von Menschen beeinträchtigen. Grundsätzlich kann Lärm von sehr hoher Intensität eine direkte Wirkung durch Schädigungen des Gehörs verursachen; diese Wirkung ist durch die Lärmpegel, die durch Verkehrsgeräusche und damit durch Fluggeräusche in Wohngebieten verursacht werden, wenig wahrscheinlich. Die durch Fluglärm eigentlich verursachten Gesundheitswirkungen sind indirekt und erfolgen auf der sogenannten extra-auralen Ebene, also jenseits von Hörschäden. Die wesentliche Wirkung von Fluglärm ist dabei die eines Umweltstressors, auf den betroffene Menschen körperlich und psychische und bei langfristigen Einwirkungen dauerhaft reagieren.

Der Lärm versetzt unseren Körper in Alarmbereitschaft, erzeugt also Stressreaktionen. Das heißt, das Gehirn erkennt den Lärm als potenzielle Gefahr und schaltet in den "Stressmodus". Dabei werden über das Nervensystem Hormone freigesetzt, insbesondere die Stresshormone Cortisol, Adrenalin und Noradrenalin. Damit einher geht, ein Anstieg des Blutdrucks und eine Verengung von Blutgefäßen, die Freisetzung der Stresshormone fördern Entzündungen im Körper und können damit langfristig das Herz-Kreislauf-System schädigen. Auch andere Körpersysteme, wie z. B. das Renin-Angiotensin-System, das unseren Wasser- und Salzhaushalt reguliert, werden aktiviert. Das führt zu zusätzlichem Stress für die Blutgefäße – man spricht hier von oxidativem Stress, der unsere Gefäße „altern“ lässt und zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Arteriosklerose) führen kann.

Auf psychischer Ebene reagieren lärm-betroffene Menschen mit dem Erleben von Gestörtheit, Beeinträchtigung von Aktivitäten wie Kommunikation, Konzentration, geistigen Tätigkeiten, Schlaf und dem Erleben von Lärm als belastend. Je häufiger und intensiver der Lärm auftritt und je weniger Ressourcen verfügbar sind, den Lärm zu bewältigen, umso höher ist die resultierende Lärm-belastigung und die Wahrnehmung von Kontrollverlust und Hilflosigkeit, die langfristig psychische Erkrankungsrisiken wie Depression erhöhen kann (Benz & Schreckenber, 2019; Guski et al., 2017; Münzel et al. 2021, 2023).

Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt in Übersicht die Stresswirkung von Umgebungslärm, einschließlich Fluglärm.

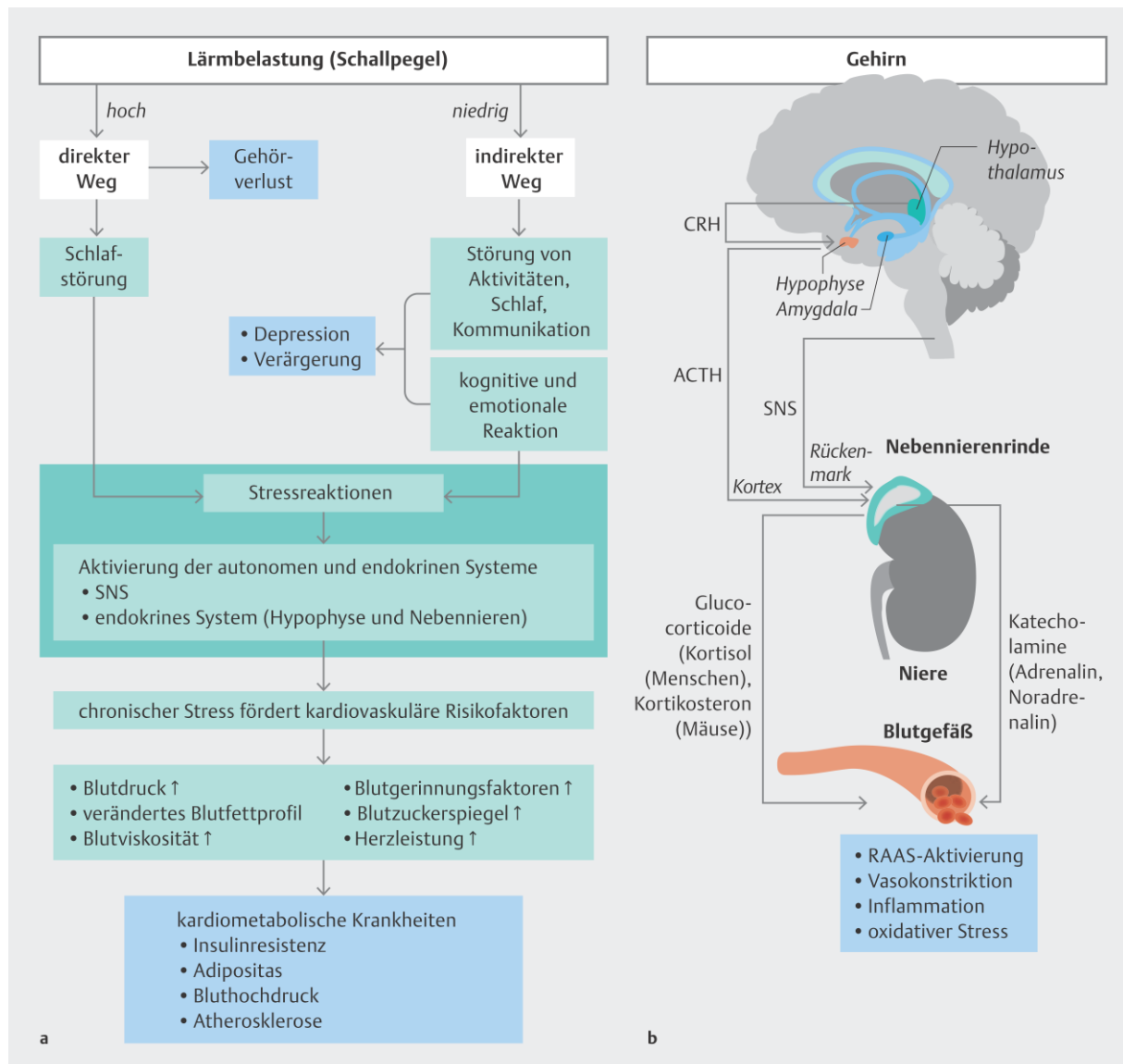


Abbildung 4: Lärm-Stress-Konzept aus Münzel et al. (2023)

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) zählt entsprechend in ihren Leitlinien zum Umgebungslärm (*Environmental Noise Guidelines, ENG*) von 2018 die folgenden als entscheidend (*critical*) bezeichneten Gesundheitswirkungen des Umgebungslärms auf, für die – mit Ausnahme von Hörbeeinträchtigung und Tinnitus, die stärker im Arbeits- und Freizeitlärmbereich relevant sind – allesamt die Evidenz einer Fluglärmwirkung in Wohngebieten im Flughafenumfeld nachgewiesen ist:

- Herz-Kreislauferkrankungen
- hochgradige Schlafstörungen
- hochgradige Lärmbelästigung
- Beeinträchtigung kognitiver Leistungen (insbesondere bei Kindern und insbesondere durch Fluglärm)
- Hörbeeinträchtigung, Tinnitus

Daneben listet die WHO ENG sogenannte bedeutsame (*important*) Gesundheitswirkungen des Umgebungslärms auf, die sich von den entscheidenden Wirkungen zum damaligen Zeitpunkt (Forschungsstand 2014/2015) durch eine geringere bzw. weniger robuste Evidenz unterscheiden:

- Negative Geburtseffekte
- Lebensqualität, Wohlbefinden und psychische Gesundheit
- Metabolische (den Stoffwechsel betreffende) Gesundheitswirkungen

Die von der WHO ausgesprochenen Empfehlungen zur Begrenzung der Beurteilungspegel (L_{den} , L_{night}) basieren auf umfangreiche systematische Analysen (systematic evidence reviews) des Forschungsstands bis 2014/2015 zu den Gesundheitswirkungen des Umgebungslärms¹. Für Fluglärm empfehlen die WHO ENG als „Leitlinienwerte“ (*Guideline Exposure Level*) für den Tag-Abend-Nacht-Pegel L_{den} einen Wert von 45 dB und für den Nachtpegel L_{night} einen Wert von 40 dB.

Verschiedene Aktualisierungen des Forschungsstands, der den WHO ENG zugrunde liegt, bestätigen die in den WHO ENG dargestellte Evidenz u.a. für die Gesundheitswirkung des Fluglärms (Benz et al., 2022; Clark et al., 2020; Guski et al., 2023; van Kamp et al., 2020; s. auch Deutscher Bundestag, Wissenschaftlicher Dienst, 2025). Sie finden zudem auch für die bedeutsamen (*important*) Wirkungen weitere Evidenz für eine Wirkung des Fluglärms, u.a. für erhöhte Risiken der Stoffwechselerkrankung Diabetes Typ 2 und einer Depressionserkrankung (Benz & Schreckenber, 2019; Benz et al., 2022; Clark et al., 2020; Guski et al., 2023; Seidler et al., 2023).

Basierend auf den WHO-Umgebungslärm-Leitwerten (*guideline exposure levels*) zeigen die neuesten Zahlen der Europäischen Umweltagentur (EEA, 2025), dass in Deutschland allein durch Fluglärm jährlich 960 Fälle vorzeitiger Sterblichkeit auftreten und pro 100.000 Einwohnende jährlich 30 gesunde Lebensjahre (DALYs) verloren gehen. EU-weit führt Fluglärm von mehr als 40 dB L_{night} zu 7.200 verlorene gesunde Lebensjahre (DALYs) allein aufgrund hochgradiger Schlafgestörtheit.

3.3 Konzept und Erfassungsmethoden zu den Gesundheitswirkungen des nächtlichen Fluglärms

Schlafstörungen sind zentrale Gesundheitswirkungen von Fluglärmbelastungen. Schlaf ist essenziell für eine gute Gesundheit. Für einen gesunden Schlaf eines Erwachsenen gibt die American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society in einer Gesamt-Konsensempfehlung eine Schlafdauer von etwa 7 bis 9 Stunden an (Watson et al., 2015).

In Bezug auf die Wirkung nächtlichen Fluglärms unterscheidet die Lärmwirkungsforschung psychische und physische Wirkungen auf akuter bzw. ereignisbezogener Ebene, bezogen auf die ganze Nacht, den Folgetag und schließlich chronische Gesundheitseffekte. Dies zeigt nachfolgende Abbildung aus Porter et al. (2000).

¹ https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/WHO_reviews

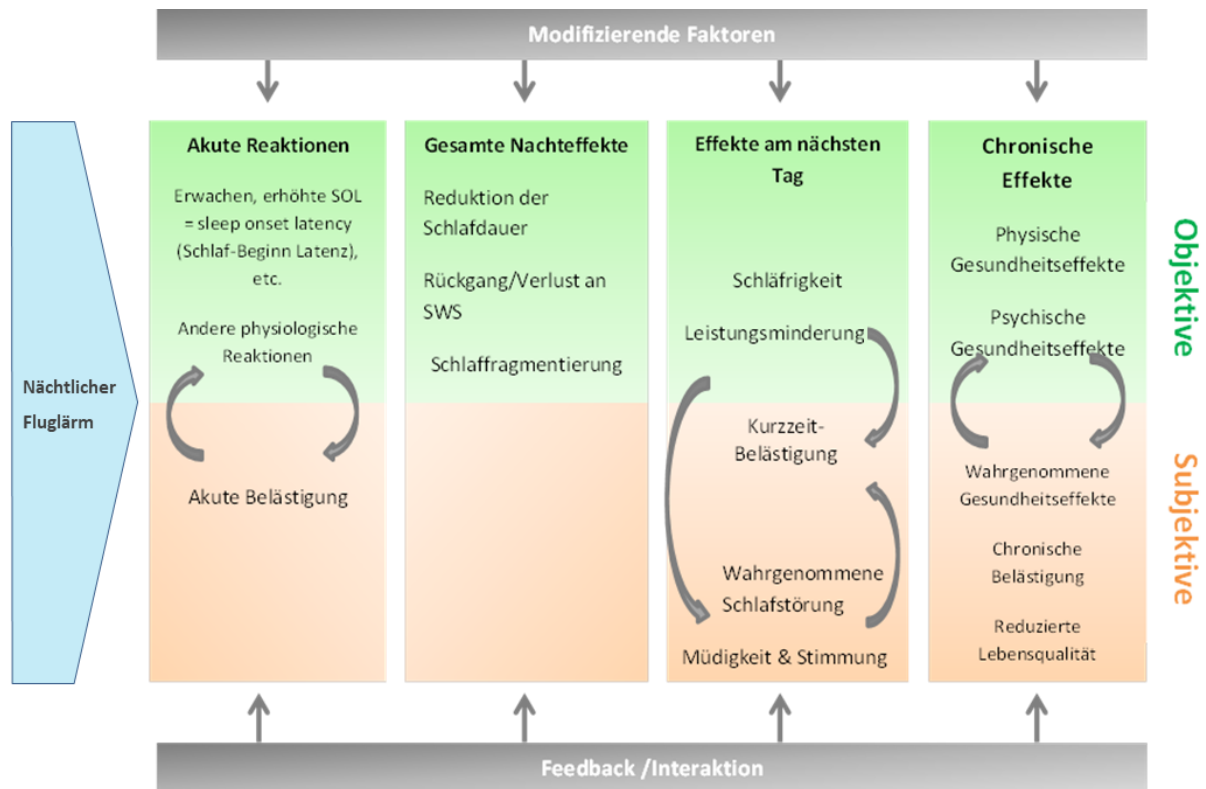


Abbildung 5: Wirkung nächtlichen Fluglärms (Quelle: Modifizierte, eigene Darstellung nach Porter et al., 2000)

Die folgenden Wirkungen nächtlichen Lärms werden dabei betrachtet (Benz et al., 2022; Guski et al., 2012; Porter et al., 2000):

Retrospektiv erfasste Wirkungen im Rahmen von Befragungen:

- häufig retrospektiv über die vergangenen (meist 12) Monate erfragten lärmbedingten Störungen des Schlafs;
- selbstberichtete Schlafqualität (oft über die vergangenen Wochen) anhand von standardisierten Fragebögen bzw. Testverfahren zur Erfassung der Schlafqualität. Der Bezug zum Lärmpegel/zur Geräuschbelastung wird statistisch anhand von Expositions-Wirkungsanalysen hergestellt.

Akute Erfassung:

- signalisiertes Aufwachen durch Teilnehmende, bspw. durch Drücken eines Knopfes auf einem Erfassungsgerät;
- Erfassung von Schlaf-Wach-Rhythmus über Bewegungsmessgerät am Handgelenk (Aktimetrie);
- Messung von Stresshormonausschüttungen, z. B. Cortisol (insbesondere in älteren Laborstudien genutzt);
- Polysomnographie, welche unterschiedliche biologische Parameter während der Nacht, anhand derer die Schlafzyklen inkl. der verschiedenen Schlafstadien (Einschlafphase, leichter Schlaf, Tiefschlaf und REM- oder Traumschlaf) und dem Schlafstadienwechsel, darunter „Aufwachen“ misst;

- Kombination von Erhebungsmethoden (z. B. Herzrate und Körperbewegung; Basner, Witte & McGuire, 2019);
- Messung von zeitnahen Folgen von Schlafstörungen, z. B. Auswirkungen auf Müdigkeit, Belästigung und Leistungsfähigkeit am Folgetag.

Erfassung chronischer Gesundheitsrisiken:

- Erhebung von langfristigen körperlichen und psychischen Erkrankungsrisiken, die auf akustische Kenngrößen des nächtlichen Lärms bezogen werden, zumeist L_{night} , $L_{\text{Aeq,Nacht}}$ (z.B. Greiser & Greiser, 2010; Järup et al., 2008), seltener $L_{\text{Amax,Nacht}}$, oder NAT-Werte für die Nachtzeit (u.a. Seidler et al., 2023; Haubrich et al., 2020)

Eine anerkannte und etablierte Kenngröße zur Messung von **lärmbedingten Schlafstörungen** ist der Prozentanteil hochgradig schlafgestörter Personen (% HSD, *percentage highly sleep disturbed*) oftmals in Bezug auf den nächtlichen Mittelungspegel (L_{night} , $L_{\text{Aeq,Nacht}}$) und basierend auf selbst-berichteten Schlafstörungen. In den Environmental Noise Guidelines gibt beispielsweise die WHO quellenspezifische Leitlinienwerte für den Nachtpegel L_{night} vor, um vor einem relevanten Risikoanstieg im Anteil hochgradig schlafgestörter Personen (% HSD) zu schützen (WHO, 2018). In der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG ist im Anhang III der %HSD-Anteil als einziger Indikator zur Bewertung der gesundheitsschädlichen Auswirkungen des nächtlichen Umgebungslärms, bezogen auf den L_{night} , aufgeführt. Der %HSD-Anteil als Kenngröße nächtlicher Lärmwirkung ist ein Pendant zur ebenfalls etablierten Kenngröße des **Prozentanteils hochgradig lärmbelästigter Personen** (%HA, *percentage highly annoyed*). %HA wird in Expositions-Wirkungsanalysen oftmals mit dem Tagespegel ($L_{\text{Aeq,Tag}}$) oder – international – mit dem Tag-Abend-Nacht-Pegel L_{den} in Beziehung gesetzt. Es liegen aber auch Studien vor, die den %HA-Anteil akut bzw. ereignisbezogen oder bezogen auf die Lärmbelastung innerhalb eines kurzen Zeitraums (z.B. eine Tagesstunde) beziehen und Lärm-belastigungsprofile im Tagesverlauf und damit auch Abend- und frühe Nachtstunden betrachten.

Bezüglich der Erfassung der Wirkungen von Lärm auf den Schlaf mittels physiologischer Messmethoden hat sich in den letzten 20 Jahren vor allem die Polysomnographie auch außerhalb des Labors in Feldstudien in der Wohnumgebung betroffener Anwohner:innen etabliert. Dabei werden mittels verschiedener physiologischer Messgeräte (u.a. EEG, EKG, EMG, EOG) Schlafparameter bezogen auf die gesamte Nacht und als Reaktion im Schlaf auf ein externes Ereignis untersucht (Basner & McGuire, 2018; Guski et al., 2012). In der Forschung zur Wirkung von Lärm auf den Schlaf sind typische untersuchte Parameter jene, die Auskunft über die Schlafstruktur in einer ganzen Nacht geben (Makrostruktur) geben oder akute Weckreaktionen, die durch ein externes Ereignis wie z.B. ein Geräusch hervorgerufen werden können und den Schlaf fragmentieren (Basner & Samel, 2005; Benz et al., 2022; Müller et al., 2015; Griefahn et al., 2008) – s. Tabelle 4.

Tabelle 4 In der Lärmwirkungsforschung verwendete Schlafparameter zur Erfassung der Schlafstruktur

Physiologische Schlafparameter bezogen auf eine Nacht		
Bettzeit	min	Zeit im Bett; Zeitspanne zwischen Löschen des Lichts am Abend und dem Einschalten des Lichts am Morgen (Aufstehen)
Schlafperiodendauer	min	Zeit zwischen dem ersten Auftreten eines Schlafstadiums bis zur letzten Epoche Schlaf (1 Epoche = 30 s)
Gesamtschlafzeit	min	Schlafperiodendauer ohne Wach-Epochen
Schlafeffizienz		Quotient reine Schlafzeit / Gesamtschlafzeit
Einschlaflatenz	min	Zeit von der Bettgezeit (Löschen des Lichts) bis zum ersten Auftreten eines Schlafstadiums (mind. S1).
Schlafstadienanteile	min	Anteile der Schlafstadien (nach Rechtschaffen et al. 1968) Wach, Tiefschlaf (S3, S4), Leichtschlaf (S2, S1), REM an der Schlafperiodendauer
Tiefschlaflatenz	min	Zeit von Schlafbeginn bis zur ersten Tiefschlafepoche S3/S4
Physiologische, akute/ereignisbezogene Schlafparameter		
• Arousal		EEG-/EMG-Frequenzbeschleunigung mit einer Dauer von 3 s bis 10 s; kurzzeitige Aktivierung im EEG und EMG
• Aufwachreaktionen		Mindestens 15 s lang andauernde Aktivierung im EEG und EMG; Wechsel in das Schlafstadium S1 (nicht mehr der Erholung dienend) oder Wach.

3.4 In Fluglärmwirkungsstudien verwendete akustische Kenngrößen der Fluglärmexposition

Ein Großteil der Studien, die die Wirkungen einer Fluglärmexposition auf die Gesundheit untersuchen, verwenden zur Darstellung der Fluglärmexposition auf die Wohnadresse bezogene berechnete Beurteilungspegel, zumeist

- im europäischen Raum den Tag-Abend-Nacht-Pegel L_{den} (mit 5 dB Zuschlag für die Abendzeit und 10 dB Zuschlag für die Nachtzeit) und den achtstündigen Nachtpegel L_{night} (6-22 Uhr bzw. 7-23 Uhr), insbesondere im Rahmen der Lärmaktionsplanung nach der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG;
- im US-amerikanischen Raum den Tag-Nacht-Pegel L_{dn} und den 9-stündigen Nachtpegel L_{night} (22-7 Uhr) und
- im deutschsprachigen Raum den 16-stündigen Tagesdauerschallpegel $L_{Aeq,Tag}$ (6-22 Uhr) und den achtstündigen Nachtdauerschallpegel $L_{Aeq,Nacht}$ (22-6 Uhr), seltener auch den 24-stündigen Gesamttagesdauerschallpegel $L_{Aeq,24h}$ bei dem die Abend- und Nachtpegel im Gegensatz zum L_{den} ungewichtet (ohne Zuschlag) einfließen.

Einige Bevölkerungsstudien in Flughafenregionen zur Fluglärmwirkung berücksichtigen zudem weitere akustische Kenngrößen. Dazu zählt der Maximalpegel, entweder ereignisbezogen, d.h. pro Überflug, oder innerhalb einer definierten Bezugszeit, z.B. in der Nacht, 22 bis 6 Uhr. Eine weitere Kenngröße ist die Anzahl „lauter“ Überflüge, d.h. die Zahl der Überflüge, deren Immissions-Maximalpegel am Wohngebäude einen definierten Schwellenwert überschreiten (*NAT, Number above Threshold*).

So kennt auch das Fluglärmgesetz für die Definition der Nachtschutzzone als Abgrenzungswerte (§2 FluLärmG) den nächtlichen Dauerschallpegel $L_{Aeq,Nacht}$ (22-6 Uhr) und NAT-Werte im Innenraum: an

zivilen Flugplätzen $6x L_{Amax} = 53 \text{ dB}$ bzw. 57 dB an neuen und wesentlich geänderten Flughäfen bzw. an Bestandsflughäfen.

3.5 Ergebnisse physiologische Studien auf den Schlaf

3.5.1 Auswirkungen von Fluglärm auf Parameter des Schlafs einer ganzen Nacht

3.5.1.1 Schlafphasen mit unterschiedlichen Schlafstadien während der Nacht

Im Laufe einer Nacht durchlaufen Menschen mehrere Schlafphasen mit unterschiedlichen Schlafstadien, d.h. mehrmals in der Nacht durchlaufen schlafende Personen die Stadien Tiefschlaf (nach Rechtschaffen et al., 1968, die Stadien S3, S4), Leichtschlaf (S1, S2), Traum- oder REM-Schlaf (REM) und kurzzeitige Wachzustände (Wach). Die Abbildung 6 zeigt ein Beispiel von Schlafphasen, dargestellt in einem sogenannten Hypnogramm, im Laufe einer ca. achtstündigen Nacht (960 30-Sekunden-Schlafepochen).

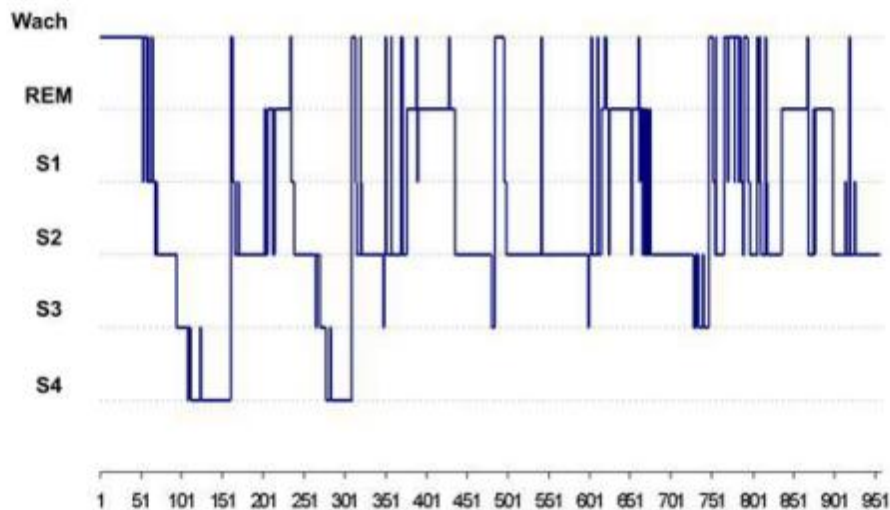


Abbildung 6: Hypnogramm des Schlafs einer Person in einer ungestörten, lärmfreien Nacht (Quelle: Müller, 2021)

Dabei zeigt sich, dass Tiefschlafphasen vor allem in der ersten Nachthälfte auftreten, diese im Laufe der verstrichenen Schlafzeit abnehmen und der Anteil des REM- und Leichtschlafs in der zweiten Nachthälfte hin zu den frühen Morgenstunden zunimmt.

Der Effekt von Fluglärm auf den Schlaf kann anhand von Schlafparametern abgelesen werden, die die Schlafqualität innerhalb einer Nacht beschreiben bzw. auf eine Nacht bezogen aufsummiert werden. Von Interesse sind hierbei Parameter, die in der ersten Nachthälfte relevant sind. Dies sind solche Parameter, die sich auf den Prozess des Einschlafens beziehen und auf den Tiefschlaf, der vor allem in der ersten Nachthälfte auftritt, beziehen.

3.5.1.2 Markov-Analyse fluglärmbedingter Schlafstörungen

Basner und Siebert (2006) führten anhand der DLR Feldstudienendaten am Flughafen Köln/Bonn Markov-Simulationsanalysen durch, um die fluglärmbedingten Schlafstörungen im Verlaufe einer achtstündigen Nacht von 22 bis 6 Uhr zu untersuchen. Bezüglich der Fluglärmbelastung wurde ein Maximalpegelspektrum von ca. 15 dB bis $75 \text{ dB } L_{AS,max,innen}$ mit Verteilungsspitzen zwischen 40 und 50

dB $L_{AS,max,innen}$ betrachtet. Die Anzahl der Flugbewegungen pro Nachtstunde reichte von 8 bis 61 Bewegungen, für eine Person wurden dabei jeweils insgesamt 96 Flugbewegungen (unterschiedlich über die Nacht verteilt) angesetzt. Drei Modelle wurden untersucht: Modell A mit Flugbewegungen überwiegend am Anfang der Nacht und Modell E mit Flugbewegungen überwiegend am Ende der Nacht und ein Ruhemodell ohne Fluglärm in der Nacht.

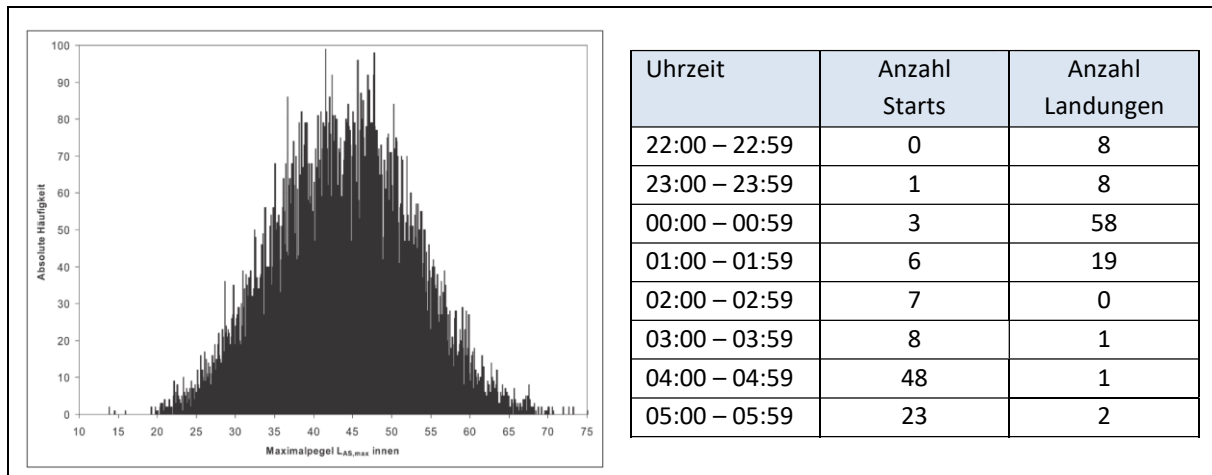


Abbildung 7: Untersuchte Maximalpegelverteilung im Innenraum (links) und Anzahl der Flugbewegungen pro Nachtstunde in der Simulationsstudie von Basner und Siebert (2006)

Die Autoren fanden insgesamt stärkere Schlafstörungen in der zweiten Nachthälfte, konnten aber auch bei Fluglärm in der ersten Nachthälfte Schlafbeeinträchtigungen identifizieren:

- Der mittlere **Wachanteil** war bei Fluglärm in der ersten Nachthälfte gegenüber einer Ruhebedingung tendenziell, im Durchschnitt um 3,8 Minuten erhöht.
- Die **Einschlaf latenz** war mit durchschnittlich 22,3 Minuten in allen Modellen (Lärm- und Ruhemodelle) gleich.
- Die durchschnittliche **Anzahl erinnerbarer Aufwachreaktionen** bei Fluglärm am Anfang (insb. 0-2 Uhr) war mit 3,44 gegenüber dem Ruhemodell (3,22) statistisch signifikant erhöht. Die erinnerbaren Aufwachreaktionen bei Fluglärm am Ende der Nacht war mit 3,44 gleich hoch wie bei Fluglärm am Anfang der Nacht. Erinnerbare Aufwachreaktionen sind besonders nachteilig, da sie die Einschätzung von Schlafqualität und Schlafquantität negativ beeinflussen.
- Im Modell A (Flugbewegungen überwiegend am Anfang der Nacht) wurden am nächsten Morgen 6,8 **Fluggeräusche erinnert**, im Modell E (Flugbewegungen überwiegend am Ende der Nacht) 11,8. Ein nicht unerheblicher Teil erinnerbarer Fluggeräusche wird im Modell A während der Einschlafperiode verursacht (vgl. Abbildung 8). Die Angaben waren dabei hoch korreliert mit der unmittelbar nach dem Aufstehen retrospektiv auf die vergangene Nacht bezogene geäußerte Fluglärmbelastung. In der Studie verlängerte sich zwar die Latenz des Einschlafens gegenüber dem Ruhemodell nicht, aber bei Fluglärm am Anfang der Nacht konnten sich die Untersuchungsteilnehmenden vor allem am nächsten Morgen an diejenigen Flugereignisse erinnern, die während der Einschlafphase auftraten.

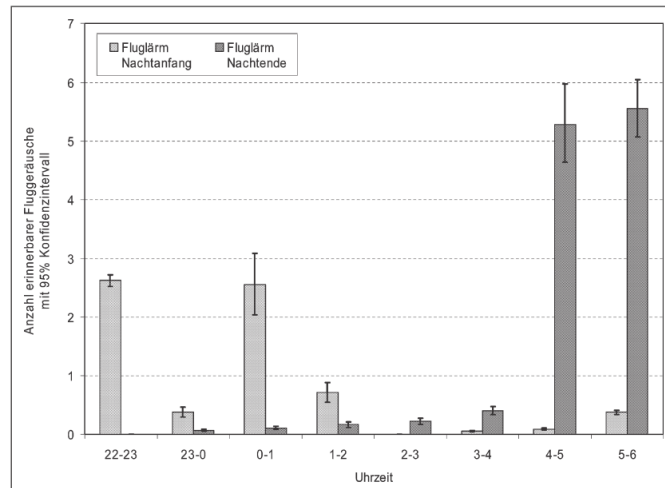


Abbildung 8: Anzahl erinnertes Fluggeräusche in einzelnen Nachtstunden in der Studie von Basner und Siebert (2006). Bildquelle: Basner & Siebert, 2006, Abb. 9

Die Studie bestätigt, dass Bewertungen der Schlafqualität und etwaiger Störungen des Schlafs am ehesten mit physiologischen Messungen des Schlafs in Einschlafperioden, langen Wachzeiten und beim morgendlichen Aufwachen korrelieren (Basner et al., 2010), d.h. Personen über lärmbedingte Störungen zu diesen Zeiträumen gut Auskunft geben können.

In der Simulationsstudie von Basner & Siebert (2006) war eine Unterscheidung von Tief-, REM- und Leichtschlaf nicht möglich. Die Autoren geben an, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit der Tiefschlafanteil bei Flugbewegungen überwiegend am Anfang der Nacht im Vergleich zu Nächten mit Flugbewegungen überwiegend am Ende der Nacht und Nächten ohne Fluglärm reduziert war, wohingegen der S2- und REM-Schlafanteil bei Flugbewegungen überwiegend am Ende der Nacht im Vergleich zu den übrigen zwei Szenarien reduziert war.

3.5.1.3 Wirkung von Fluglärm im Kontext weiterer Verkehrslärmquellen

Basner et al. (2011) untersuchten in einer Laborstudie systematisch die Auswirkungen von Fluglärm, Straßen- und Schienenverkehrslärm einzeln und in Kombination auf den Schlaf. In Nächten, in denen Fluglärm allein und im Kontext der weiteren Verkehrslärmarten untersucht wurde, zeigten sich folgende Wirkungen:

- Die **Dauer des Leichtschlafs S1** (nicht mehr der Erholung dienend) war gegenüber der Ruhenacht verlängert
 - um 3,2 min bei Darbietung von Fluglärm allein und
 - um ca. 3,5-3,8 min bei kombinierter Darbietung mit Straßen und/oder Schienenverkehrslärm
- Die **Tiefschlaf latenz** (die vor allem in der ersten Nachthälfte verortet ist) erhöhte sich
 - um 9,7 min in Nächten mit Fluglärm kombiniert mit Straßenverkehrslärm
 - um ca. 11 min erhöht in Nächten mit Darbietung des Lärms aller Verkehrsarten
- Die **Latenz des REM/Traum-Schlafs** war erhöht
 - um 16 min erhöht in Nächten, in denen intermittierender Lärm (Fluglärm und Schienenverkehrslärm) dargeboten wurde.
- Die **Dauer des Tiefschlafs** war verkürzt

- um ca. 6 min, ebenfalls in Nächten mit intermittierendem Fluglärm und Schienenverkehrslärm.
- **In morgendlichen Befragungen wurden Schlafstörungen wie folgt berichtet:**
 - Die Schlafkontinuität beeinträchtigt (gestört) in allen Nächten, in denen Fluglärm allein oder in Kombination mit weiterem Verkehrslärm auftrat.
 - Die Schlaftiefe wurde als reduziert berichtet in Nächten mit intermittierendem Verkehrslärm (Flug- und Schienenverkehrslärm)
 - In allen Nächten, in denen Fluglärm dargeboten wurde (allein oder in Kombination) wurde eine geringere Erholung und eine erhöhte Schläfrigkeit morgens gegenüber den Ruhenächten berichtet.
- **Leistung**
 - Nach Nächten mit Fluglärm allein oder in Kombination mit Schienenverkehrslärm (beides intermittierender Lärm) waren am Morgen nach einer verstrichenen Nacht im psychomotorischen Vigilanztest zur Messung der Wachsamkeit und Aufmerksamkeit die Reaktionszeiten erhöht, d.h. die Untersuchungspersonen konnten sich weniger gut konzentrieren.

3.5.1.4 Schlafbeeinträchtigungen in verschiedenen Nachtzeitfenstern

Im Rahmen der Schweizer SiRENE-Studie untersuchten Rösli et al. (2019) die Auswirkungen des Straßenverkehrslärms auf den Schlaf mittels Aktimetrie (Messung von Schlafbewegungen). Die Messungen erlaubten die Ableitung der Schlafparameter Schlafeffizienz, (Ein-)Schlaflatenz, Schlafdauer und Schlafbewegungszeit (Zeit von Bewegungen während des Schlafs in Minuten). Darüber hinaus wurde in Befragungen Selbstberichte der Schlafqualität und Schläfrigkeit erhoben. Die untersuchten Verkehrsgeräuschbelastungen betragen bezogen auf die ganze Nacht im Mittel 47 dB $L_{Aeq,Nacht,au\ddot{a}u\text{en}}$ bzw. 30 dB $L_{Aeq,Nacht,innen}$ mit einer Spannweite von 30 dB bis 63 dB $L_{Aeq,Nacht,au\ddot{a}u\text{en}}$ bzw. 22 bis 55 dB $L_{Aeq,Nacht,innen}$. Für die Einschlafperiode fanden die Forschenden eine reduzierte Schlafeffizienz in der Zeit von 19 – 23 Uhr um ca. 2% pro 10 dB Anstieg im Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ und einen Anstieg in der Einschlafzeit um 8 bzw. 6 min pro 10 dB Anstieg im $L_{Aeq,1h}$ im Nachtzeitraum von 19 – 23 Uhr bzw. 23 bis 1:00 Uhr.

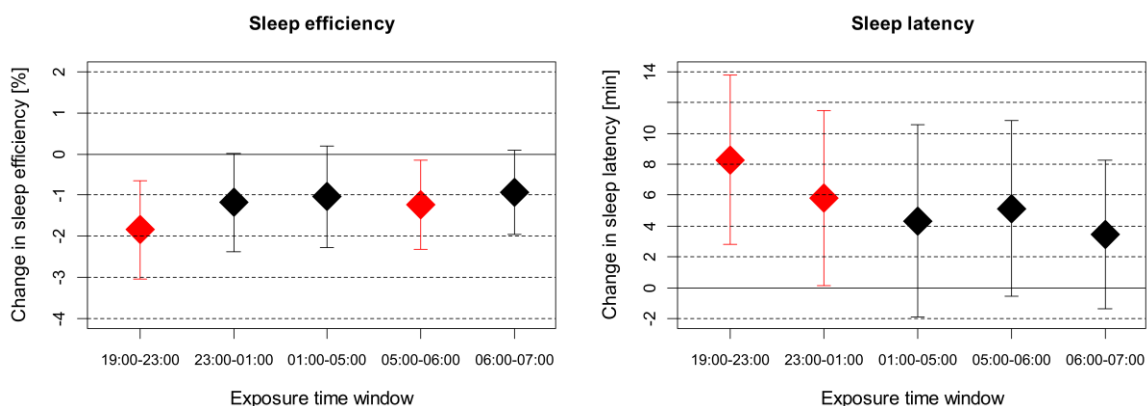


Abbildung 9: Veränderung von Schlafeffizienz (links) und Schlaflatenz (rechts) pro 10 dB Anstieg im Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ des Fluglärms in unterschiedlichen Abend- und Nachtzeitfenstern. Quelle: Rösli et al. (2019)

Da sich die betrachteten fixen Nachturzeiten nicht zwangsläufig mit den Bettzeiten der Untersuchungspersonen decken müssen, betrachteten die Autor:innen auch die Auswirkungen des

Verkehrslärms auf die Schlafeffizienz und Einschlafzeit in Abhängigkeit des Verkehrslärms in den ersten vier Stunden nach Beginn der Bettgezeit und den letzten vier Nachtstunden vor dem Aufstehen. Pro 10 dB Anstieg im $L_{Aeq,1h}$ betrug der Rückgang der Schlafeffizienz 1 bis 1,5% in den ersten vier Nachtstunden und bis knapp 3% in den letzten vier Nachtstunden. Die Einschlafzeit war in den ersten vier Stunden pro 10 dB Anstieg im $L_{Aeq,1h}$ um 5 – 7 min verlängert, davon durch den Verkehrslärm in der ersten individuellen Nachtstunde um 6 min.

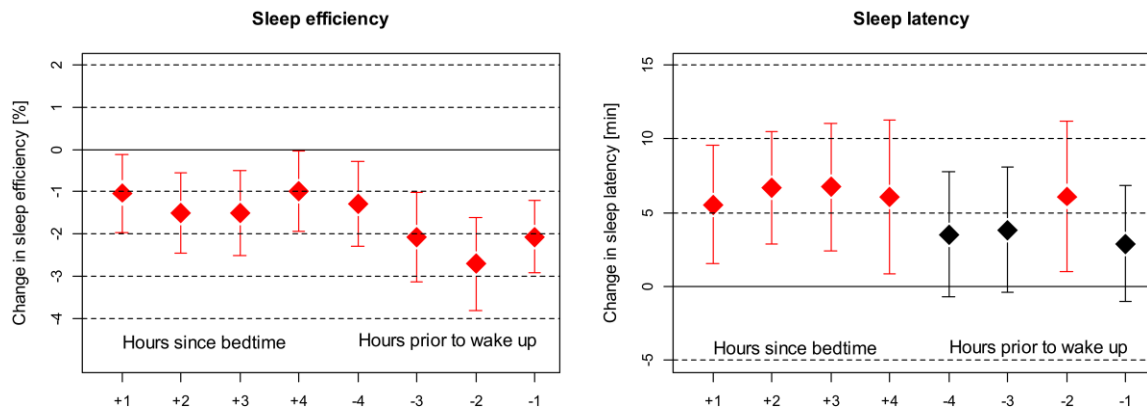


Abbildung 10: Veränderung von Schlafeffizienz (links) und Schlaflatenz (rechts) pro 10 dB Anstieg im Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ des Fluglärms der ersten vier Stunden nach Beginn der Bettzeit und der letzten vier Stunden vor Ende der Bettzeit. Quelle: Rösli et al. (2019)

3.5.1.5 Aufwachbereitschaft in der ersten und zweiten Nachthälfte

Smith et al. (2022) wandten ein neueres Verfahren zur Untersuchung lärmbedingter Aufwachreaktionen an, anstelle der manuellen Beurteilung von Schlafstadien und deren Änderungen durch geschultes Personal.

Auf Basis von laborexperimentellen Daten zur Wirkung von Verkehrslärm auf den Schlaf des DLR (sog. AIRORA-Studie; Basner et al. 2011) wurden die Aufwachreaktionen nicht nur als diskreter Schlafstadienwechsel, sondern als kontinuierlicher Wert der Aufwachbereitschaft (Wake propensity, %WP) gemessen; die Aufwachbereitschaft stellt dabei ein detaillierteres Maß von Schlafinstabilität und Schlaffragmentierung dar als zuvor. %WP-Werte zwischen 40 und 80% bedeuten dabei einen instabilen Schlaf, %WP kleiner 40% bedeutet, dass die Person schläft, %WP ab 80%, dass sie wach ist.

Abbildung 11 zeigt, dass eine Erhöhung der Aufwachbereitschaft unmittelbar nach Beginn eines Verkehrslärmereignisses eintritt. Die Aufwachbereitschaft ist in der zweiten Nachthälfte höher als in der ersten Nachthälfte, was bereits aus vorherigen Studien bekannt ist und der stärkeren Entmüdung in der zweiten Nachthälfte geschuldet ist. Die Abbildung 11 zeigt aber auch, dass in der ersten Nachthälfte die Aufwachbereitschaft nach Geräuschbeginn den Wert von 40% überschreitet und damit auch bei Lärmereignissen in der ersten Nachthälfte Instabilitäten im Schlaf auftreten.

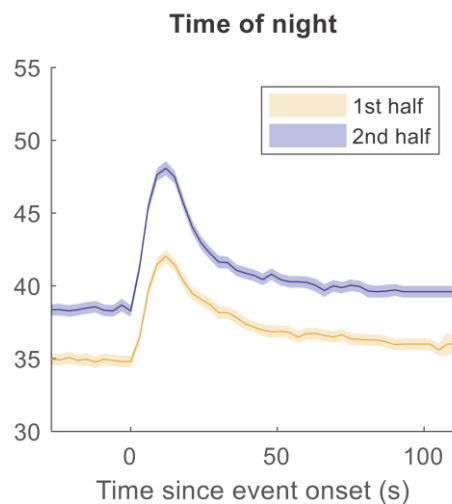


Abbildung 11: Aufwachbereitschaft in der ersten und zweiten Nachthälfte. Werte zw. 40 und 80% bedeuten einen instabilen Schlaf. Quelle: Smith et al., 2022

3.5.1.6 Fluglärmeffekte in den späten Abend- und frühen Morgenstunden auf den Schlaf

Basner und Samel (2007) führten eine schlafphysiologische Bewertung des Effekts von Fluglärm in den späten Abend- und frühen Morgenstunden durch. Ziel war es, verschiedene Szenarien nächtlicher Flugbetriebsbeschränkungen auf den Schlaf zu untersuchen. Verglichen wurde am Beispiel des Flughafens Frankfurt zum Zeitpunkt vor Eröffnung der Landebahn Nordwest und Einführung eines Nachtflugverbots von 23 bis 5 Uhr (im Oktober 2011) der Effekt von (a) Streichung von Flügen in der Zeit von 23:00 bis 5:00 Uhr, (b) Streichung von Flügen zu den gleichen Zeiten und Umverteilung auf die Zeiträume vor 23:00 Uhr und nach 5:00 Uhr und (c) unveränderter Flugplan (durchgehender nächtlicher Flugfracht- und Passagierverkehr laut Flugplan für den 16. August 2005 am Frankfurter Flughafen; vgl. Abbildung 12, oben). Die Szenario b und c, Flugbetriebsbeschränkung zwischen 23:00 und 5:00 Uhr mit/ohne Umverteilung auf die Zeit davor bzw. danach, kommt dem Prinzip nach der Situation am Flughafen Düsseldorf nahe.

Es zeigte sich, dass sich die drei Szenarien a bis c in ihrem Effekt auf den Wach- und Tiefschlafanteil während der Schlafzeit wenig unterscheiden. Allerdings liegt der Wachanteil während der Schlafzeit bei Flugbetriebsbeschränkung zwischen 23:00 und 5:00 Uhr, in der sogenannten Kernruhezeit, bei gleichzeitiger Umverteilung nächtlicher Flugbewegungen auf die Nachtrandstunden gleich auf mit dem Wachanteil bei durchgehendem Nachtflugbetrieb. Dagegen zeigt sich bei bloßer Flugbetriebsbeschränkung in der Kernruhezeit und unverändertem Flugbetrieb in den Nachtrandstunden eine leichte Absenkung des Wachanteils (Abbildung 12, unten links).

Bedeutsamer als der Unterschied der Wach- und Tiefschlafanteile zwischen den drei Szenarien ist der Vergleich zum ungestörten Schlaf in einer Nacht ohne Fluglärm. Insbesondere bei Einschlafzeitpunkten vor 23 Uhr und nach 1:00 ist ein deutlich erhöhter Wachanteil (Abbildung 12, unten links) und reduzierter Tiefschlafanteil (Abbildung 12, unten rechts) in allen nächtlichen Flugbetriebsszenarien gegenüber einer ungestörten Nacht zu erkennen. Je mehr sich Schlafperiode und Zeiten mit starkem Flugverkehrsaufkommen überdecken, umso ausgeprägter ist dabei die fluglärmbedingte Schlafstörung. Personen, die zwischen 23 Uhr und 1 Uhr einschlafen sind in allen Flugbetriebsszenarien deutlich weniger gestört, als Personen die z.B. ab 22:00 Uhr einschlafen wollen und sich diese

Einschlafphase mit dem erhöhten Verkehrsaufkommen zu dieser Zeit überlagert (Abbildung 12, unten).

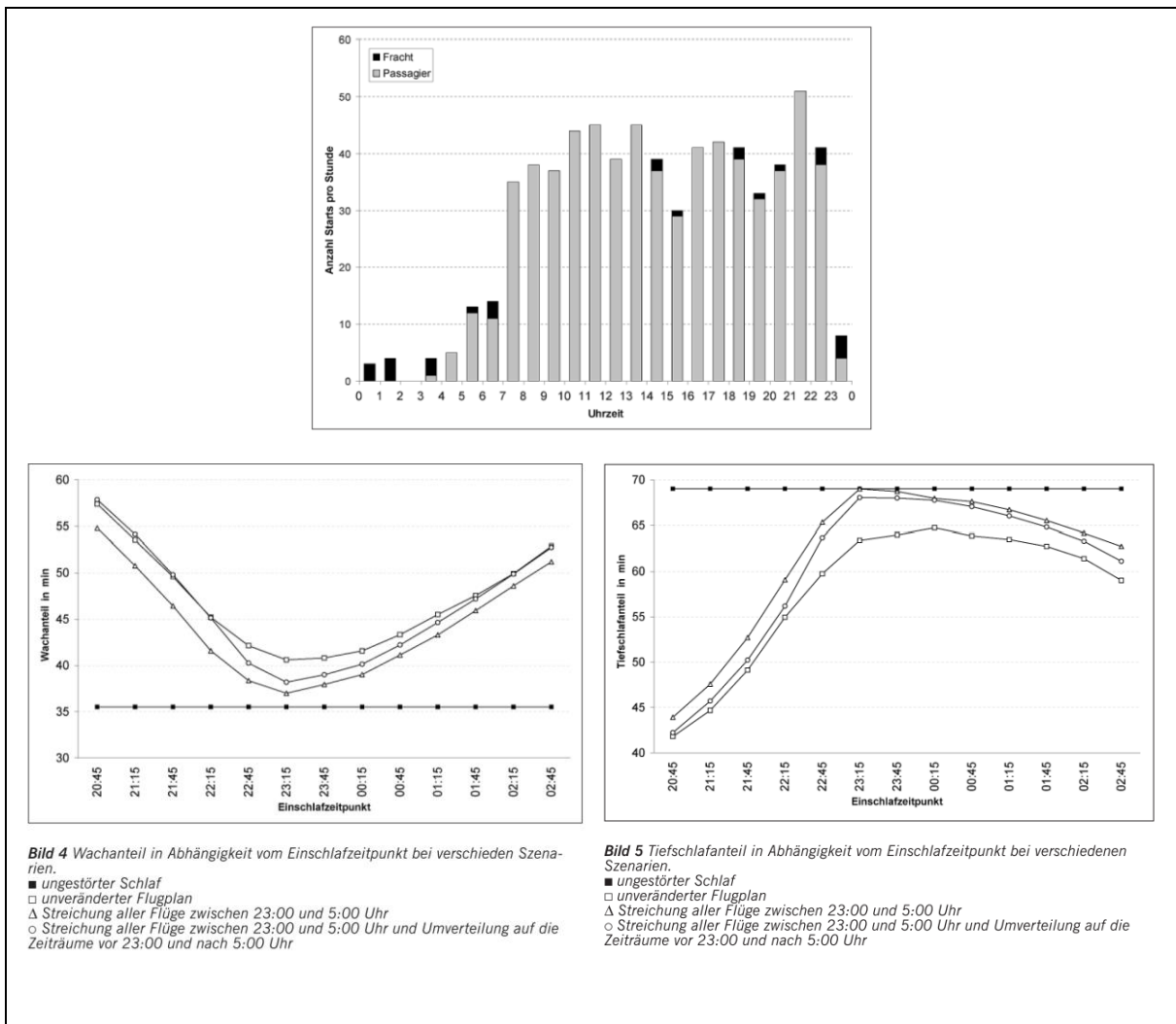


Abbildung 12: Verteilung von Flugzeugstarts pro Stunde am Frankfurter Flughafen laut Flugplan für den 16. August 2005 (oben), Wachanteile (unten links) und Tiefschlafanteil (unten rechts) in Abhängigkeit von Einschlafzeitpunkten bei verschiedenen nächtlichen Flugbetriebsszenarien (unten links). Quelle: Basner & Samel (2007)

3.5.2 Fluglärmereignis-korrelierte Wirkungen auf den Schlaf

Eine weithin anerkannte physiologische Kenngröße der Wirkungen von (Flug-)Lärm auf den Schlaf ist die ereignisbezogene, d.h. beim Fluglärm auf einen einzelnen Überflug bezogene, lärmbedingte EEG-Aufwachreaktion (Basner & McGuire, 2018). Unter anderem ist sie Grundlage für die Definition eines Nachtschutzgebiets am Flughafen Leipzig-Halle (Basner et al., 2005). In Deutschland liegen hierzu insbesondere Feldstudiendaten des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt von Anwohnenden am Flughafen Köln-Bonn (STRAIN-Studie, Basner et al., 2004) und Anwohnenden am Flughafen Frankfurt vor (NORAH-Studie, Müller et al., 2015). Anhand von Lärmmessungen im Innenraum am Ohr einer schlafenden Person und zeitgleichen polysomnographischen Messung physiologischer Schlafparameter lassen sich u.a. die Schlafphasen, der Wechsel von Schlafstadien (Tiefschlaf,

Leichtschlaf, REM-Schlaf, Wachzustand) und hierbei insbesondere Aufwachreaktionen ableiten. In Verbindung mit den parallelen Lärmmessungen und Geräuschaufzeichnungen werden ereignisbezogene (z.B. auf einen Überflug bezogene) quellspezifische, lärmbedingte Aufwachreaktionen identifiziert und daraus mit statistischen Methoden die Wahrscheinlichkeit einer physiologischen Aufwachreaktion in Abhängigkeit vom Maximalpegel eines Geräuscheignisses (Überflugs) abgeleitet. Dies sind die *Fluglärm-assoziierten Aufwachreaktionen*. Da Personen während des Schlafs auch spontan aufwachen und eine spontane Aufwachreaktion zufällig auch unmittelbar nach einem Überflug stattfinden kann, werden die spontanen Aufwachreaktionen gesondert ermittelt und die durchschnittlichen spontanen Aufwachreaktionen von den Fluglärm-assoziierten Aufwachreaktionen abgezogen. Man erhält dann die *Fluglärm-induzierten Aufwachreaktionen* als Teilmenge der Fluglärm-assoziierten Aufwachreaktionen.

Eine Reihe von akustischen und Schlaf-bezogenen Einflussgrößen spielen bei der lärmbedingten Aufwachreaktion eine Rolle und werden in Expositions-Wirkungs-Modellierungen berücksichtigt. So fließen in die Modellierung der fluglärm-induzierte Aufwachreaktion in Abhängigkeit des Maximalpegels (Innenraum) eines Überflugs, auf die die Expositions-Wirkungskurve in Abbildung 13 fußt, folgende Einflussgrößen ein: Maximalpegel des Überflugs ($L_{pAS,Max,indoors}$), Dauer des Geräuscheignisses, Pegelanstieg, Hintergrundgeräuschbelastung vor dem Lärmereignis, verstrichene Schlafzeit seit Schlafbeginn, Schlafstadium vor dem Lärmereignis und das Alter der schlafenden Person.

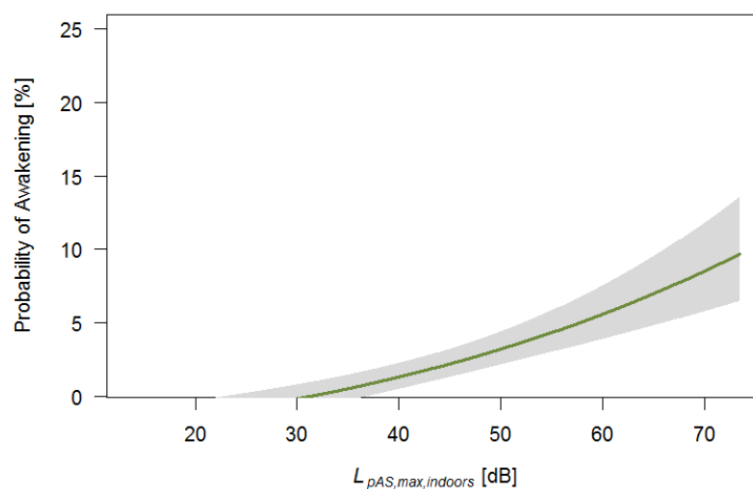


Abbildung 13: Fluglärm-induzierte Aufwachwahrscheinlichkeit als Funktion des Maximalpegels $L_{pAS,max,innen}$ eines Überflugs (aus Daten der STRAIN und NORAH-Studien, optimales Modell) – Quelle: Müller, 2021; Hauptvogel et al. (2021).

Ein wichtiger Faktor für die fluglärm-induzierte Aufwachreaktionen ist dabei die verstrichene Schlafzeit. Mit zunehmender verstrichener Schlafzeit steigt die Wahrscheinlichkeit, durch ein Fluglärmereignis aufzuwachen an. Das bedeutet, dass zum Morgen hin eine Entmüdung stattfindet, Menschen dann eher aufweckbar sind und damit auch die fluglärmbedingte Aufwachwahrscheinlichkeit in der zweiten Nachthälfte höher ist als in der ersten. Dies bestätigen die ausführlichen Markov-Analysen von Basner und Siebert (2006) anhand von am Flughafen Köln-Bonn gewonnenen Feldstudien. Lärmwirkungsforschende vertreten daher die Auffassung, dass stärkere Schlafstörungen in der zweiten Nachthälfte auftreten (Basner & Sieber, 2006; Griefahn & Spreng, 2004). Entsprechend beziehen sich die in der Literatur zu findenden Expositions-

Wirkungskurven zur Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom ereignisbezogenen Maximalpegel eines nächtlichen Überflugs aus präventiven Gründen auf die zweite Nachthälfte.

Im Falle der Kurve in Abbildung 13 ist im zugrundeliegenden Modell die verstrichene Zeit nach Schlafbeginn auf 300 min (5 Stunden nach Schlafbeginn) festgelegt, in der NORAH-Studie auf eine verstrichene Zeit von 383 Minuten (knapp 6,5 Stunden nach Schlafbeginn) und in der Köln-Bonner Feldstudie auf ca. 300 Minuten (601 30-Sekundenepochen; ca. 5 Stunden nach Schlafbeginn).

Auf Basis des in Müller (2021) und Hauptvogel et al. (2021) veröffentlichten Regressionsmodells, das der Aufwachwahrscheinlichkeits-Kurve in Abbildung 13 zugrunde liegt, wurde vom Autor der vorliegenden Stellungnahme die dargestellte fluglärmbedingte Aufwachwahrscheinlichkeit für unterschiedlich verstrichene Schlafzeiten von 0 bis 8 Stunden (540 Minuten) nach Schlafbeginn bei Konstanzhaltung übriger Faktoren berechnet, die entsprechenden Kurven finden sich in Abbildung 14. Sie zeigt, wie mit zunehmender verstrichener Schlafzeit die fluglärmbedingte Aufwachwahrscheinlichkeit steigt. Für eine erste Nachtstunde sind die Aufwachwahrscheinlichkeitskurven für die verstrichene Zeit von 0 Minuten und 60 Minuten relevant. Betrachtet man die beiden Kurven (gelbe bei 0 min und hellgrüne bei 60 min in Abbildung 14) dann müssten 33 Landungen (maximale Anzahl der koordinierten Landungen zwischen 22 und 23 Uhr) in der ersten Nachtstunde im Durchschnitt einen Maximalpegel im Schlafraum von ca. 66 dB $L_{AS,max,innen}$ erzeugen, damit sie zusammen kumuliert eine fluglärm-induzierte Aufwachreaktionen ergeben. Bei einem pauschalen Ansatz von 15 dB Dämmung bei gekippter Fensterstellung entsprechen 66 dB $L_{AS,max,innen}$ einem Maximalpegel außen von 81 dB $L_{AS,max,außen}$.

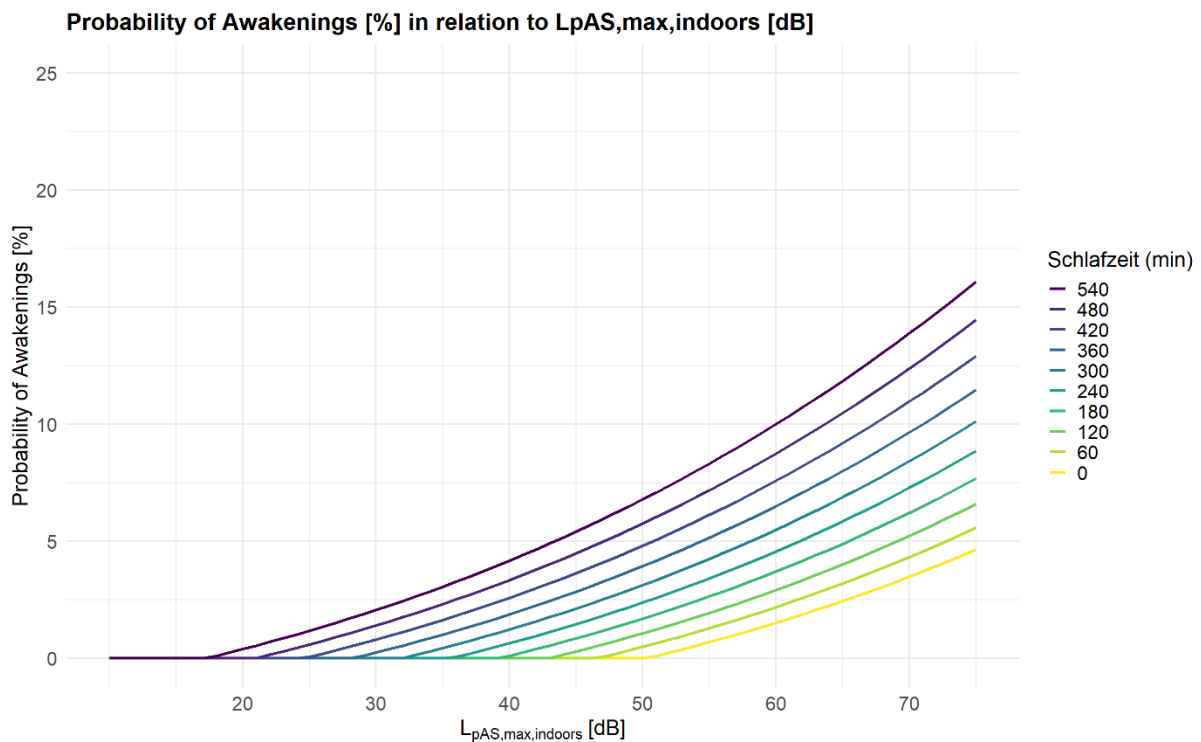


Abbildung 14: Fluglärm-induzierte Aufwachwahrscheinlichkeit als Funktion des Maximalpegels $L_{pAS,max,innen}$ eines Überflugs für unterschiedliche verstrichene Schlafzeiten (aus Daten der STRAIN und NORAH-Studien, optimales Modell; Müller, 2021; Hauptvogel et al. (2021)).

Wenn auch die fluglärmbedingte Aufwachwahrscheinlichkeit, hier definiert als der Wechsel von anderen Schlafstadien in S1 (leichtester Leichtschlaf) und Wach, zu Beginn der Nacht weniger ausgeprägt ist als am Ende, so treten weitere Reaktionen auf Lärm im Schlaf auf, die vor allem den Prozess des Einschlafens und den Tiefschlaf in der ersten Nachthälfte betreffen und im Abschnitt 3.5.1 dargestellt wurden. Und ob dann im weiteren Verlauf bis zum Aufwachen am Morgen eine Kompensation von Schlafstörungen in der ersten Nachthälfte möglich ist, hängt auch davon ab wie ungestört die weiteren Nacht- und frühen Morgenstunden tatsächlich verlaufen und inwieweit Personen Gelegenheit haben, auszuschlafen. Ein ungestörter Morgen und die Möglichkeit des Ausschlafens dürfte allerdings im Alltag innerhalb einer Woche bei Schulkindern, Jugendlichen und Erwachsenen in der Lebensperiode der Berufstätigkeit selten der Fall sein.

3.6 Weiterführende Gesundheitsrisiken durch nächtlichen Fluglärm

Welche weitere chronische Gesundheitswirkungen durch fluglärmbedingte Einschlafstörungen im Vergleich zu den Auswirkungen von Störungen in der zweiten Nachthälfte auftreten oder sogar zu einzelnen Stunden ist epidemiologisch schwer zu untersuchen.

Hinweise ergeben sich allerdings aus der Studie von Heritier et al. (2018), die die Auswirkung der Lärmbelastung durch kombinierte Einwirkung von Straßen-, Schienenverkehrs- und Fluglärm im Tagesverlauf auf die vorzeitige Mortalität bedingt durch Herz-Kreislauferkrankungen untersuchten.

Für die Nachtstunden zeigten sich gegenüber einer Referenzbelastung kleiner 45 dB L_{Aeq} erhöhte Mortalitätsrisiken bei einer Verkehrslärmexposition in den Zeitfenstern 19 bis 23 Uhr ab 45 dB L_{Aeq} für Bluthochdruckerkrankungen und ab 55 dB L_{Aeq} für ischämische Herzerkrankungen und Herzfehler. Neben den späten Abendstunden waren diese Mortalitätsrisiken auch durch Verkehrslärmbelastungen in den frühen Morgenstunden (5 bis 6 Uhr) erhöht. Die Verkehrslärmbelastungen in den restlichen Nachtstunden waren für die genannten Mortalitätsrisiken weniger ausschlaggebend.

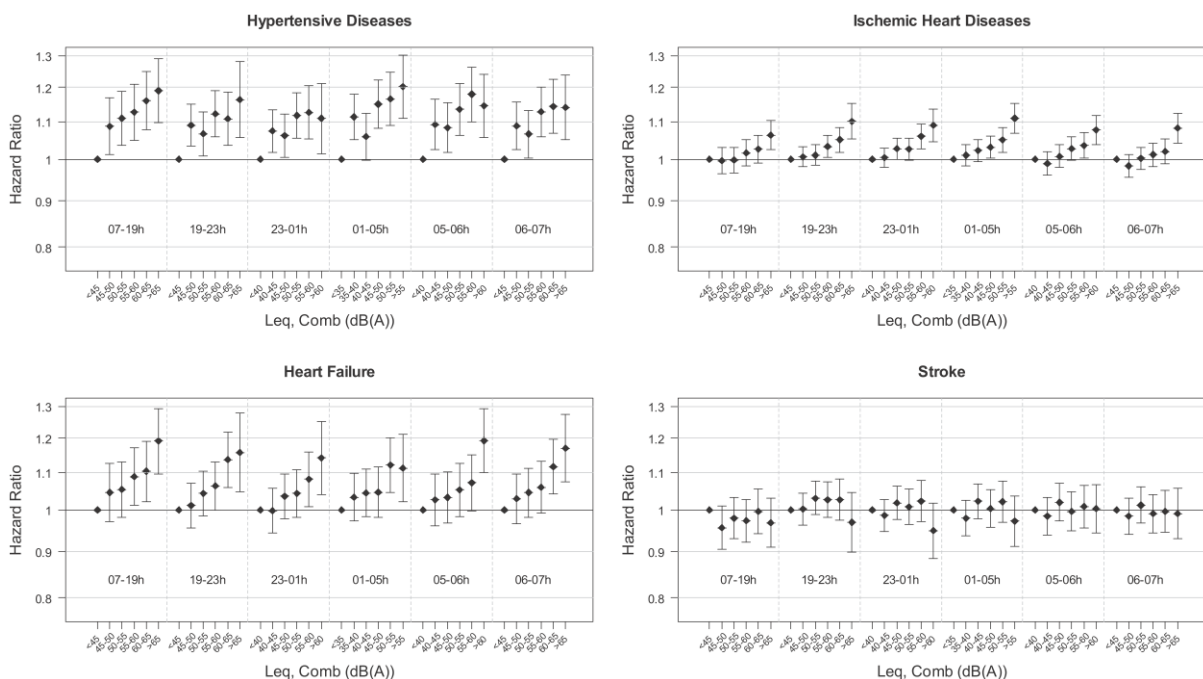


Abbildung 15: Auswirkungen des Fluglärms zu unterschiedlichen Tageszeiten auf das Risiko der Mortalität durch Herz-Kreislauferkrankungen in der Schweiz. Quelle: Heritier et al. (2018)

Itzkowitz et al. (2023) untersuchten am Flughafen Heathrow den Zusammenhang zwischen Herz-Kreislaufbedingten Krankhauseinlieferungen und Todesfälle im Umfeld des Flughafens und dem Fluglärm an der Wohnadresse der betroffenen Personen zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten. Es zeigte sich ein um knapp 1% (0,7%) erhöhtes fluglärmbedingtes Gesamtrisiko an Herz-Kreislaufferkrankungen für Fluglärm um 22-23 Uhr und ein um 1,2% erhöhtes Risiko für Fluglärm um 04:30 bis 06:00 Uhr je 10 dB-Anstieg im Dauerschallpegel L_{Aeq} für diese Bezugszeiten. Weitere Tag- und Nachtzeiten spielten für die Herz-Kreislaufferkrankungen keine Rolle. Auch hier bestätigt sich, dass einerseits der Fluglärm zu morgendlichen Nachtrandstunden etwas stärkere Gesundheitswirkungen nach sich zieht, dass aber auch der Fluglärm in der Stunde von 22-23 Uhr gravierende Gesundheitsrisiken nach sich ziehen kann, auch wenn die Rolle des Fluglärms in so kurzen Tageszeitfenstern für diese Erkrankungen im Vergleich zu anderen Risikofaktoren mit einer Risikoerhöhung von etwa 1% pro 10 dB-Anstieg im L_{Aeq} eher gering, im statistischen Sinne aber signifikant ausfällt.

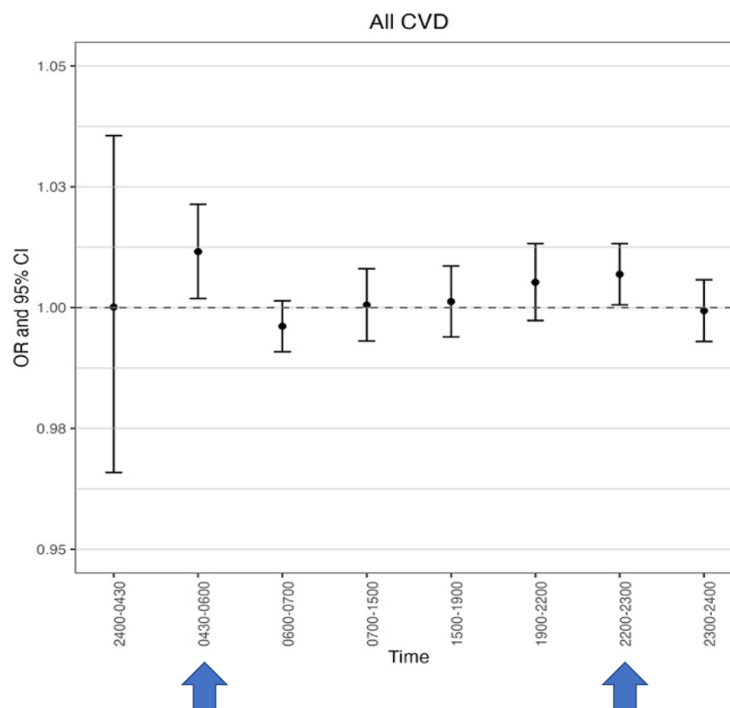


Abbildung 16: Auswirkungen des Fluglärms zu unterschiedlichen Tageszeiten auf das Risiko von Herz-Kreislaufferkrankungen im Umfeld des Flughafens London-Heathrow. Quelle: Itzkowitz et al. (2023)

Dass akuter Nachtfluglärm die Mortalität durch Herz-Kreislaufferkrankungen wenn auch nicht unbedingt verursachen, so doch zumindest auslösen und damit die Schwere des Krankheitsverlaufs beeinflussen kann, zeigen Saucy et al. (2021) anhand von Schweizer Gesundheitsdaten verknüpft mit adressgenau berechneten Stundendauerschallpegeln. Die Autor:innen konnten zeigen, dass die nächtliche Fluglärmbelastung ab einem Dauerschallpegel $L_{Aeq,2h} > 50$ dB im Zeitfenster von 2 Stunden vor Eintritt eines Herz-Kreislauf-bedingten Todesfalls eben dieses Mortalitätsrisiko gegenüber einem Mortalitätsrisiko bei Menschen ohne nächtlichen Fluglärm (< 20 dB $L_{Aeq,2h}$) erhöhte. Die Autor:innen gaben allerdings keine weitere Spezifizierung von Zeitfenstern innerhalb der Nacht an, in denen das Mortalitätsrisiko im besonderen Maße erhöht ist. Das Ergebnis zeigt aber, welche Gesundheitswirkungen akute, aber Nacht für Nacht wiederkehrende, Fluglärmbelastungen auslösen können.

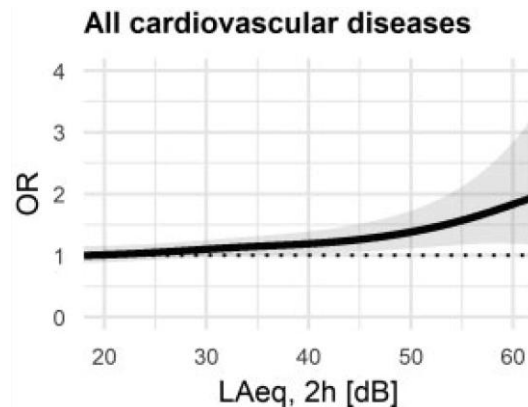


Abbildung 17: Risikoverhältnis (Odds Ratio, OR) für Herz-Kreislauferkrankungen in Abhängigkeit vom $L_{Aeq,2h}$ zu Nachtstundenzeiten (22:00 – 06:00 Uhr)

3.7 Nächtliche Fluglärmwirkungen bei vulnerablen Gruppen

Die Auswirkungen nächtlichen Fluglärms auf vulnerable Gruppen werden seit einiger Zeit insbesondere vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) untersucht. Als vulnerable Gruppen werden dabei Kinder, Senioren und im Schichtdienst arbeitende Menschen betrachtet (Bartels et al., 2024).

Ältere Menschen werden als vulnerable Gruppen in Bezug auf Schlafstörungen erachtet, da ihr Schlaf generell fragmentierter und damit anfälliger ist. Der Anteil der Tiefschlafphasen ist bei älteren Menschen reduziert und die Schlafeffizienz vermindert (Bartels et al., 2024; Basner et al., 2010; Ohayon et al., 2004). Dadurch ist ihre Empfindlichkeit gegenüber äußeren Störfaktoren wie Lärm erhöht, weswegen in einer DLR-Fluglärmstudie mit Senior:innen die Hypothese geprüft wurde, ob ältere Menschen durch Fluglärm stärker beeinträchtigt werden.

Bei Kindern wird angenommen, dass sie aufgrund ihrer sensiblen Entwicklungsphase und ihrer weniger ausgeprägten Bewältigungsstrategien stärker von den negativen Auswirkungen des Lärms betroffen sein können. Zudem haben insbesondere Kinder im Grundschulalter längere Schlafzeiten, die die Tages-/Nachtrandstunden, d.h. den Abend (vor 22 Uhr) und den frühen Morgen mit hoher Verkehrsdichte einschließt (Van Kamp & Davies, 2013; Persson Waye et al., 2023). Entsprechend wurde vom, DLR-Forschungsteam auch für diese Gruppe angenommen, dass Fluglärm eine stärkere Wirkung auf den Schlaf hat als bei Erwachsenen.

3.7.1 Wirkung nächtlichen Fluglärms auf den Schlaf von Kindern

Dem Autor der vorliegenden Stellungnahme ist nur eine Feldstudie bekannt, in der die Auswirkungen nächtlichen Fluglärms auf den Schlaf von Kindern mit physiologischen Messmethoden (Polysomnographie) und anhand von Befragungen untersucht wurde. Es handelt sich um die MIDAS-Studie des DLR (Bartels, 2023, 2024; Quehl et al., 2019). In der Studie wurden 51 Kinder im Alter von 8-10 Jahren aus Haushalten im Umfeld des Flughafens Köln/Bonn in den Jahren 2016 und 2017 in vier aufeinander folgenden Nächten untersucht. Die Dauer im Bett umfasste bei den untersuchten Kindern altersgemäß 8 bis 10 Stunden, im Mittel in der Zeit von 21 bis 7 Uhr. Die Geräuschbelastung durch den

nächtlichen Flugverkehr betrug im Dauerschallpegel 45 dB bis 57 dB $L_{Aeq,22-6}$, andere dominante Lärmquellen lagen vor Ort nicht vor. Die von den Kindern morgendlich eingeschätzte Fluglärmbelastung in der vergangenen Nacht erwies sich als weniger von der Geräuschbelastung als von der Lärmempfindlichkeit der Kinder, deren Einschätzungen ihrer Bewältigungsmöglichkeiten und Gewöhnbarkeit an den Lärm sowie der Beurteilung von Flugzeugen als gefährlich beeinflusst. Dagegen zeigten sich physiologische Effekte in der Schlafarchitektur in Abhängigkeit von der Zahl der nächtlichen Fluglärmereignisse mit einem Geräuschpegel von mindestens 30 dB(A) gemessen am Ohr des schlafenden Kindes ($NAT_{30,innen}$).

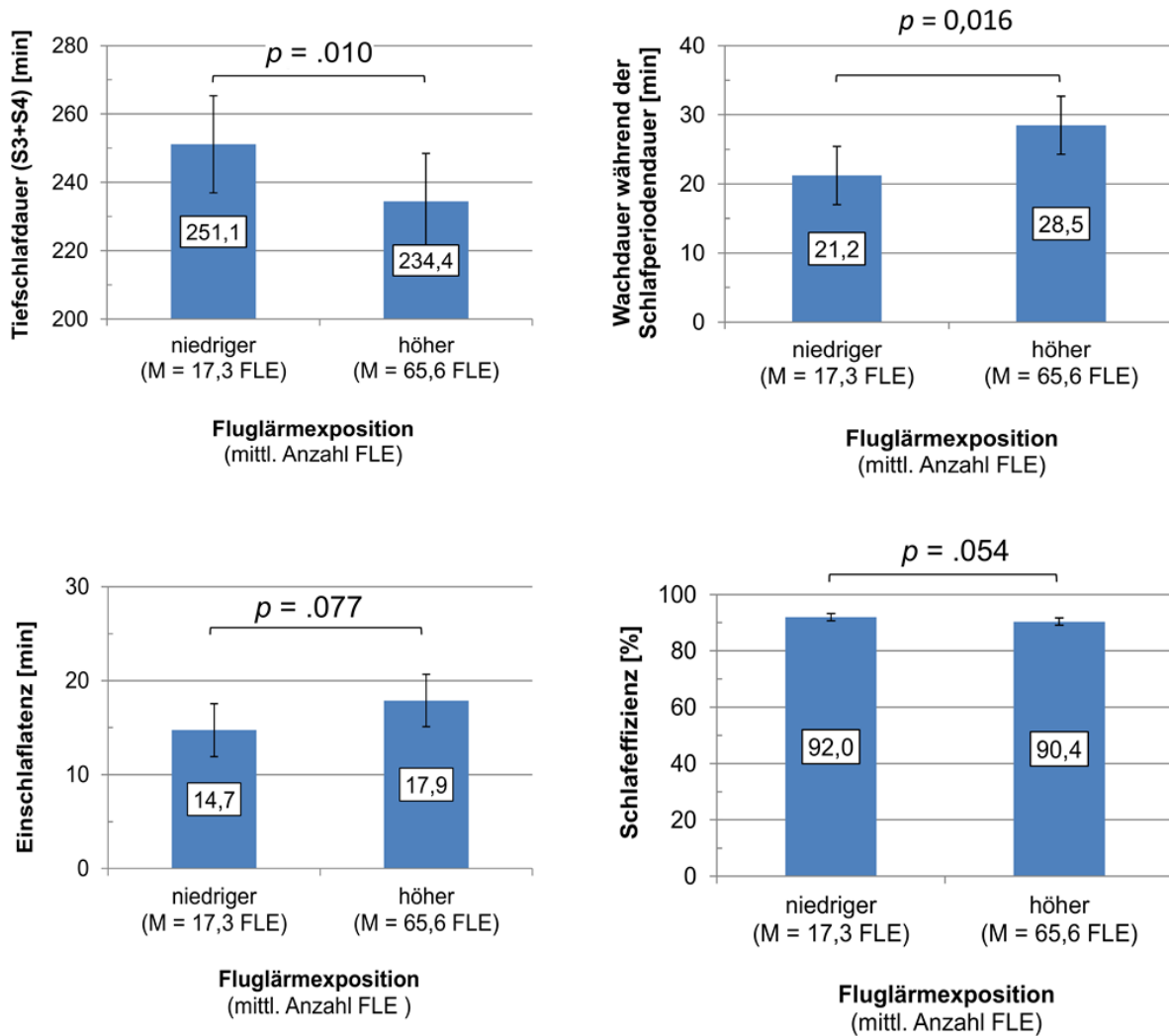


Abbildung 18: Mit Fluglärm assoziierte Schlafstörungen bei Kindern im Umfeld des Flughafens Köln/Bonn. Quelle: Bartels (2023).

Mit höherer Zahl von Fluglärmereignissen (65,6 vs. 17,3) verkürzte sich die Tiefschlafdauer bei den Kindern um knapp 17 Minuten und die Wachdauer während der Schlafperiode war um ca. 6 Minuten verlängert (Bartels, 2023, 2024). Zudem verlängerte sich in der Tendenz im Durchschnitt die Einschlaflatenz um ca. 3 Minuten und die Schlaffeffizienz fiel um knapp 2% niedriger aus; die letzten beiden Befunde erreichten allerdings nicht die statistische Signifikanz. Die Befunde zeigen demnach, dass nächtlicher Fluglärm den Schlaf von Kindern beeinträchtigt, insbesondere durch Reduzierung des Tiefschlafanteils und Zunahme von Wachphasen. Dabei betrifft die Reduzierung des Tiefschlafanteils vor allem die erste Nachthälfte, die bei den Kindern im Mittel um 21 Uhr beginnt und somit die Stunde

22 bis 23 Uhr vollumfänglich erfasst. Bei einer Einschlaflatenz von ca. 15 bis 20 Minuten ist anzunehmen, dass viele der Kinder sich in der Stunde 22 bis 23 Uhr unter ungestörten Bedingungen im Tiefschlaf befinden würden, die sich dann Fluglärm-bedingt verkürzt.

Ein guter Schlaf ist wichtig für die kognitive Entwicklung und das Lernen von Kindern. Während des Schlafs werden am Tage gesammelte Informationen gesammelt und es findet eine Gedächtniskonsolidierung statt, bei der wichtige Gedächtnisinhalte in das Langzeitgedächtnis überführt wird. Grundsätzlich findet die kognitive Informationsverarbeitung und Gedächtniskonsolidierung sowohl im Non-REM-Schlaf als auch in REM-Schlaf statt, beim Non-REM-Schlaf vor allem in Tiefschlafphasen, die vermehrt in der ersten Nachthälfte auftreten. Im Tiefschlaf wird vor allem das deklarative Gedächtnis (Wissen über Fakten und Ereignisse) konsolidiert (Walker, 2009), während im REM-Schlaf vor allem prozedurales Lernen, emotionale Gedächtnisverarbeitung und (kreative) Problemlöseprozesse stattfinden (Rasch & Born, 2013).

Wird der Schlaf gestört, unterbricht dies die Informationsverarbeitung und Gedächtniskonsolidierung und beeinträchtigt Lernprozesse und die kognitive Entwicklung. Dass Fluglärm Auswirkungen auf die kognitive Entwicklung, insbesondere Leseleistung von Kindern hat, ist hinlänglich, insbesondere in der europäischen RANCH-Studie (Clark et al., 2006) und NORAH-Kinderstudie (Klatte et al., 2017) nachgewiesen. Die kognitiven Auswirkungen wurden dabei vor allem mit dem Fluglärm am Schulgebäude in Beziehung gesetzt. Vertiefende Analysen der NORAH-Daten mit Ansätzen des Machine Learnings zeigten, dass viele Faktoren auf die Leseleistung von Grundschulkindern einwirken (z.B. soziale, familiäre Faktoren) und dabei noch vor weiteren akustischen Kenngrößen, die Anzahl lauter Flugzeuge an der Wohnadresse in der Nacht ($NAT_{65,22-06}$, $NAT_{70,22-06}$) die Leseleistung von Grundschulkindern beeinflusste (Spilski et al., 2022). Aus der Publikation geht nicht hervor, zu welchen genauen Zeiten die nächtlichen Überflüge stattfanden, aber sie zeigt, dass sich die Effekte des Nachtfluglärms auf Kinder nicht auf den Schlaf selbst beschränkt, sondern weitere Beeinträchtigungen in der Entwicklung von Kindern nach sich ziehen kann.

3.7.2 Wirkung nächtlichen Fluglärms bei älteren Menschen

Bei einer Anzahl von 44 Senior:innen im Alter von 55 bis 76 Jahren, die im Umfeld des Flughafens Köln/Bonn leben, wurde der Schlaf über einen Zeitraum von 5 Nächten (eine Adaptationsnacht gefolgt von 4 Testnächten) polysomnografisch untersucht und der nächtliche Fluglärm im Innenraum gemessen und die Geräusche aufgezeichnet. Morgens fanden Befragungen zur Schlafqualität und Lärmbelastung in der vorangegangenen Nacht statt (Bartels et al., 2024).

Im Hinblick auf die Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel eines Überflugs fanden sich keine höhere Beeinträchtigung als bei Erwachsenen im Alter von 18 bis unter 55 Jahren und bei den Grundschulkindern aus der MIDAS-Studie im Alter von 8-10 Jahren. Die auf die Nacht bezogene Fluglärmbelastung war in Abhängigkeit von der Anzahl der Fluglärmereignisse während der Bettzeiten etwas höher als bei den jüngeren Erwachsenen und noch deutlich höher gegenüber der von den Kindern berichtete Fluglärmbelastung.

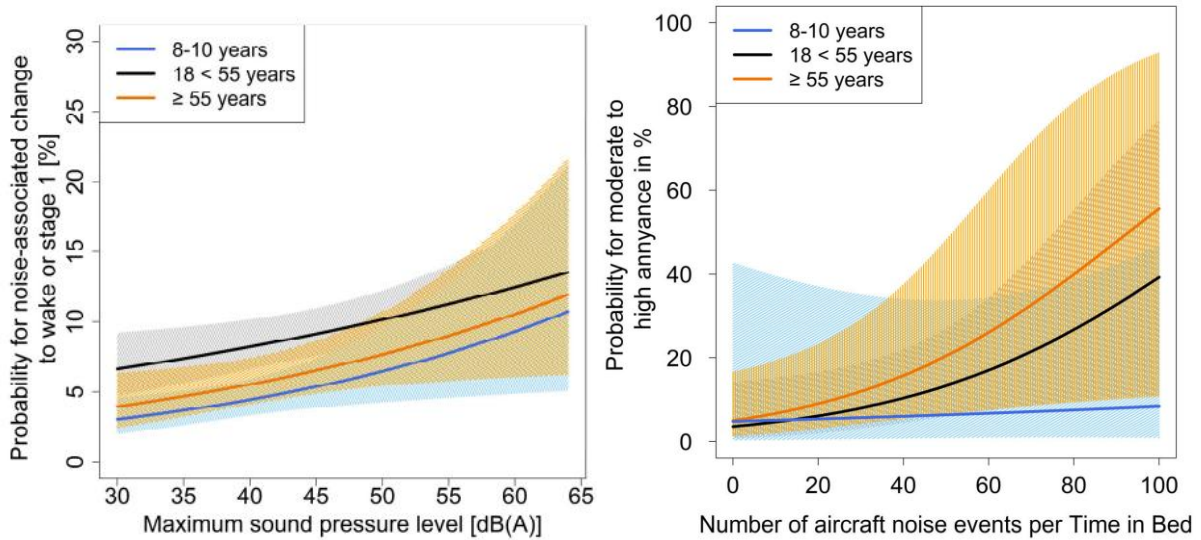
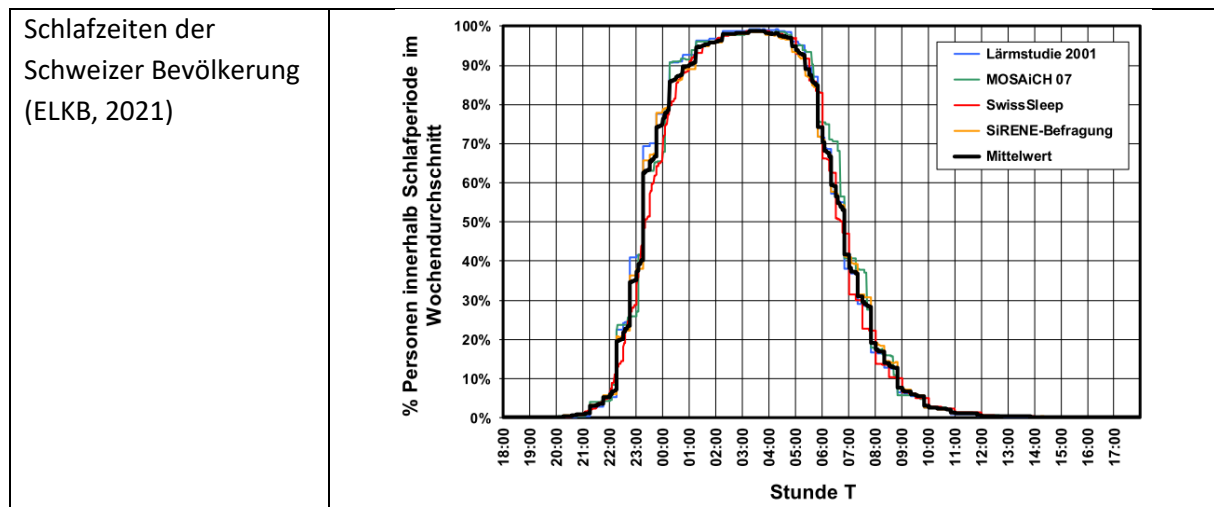


Abbildung 19: Wirkung nächtlichen Fluglärms auf Menschen im unterschiedlichen Alter. Links: Aufwachreaktionen in Abhängigkeit des ereignisbezogenen Maximalpegels; rechts: Wahrscheinlichkeit moderater und hoher Fluglärmelastung in Abhängigkeit von der Anzahl von Fluglärmereignissen während der Bettzeiten

3.8 Variation der Störwirkungen von Fluglärm im Tages- und Nachtverlauf

3.8.1 Schlafzeiten in der erwachsenen Bevölkerung

Studien zum Schlafverhalten in der Bevölkerung sowie Lärmwirkungsstudien, in denen Bettgeh- und Schlafzeiten erfasst werden, zeigen, dass die Nachtzeit von 22 bis 6 Uhr etwa 85% der Schlafzeit der erwachsenen Bevölkerung abdeckt. Dies zeigen Studien in der Schweiz, zusammengestellt von der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung (EKLB, 2021). Für die Bevölkerung in der Rhein-Main-Region ergibt sich ein ähnliches Bild. Dort deckt die Nachtzeit von 22 bis 6 Uhr 88% der Schlafzeit der erwachsenen Bevölkerung ab.



Schlafzeiten der Schweizer Bevölkerung (ELKB, 2021)

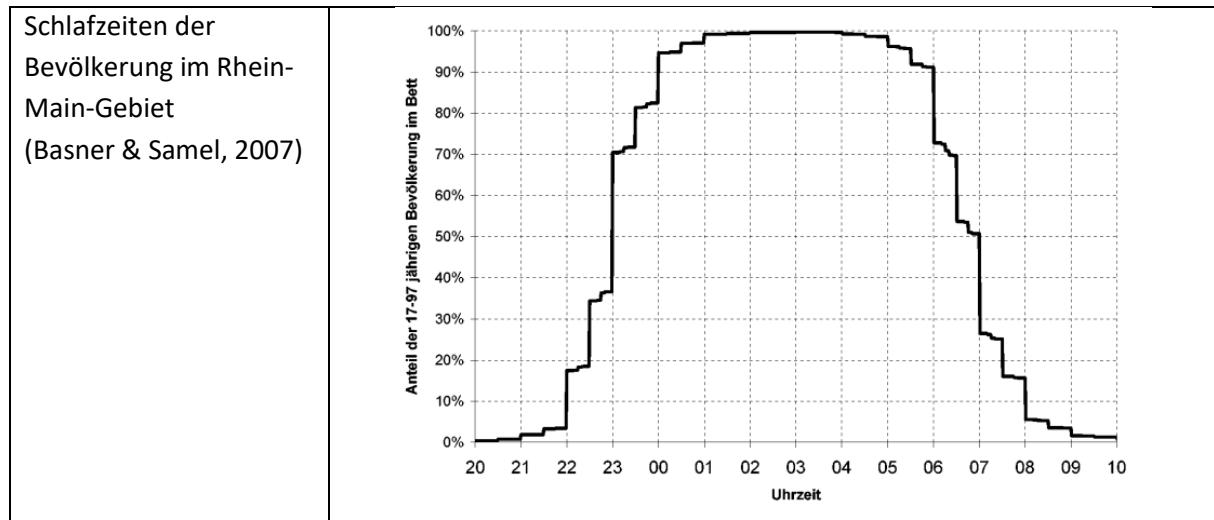


Abbildung 20: Anteile der Bevölkerung (oben: in der Schweiz, unten: im Rhein-Main-Gebiet im Umfeld des Flughafens Frankfurt) innerhalb der Schlafperiode in jeder Tagesstunde T zwischen 18 Uhr bzw. 20 Uhr abends am Vortag und 10 Uhr morgens bzw. 18 Uhr abends am Folgetag an einem Durchschnittstag, minütlich aufgelöst. Quelle: EKLB, 2021 (oben), Basner & Samel, 2007 (unten)

Die Schlafperiode der *erwachsenen* Bevölkerung in der Schweiz und im Rhein-Main Gebiet würde mit einer Verschiebung der Nacht auf 23 Uhr bis 7 Uhr und eines damit einhergehenden Ruhegebots besser abgedeckt (im Rhein-Main-Gebiet 93%, in der Schweiz 90%), allerdings zum Nachteil der Schlafzeiten von Kindern, die im Grundschulalter im Durchschnitt zwischen 21 und 7 Uhr liegen. Entsprechend empfiehlt die EKLB in ihrem Grenzwertgutachten zum Verkehrslärm keine Verschiebung der „regulatorischen Nacht“, sondern eine Erweiterung auf 22 bis 7 Uhr, wie es in den USA für den Nachtzeitraum, der dem US-amerikanischen Nachtpegel L_{night} zugrunde liegt, der Fall ist.

Eine Veränderung des „regulatorischen“ Nachtzeitraums wird in der vorliegenden Stellungnahme nicht weiter diskutiert. Es soll lediglich darauf hingewiesen werden, dass Fluglärmwirkungen in der betroffenen erwachsenen Wohnbevölkerung in der ersten Nachtstunde 22 bis 23 Uhr nicht nur die Schlafphysiologie betreffen, sondern auch einen gegenüber früheren Tagesstunden erhöhten Ruheanspruch vor erheblichen Störungen und Belästigungen durch Fluglärm, der mit den Erwartungen eines abflachenden Fluglärms zur Nacht hin verknüpft ist, um sich auf den notwendigen Erholungsschlaf „einzustimmen“.

3.8.2 Tageszeitliche Variation in der Lärmbelastung und -gestörtheit

3.8.2.1 Hochgradige Fluglärmbelastung im Tagesverlauf

Lärmwirkungsforschende aus Deutschland und Schweiz haben Daten aus Fluglärmwirkungsstudien an den Flughäfen Zürich und Frankfurt zu den Tagesstunden besonders störenden und belästigenden Fluglärms zusammengetragen und Bonus-/Maluswerte für Stundendauerschallpegel ermittelt, welche so normiert wurden, dass der arithmetische Mittelwert zwischen 0 und 24 Uhr 0 dB beträgt (Brink et al., 2010).

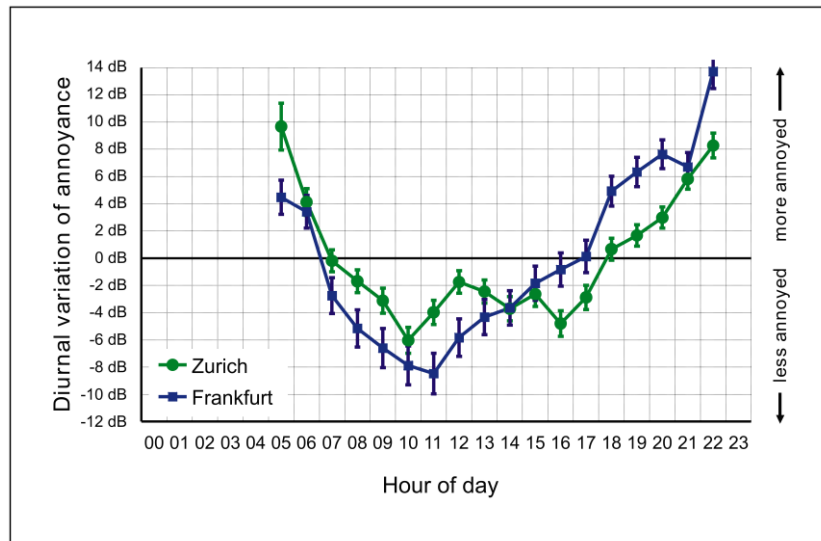


Abbildung 21: Profil der Variation hochgradiger Lärmbelastung im Tagesverlauf, dargestellt in normierten Differenzpegelwerten in dB gegenüber dem durchschnittlichen Pegel über 24 Stunden, normiert auf 0 dB. Quelle: Brink et al. (2010)

Die Abbildung 21 zeigt, warum ein Abschwellen des Lärmpegels zur Nachtzeit aus Lärmwirkungssicht erforderlich ist: Der Ruheanspruch ist von der ersten Nachtstunde an höher als im Tagesdurchschnitt über 24 Stunden. Die höhere hochgradige Lärmbelastung bei vergleichbarer Stundenbelastung beginnt bereits vorher zur Abendzeit ab 18 Uhr und steigt dann bis zum Beginn der Nachtzeit kontinuierlich an. Damit wenigstens der Lärmbelastungsmalus im Vergleich zu den beiden Abendstunden davor (ab 20:00 Uhr) ausgeglichen wird, reicht eine Konstanthaltung der stündlichen Flugbewegungszahlen und resultierenden Fluglärmbelastung zu den Werten von 20-21 Uhr und 21-22 Uhr nicht aus, der Stundenpegel für die Zeit von 22-23 Uhr müsste um ca. 5 dB niedriger ausfallen. In jedem Fall begründet das in Abbildung 21 dargestellte Ergebnis, dass ein Anschwellen des Fluglärms in der ersten Nachtstunde von 22 bis 23 Uhr dem Befund eines zu dieser Zeit erhöhten Ruheanspruches zuwiderläuft.

3.8.2.2 Selbstberichtete Schlafgestörtheit in unterschiedlichen Nachtzeiträumen

Für die in der internationalen Lärmwirkungsforschung und in der EU-Umgebungslärmpolitik anerkannte und etablierte Kenngröße zur Messung lärmbedingter Schlafgestörtheit, dargestellt als Prozentanteil hochgradig schlafgestörter Personen (% HSD, *percentage highly sleep disturbed*) haben sich folgende empfohlene Grenz- bzw. Schwellenwert-Kriterien etabliert:

1. Der %HSD-Anteil von 3%, bei dem nach den Leitlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO, 2018) für Umgebungslärm in der europäischen Region von einem relevant erhöhten Gesundheitsrisiko auszugehen ist. Werden 3% HSD bei einem Nachtpegel unterhalb von 40 dB erreicht, wird der „Leitlinien“-Pegelwert auf $L_{\text{night}} = 40$ dB als gesundheitlich relevante Schwelle festgelegt, da die WHO für Pegelwerte unterhalb von 40 dB aus Gründen der akustischen Berechnungsunsicherheit keine Empfehlungen abgibt. Diese Situation erwies sich in den WHO-Leitlinien von 2018 für Fluglärm als gegeben: Der Leitlinienwert für die Nachtzeit liegt laut WHO (2018) bei 40 dB, ein Wert, bei welchem dem zugrundeliegenden WHO-Review von Basner & McGuire (2018) nach 11 % hoch schlafgestört sind. Dieses Kriterium

wurde jüngst in einem Schutzkonzept zum Fluglärm von Guski et al. (2023) als präventive Grenze akzeptierbarer Gesundheitsrisiken (R1) übernommen.

- Ein zweites Kriterium wurde in dem Schutzkonzept von Guski et al. (2023) als kritische Grenze akzeptierbarer Gesundheitsrisiken (R2) empfohlen. In Bezug auf die Schlafgestörtheit durch Fluglärm wird als R2-Grenze ein %HSD-Anteil von 15% angesetzt. Damit folgt das Schutzkonzept von Guski et al. (2023) den Empfehlungen der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung für Grenzwerte für Straßen-, Eisenbahn- und Fluglärm (EKLB, 2021). Im Gutachten von Guski et al. (2023) liegt die R2-Grenze, d.h. der %HSD-Anteil von 15% nach Auswertung neuerer internationaler Fluglärmwirkungsstudien bei einem achtstündigen Nachtpegel von $L_{Aeq,Nacht} = 44$ dB.

In ihrem systematischen Review zu Schlafstörungen bedingt durch Umgebungslärm betrachten Smith et al. (2022) den Prozentanteil hochgradig schlafgestörter Personen unterteilt nach den Phasen Störungen beim Einschlafen, des Schlafs in der Nacht und beim Ausschlafen. Bei einem Nachtpegel von 40 dB L_{night} ist ein Anteil von 15% HSD bereits überschritten. Dieser %HSD-Wert wird bei der erlebten hochgradigen Schlafgestörtheit aufgrund morgendlichen Aufgeweckt-Werdens durch Fluglärm bei einem L_{night} von ca. 45 dB erreicht (Abbildung 22).

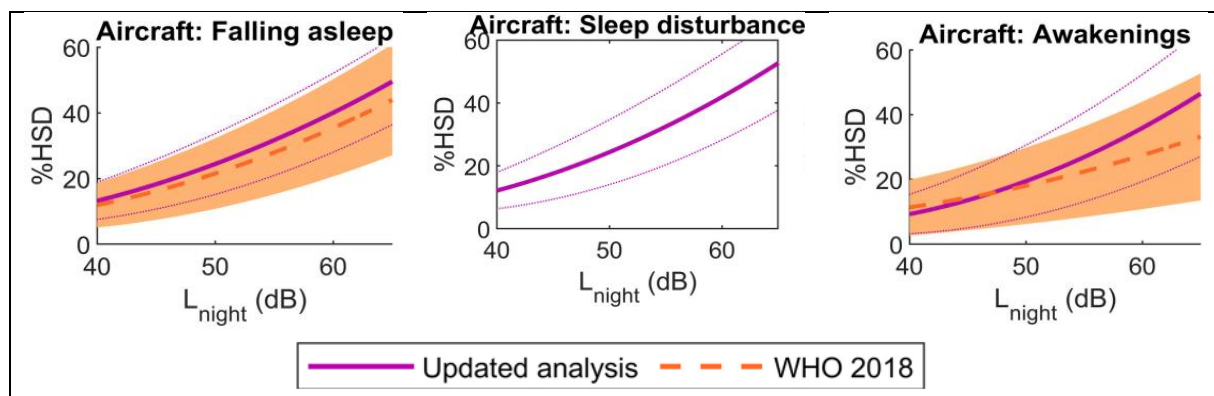


Abbildung 22: Prozentanteil hochgradig durch Fluglärm schlafgestörter Personen in Abhängigkeit vom Nachtpegel L_{night} . Quelle: Smith et al., 2022

In einer Auswertung von Befragungsdaten aus der Schweizer SiRENE-Studie unterscheiden Brink et al. (2019) den %HSD-Anteil von drei Gruppen schlafender Personen:

- von Frühschlafenden („early sleepers“), deren Schlafzeit vor 22:53 Uhr beginnt,
- von Medium-Schlafenden („medium sleepers“), deren Schlafzeit zwischen 22:53 und 23:31 Uhr beginnt,
- und Spätschlafenden („late sleepers“), deren Schlafzeit erst nach 23:31 Uhr beginnt.

Die %HSD-Kurven in Abhängigkeit des Nachtpegels L_{night} für diese Gruppen zeigt Abbildung 23. Auch hier liegt das WHO-Kriterium von 3% HSD unterhalb von $L_{night} = 40$ dB, und bei 40 dB sind etwa 15% hoch schlafgestört, was der R2-Gesundheitsrisikostufe von Guski et al. (2023) entspricht. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass zumindest deskriptiv die Frühschlafenden (und Medium-Schlafenden) bei gleichem Nachtpegel stärker schlafgestört sind als Spätschlafende.

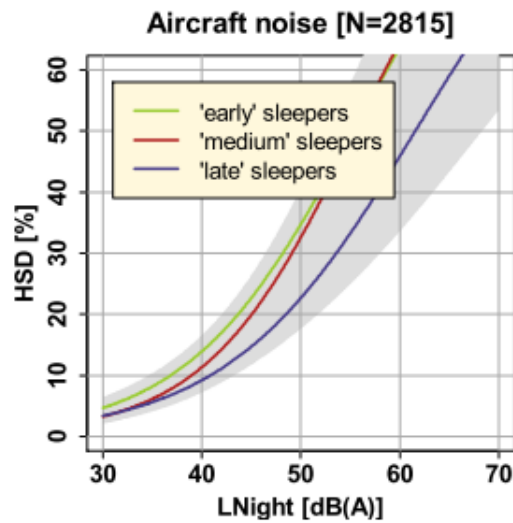


Abbildung 23: Prozentanteil hochgradig durch Fluglärm schlafgestörter Personen (%HSD) in Abhängigkeit vom Nachtpegel L_{night} in den Gruppen der Frühschlafenden, Medium-Schlafenden und Spätschlafenden. Quelle: Brink et al., 2019

Ein genaueres Bild zur Fluglärmwirkung in der Zeit von 22-23 Uhr liefern Brink et al. (2019) bei einer Analyse des Prozentanteils besonders starker Störung/Belästigung bezogen auf den Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ in verschiedenen Nachtstunden (Abbildung 24). Den höchsten Prozentanteil besonders starker Störung pro Stunden-Dauerschallpegel in der Nachtzeit ergibt sich für die Stunde 05-06 Uhr. Für 22-23 Uhr liegt der 3%-Anteil unterhalb von $L_{Aeq,1h} = 40$ dB. Bei etwa 40-41 dB $L_{Aeq,1h}$ wird der HSD-Anteil von 15% überschritten.

Versteht man die Angaben zur besonders starken Gestörtheit oder Belästigung als Lärmbelastungsurteil und nicht als Beurteilung der Schlafgestörtheit, so können die für die hochgradige Lärmbelastigung angesetzten gesundheitsbezogenen Maßstäbe (nach WHO 10%, nach Guski et al., 2023, 25% (R2)) angesetzt werden. 10% besonders stark gestörter/belästigter Personen liegen bezogen auf die Uhrzeit von 22-23 Uhr unterhalb von $L_{Aeq,1h} = 40$ dB, 25% liegen bei $L_{Aeq,1h} = 46,5$ dB.

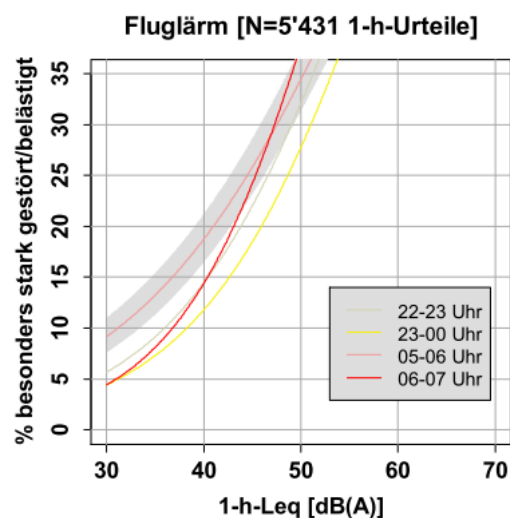


Abbildung 24: Hochgradige (besonders starke) Gestörtheit/Belästigung in Abhängigkeit vom Stundendauerschallpegel $L_{Aeq,1h}$ für verschiedene Nachtzeitstunden

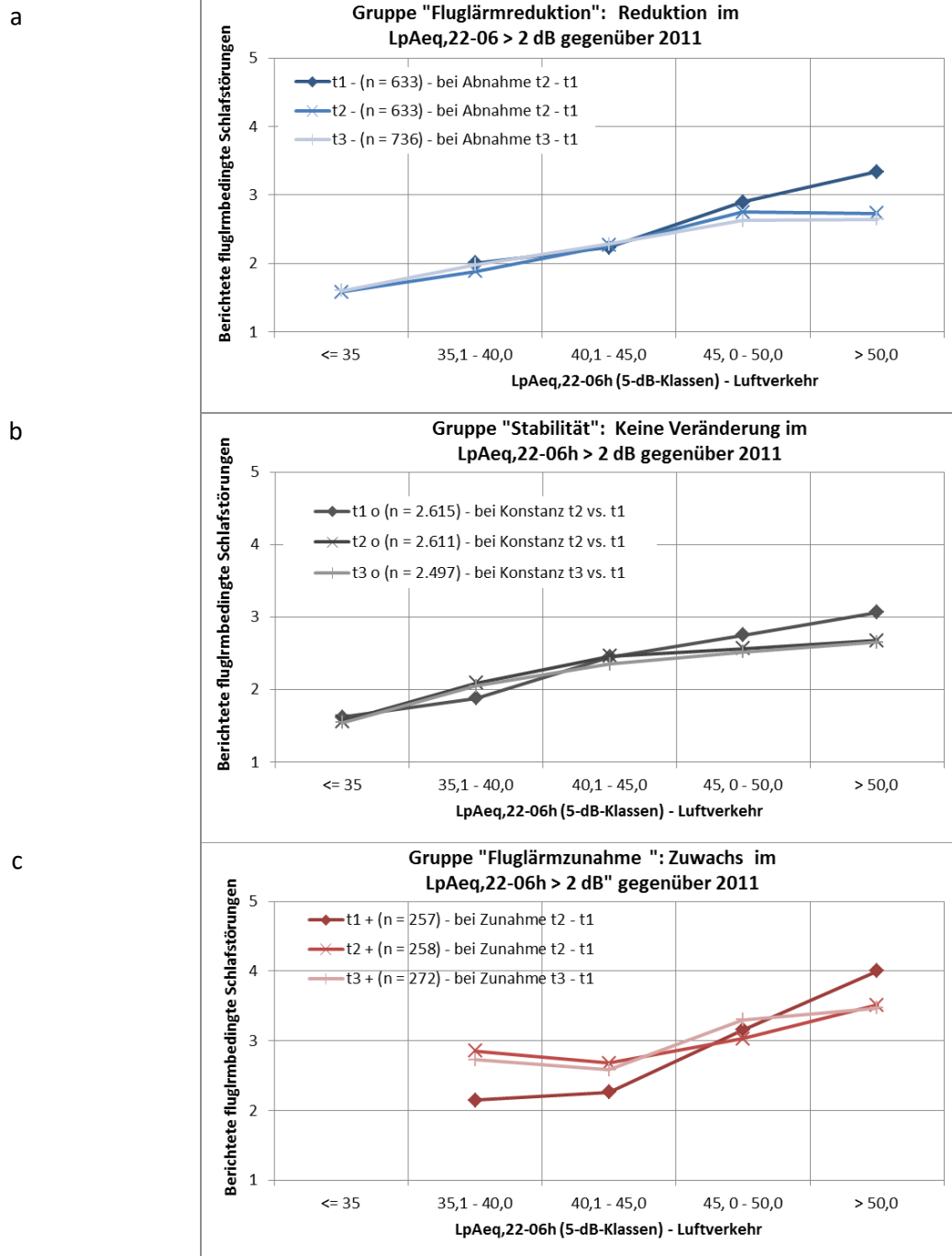
3.8.3 Effekte von Veränderungen des Fluglärms in einzelnen Tagesstunden

In der Lärmwirkungsforschung ist bekannt, dass betroffene Anwohnende in Flughafenregionen bei maßnahmen-bedingten Lärmänderungen im besonderen Maße in der Beurteilung der Lärmbelastung reagieren, nämlich mit einer zusätzlichen Reaktion (Exzess) in Richtung der Belastungsänderungen. Das heißt, Lärmbelastungsreaktionen fallen bei gegebenem Pegel in Richtung der Expositionsänderung stärker aus als vor der Änderungssituation bzw. anhand von generalisierten Expositions-Wirkungskurven vorhersagbar wäre (Brown & van Kamp, 2009a, b). Dieser Effekt ist langfristig und wurde bislang über einen Zeitraum von 3-4 Jahren nach eingetretener Veränderung beobachtet, d.h. eine Gewöhnung an die veränderte Situation ist nicht erkennbar, insbesondere nicht bei Zunahme der Geräuschbelastung (Breugelmans, et al., 2007; Brown & van Kamp 2009a; Schreckenberg et al., 2015, 2019). Der Unterschied im Prozentanteil hochgradig belastigter Personen in den Wirkungsuntersuchungen an Bestands- und Änderungsflughäfen entspricht einem Fluglärmpegelunterschied von etwa 6 dB L_{den} (Guski et al., 2017). Der Change-Effekt wurde vor allem bei Fluglärmbelastungsurteilen festgestellt (Brown & van Kamp, 2009b), aber auch bei selbstberichteten Schlafstörungen bzw. nächtlicher Fluglärmbelastung (Brown & van Kamp, 2017; Quehl et al., 2017; Schreckenberg et al., 2015).

Während sich der Change-Effekt als Untersuchungsphänomen in der Lärmwirkungsforschung auf die Auswirkungen von langfristigen Änderungen in der Lärmbelastung bezieht, weisen auch Veränderungen im Tagesverlauf bzw. Bündelungen von Flugbewegungen auf wenige Stunden Auswirkungen im Sinne eines kurzzeitigen Change-Effekts auf. Das legen Befunde aus der NORAH-Studie zu den Auswirkungen der Einführung einer Kernruhezeit von 23 bis 5 Uhr bei Bündelung des Nachtflugverkehrs überwiegend auf die Abendstunde 22-23 Uhr und Morgenstunde von 5-6 Stunde nahe (Schreckenberg et al., 2015) sowie umgekehrt Auswirkungen der Einführung alternierender „Lärmpausen“ für einzelne Wohngebiete und in einzelnen Tagesstunden (Clark, 2024).

3.8.3.1 *Schlafgestörtheit am Flughafen Frankfurt vor und nach Einführung des Nachtflugverbots von 23 bis 5 Uhr im Oktober 2011*

Die Auswirkungen der Eröffnung der Landebahn Nord-West am Flughafen Frankfurt im Oktober 2011 auf die Fluglärmbelastung und fluglärmbedingte Schlafgestörtheit wurde in der NORAH-Studie untersucht (Schreckenberg et al., 2015). Dazu fanden in den Jahren 2011 (vor Eröffnung der Nordwestbahn) sowie in den Jahren 2012 und 2013 u.a. Befragungen der Bevölkerung im Rhein-Main-Gebiet im Umfeld des Flughafens und wohnadressgenaue Berechnungen der Fluglärmpegel in diesen Jahren statt. Im Zuge der Eröffnung der Landebahn Nordwest wurde ein Nachtflugverbot von 23 Uhr bis 5 Uhr eingefügt, der nächtliche Fluglärm konzentriert sich seitdem weitgehend auf die Nachtstunden 22-23 Uhr und 5 bis 6 Uhr. Die Abbildung 25 zeigt, wie sich die berichtete Schlafstörungen in den drei Erhebungsjahren in Wohngebieten, die nachts eine Zunahme um mehr als 2 dB, eine Abnahme oder keine über +/- 2 dB hinausgehende Veränderung im Nachtpegel $L_{pAeq,22-06h}$ erfahren haben. Es zeigt sich, dass in den nachts unter 45 dB $L_{pAeq,22-06h}$ belasteten Gebieten insbesondere in der Gruppe, die eine Zunahme des Nachtpegels erfahren haben (Abbildung 25c), die selbstberichteten Schlafstörungen nach Flughafenerweiterung und Konzentration des nächtlichen Flugverkehrs auf die Nachtrandstunden innerhalb der 2,5dB-Nachtpegelklassen in den Jahren 2012 und 2013 höher lag, als vor diesen Änderungen im Jahr 2011.



Anmerkung. Dargestellt sind Mittelwerte der berichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen. t1 = Mittelwert in 2011; t2 = Mittelwert in 2012; t3 = Mittelwert in 2013.

Abbildung 25: Berichtete fluglärmbedingte Schlafstörungen pro 2,5 dB-Klasse im Nachpegel $L_{pAeq,22-06h}$ in der NORAH-Studie am Flughafen Frankfurt vor Eröffnung der Nordwestbahn (t1, 2011) sowie im 1. (t2, 2012) und 2. Jahr (t3, 2013) nach Eröffnung gruppiert nach Änderungen im $L_{pAeq,22-06h}$ gegenüber dem Erhebungszeitraum t1. Zwischen t1 und t2 wurde am Flughafen Frankfurt ein Nachtflugverbot von 23 Uhr bis 5 Uhr eingeführt.

Das heißt, wer nach Zunahme des nächtlichen Fluglärms (vorwiegend in der ersten und der letzten Nachtstunde) hinsichtlich der nächtlichen Fluglärmbelastung in die Pegelgruppen bis 45 dB landete, war im Durchschnitt stärker schlafgestört als diejenigen Personen, die im Durchschnitt diese nächtliche Fluglärmbelastung im Jahr 2011, vor den Veränderungen hatte. Zu erklären ist dies damit, dass die Personen am Frankfurter Flughafen, die in diesen vergleichsweise niedrigeren Pegelbereichen mit der

Zunahme in der Fluglärmbelastung konfrontiert wurden, diese eben konzentriert auf die Nachtrandstunden erfahren und damit erstmals gebündelt eine nächtliche Fluglärmbelastung kennengelernt haben, die sie zuvor nicht kannten.

Bei Nachtpegeln von 45 bis 50 dB $L_{pAeq,22-06h}$ bewirkt die Zunahme des Nachtpegels nach Eröffnung der neuen Landebahn keine Veränderung (bei gegebenen Nachtpegel) und ab 50 dB „kippt“ der Unterschied, d.h. nach Einführung des Nachtflugverbots von 23 bis 5 Uhr führt eine Zunahme des Nachtpegels nicht dazu, dass die Betroffenen auf den resultierenden Nachtpegel stärker reagieren als diejenigen, die diese nächtliche Fluglärmbelastung zuvor hatten. Erklären lässt sich das damit, dass in der Pegelklasse oberhalb von 50 dB $L_{pAeq,22-06h}$ Personen zu finden sind, die bereits 2011 nächtlichen Fluglärm ausgesetzt waren, d.h. Erfahrung mit Schlafstörungen aufgrund nächtlichen Fluglärms hatten und dann immerhin nach 2011 die Ruhepause von 23 bis 5 Uhr erlebten.

Der Effekt oberhalb von 50 dB zeigt sich auch bei denjenigen, die eine Abnahme des nächtlichen Fluglärms um mehr als 2 dB $L_{pAeq,22-06h}$ oder keine Veränderung über 2 dB $L_{pAeq,22-06h}$ hinaus erfahren haben (Abbildung 25a+bc). Die in Abbildung 25c beobachtete höhere Schlafgestörtheit im unteren Pegelbereich in den Jahren 2012 und 2013 bleibt in den zuletzt genannten zwei Gruppen aus. Das bedeutet, dass eine auf einzelne Stunden konzentrierte Änderung des nächtlichen Fluglärms insbesondere dann als störend wahrgenommen wird, wenn es sich dabei um eine Zunahme handelt bei Betroffenen, die zuvor kaum einer nächtlichen Fluglärmbelastung ausgesetzt waren.

Über die verschiedenen Befragtengruppen hinweg ergab die Einschätzungen der Störungen durch Fluglärm beim Einschlafen, Durchschlafen und Ausschlafen erwartungsgemäß keinen systematischen positiven Change-Effekt im Sinne einer reduzierten Schlafgestörtheit pro Pegelklasse beim Einschlafen und Ausschlafen, sondern nur für die Kernnachtstunden, in denen das Nachtflugverbot ab 2012 wirksam war. Bezogen auf das Ausschlafen zeigte sich sogar ein negativer Change-Effekt, d.h. innerhalb einer Nachtpegelklasse war die durchschnittliche Schlafgestörtheit 2012 und 2013 etwas höher als in 2011 (Abbildung 26).

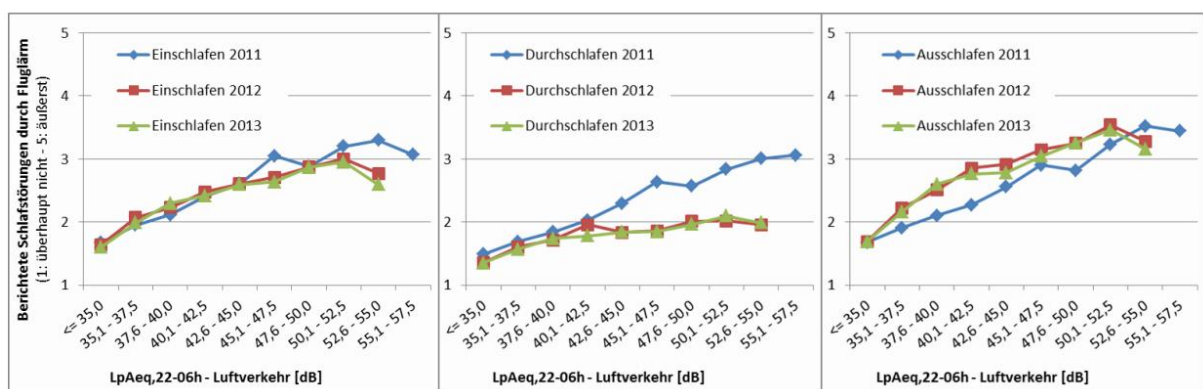


Abbildung 26: Schlafstörungen am Frankfurter Flughafen untergliedert nach fluglärmbedingten Störungen beim Einschlafen, beim Durchschlafen und morgens beim Ausschlafen 2011 vor Eröffnung der Landebahn Nordwest und Einführung der Kernruhezeit von 23 bis 05 (ab Oktober 2011) sowie im 1. (2012) und 2. Jahr (2013) danach

3.8.3.2 Auswirkungen alternierender Lärmpausen an Flughäfen in Großbritannien.

In Großbritannien werden an Flughäfen (London-Heathrow, Gatwick) für Wohngebiete im Flughafenumfeld direkt unterhalb von Flugpfaden alternierende Kurzzeitänderungen in der Fluglärmbelastung durch operative Verfahren (alternierende Nutzung von Start-/Landebahnen, verschiedene Flugroutennutzungen) herbeigeführt, die Lärmbetroffene kurzzeitig entlasten sollen (sog. *Noise Respite*; Department for Transport, 2017). Der Dauerschallpegel ändert sich dabei insgesamt kaum, die Entlastungen machen sich dennoch in der kurzzeitigen Reduzierung der Zahl von Flugbewegungen und in der damit einhergehenden Reduzierung von Einzelgeräuschbelastungen bemerkbar. Analysen der britischen Fluglärmwirkungsstudie SoNA 2014 zeigten am Flughafen London-Heathrow, dass Lärmreduzierungen für die Hälfte eines 16-Stunden-Tages, dann positiv bemerkbar waren, wenn die Reduzierung mindestens 9 dB im $L_{Aeq,8h}$ umfasste. War dies der Fall, dann waren 10%² bei einem Fluglärmpegel von 59,5 dB im 16h-Tagespegel $L_{Aeq,16h}$ hochgradig belästigt (*HA, highly annoyed*), während der Prozentanteil von 10% HA bei Lärmbetroffenen, die am Tag keine Lärmpausen durch alternierende Bahn- und Routennutzungen erfuhren, bereits bei 52 dB $L_{Aeq,16h}$ erreicht wurde. Die operationsbedingten Lärmpausen bewirkten also einen positiven Change-Effekt entsprechend eines Bonus von 7,5 dB.

Change-Effekte treten vor allem bei Geräuschzunahmen auf. Das heißt, überträgt man den hier festgestellten positiven Effekt eines Change-Effekts äquivalent zu einer 7,5 dB-Reduktion umgekehrt auf eine Zunahme der Flugbewegungen in einer Stunde, nämlich der ersten Nachtstunde von 22-23 Uhr, in der ein Abschwelen aufgrund der gebotenen besonderen Berücksichtigung der Nachtruhe zu erwarten ist, dann würde das bedeuten, dass unter den von dieser Flugbewegungszunahme betroffenen Anwohnenden Prozentanteile bei einem 7,5 dB niedrigeren Dauerschallpegel hochgradig belästigt sind als Anwohnende, die diese kurzzeitige Flugbewegungszunahme nicht erfahren.

3.9 Passiver Schallschutz

In der im Jahr 2018 neugefassten DIN 4109 "Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen für den Grundgeräuschpegel in schutzbedürftigen Räumen wurde ein Wert von $L_{AF,eq}$ (innen) in Höhe von nachts 25 dB (innen) festgelegt und für Wohn- und Schlafräume ein maximal zulässiger A-bewerteter Beurteilungspegel von nachts $L_r \leq 25$ dB genannt (DIN 4109-1:2018-01). Auch die DEGA-Richtlinie 103-1 "Schallschutz im Wohnungsbau, Teil 1" der Deutschen Gesellschaft für Akustik benennt als Bemessungswert des A-bewerteten Innenschallpegels für den Nachtzeitraum einen Wert von 25 dB $L_{i,N}$.

Fluglärm-bedingte Aufwachreaktionen treten ab einem ereignisbezogenen Maximalpegel innen von etwa 30 dB $L_{AS,max}$ bei einem A-bewerteten Hintergrundpegel von ca. 27 dB auf (Müller, 2019) - in der DLR Köln/Bonn-Studie lag der Schwellenwert bei 33 dB $L_{AS,max}$ (Basner et al., 2003), in der NORAH-Schlafstudie bei 32 dB $L_{AS,max}$ (Müller et al, 2015; Müller, 2019).

Aus der 2. Fluglärmschutzverordnung (FlugLSV) ergeben sich in Abhängigkeit vom achtstündigen Nachtpegel $L_{Aeq,Nacht}$ die in Tabelle 5 dargestellten Bauschalldämm-Maße. Aus der Differenz zwischen dem $L_{Aeq,Nacht}$ und den Bauschalldämm-Maßen ergibt sich ein angestrebter Innenpegel für den Schlafraum von etwa 20 dB $L_{Aeq,Nacht,innen}$.

² Lt. WHO (2018) Erheblichkeitskriterium in der Gesundheitswirkung für hochgradige Belästigung.

Tabelle 5: Bauschalldämm-Maße für die Nachtschutzzone nach der 2. FlugLSV

$L_{Aeq,Nacht}$ von	Bauschalldämm-Maß für Aufenthaltsräume
weniger als 50 dB	30 dB
50 bis weniger als 55 dB	35 dB
55 bis weniger als 60 dB	40 dB
60 bis weniger als 65 dB	45 dB
65 dB und mehr	50 dB

Schallschutzfenster der höchsten Schallschutzklasse (Klasse 6 nach VDI 2719) vermögen eine Bauschalldämmung von 50 dB (höchste Dämm-Maß in Tabelle 5) zu erreichen. Sie reichen aber dann nicht aus, wenn die gesamte Gebäudefassade nicht ausreichend schalldämmend wirkt, d.h. beispielsweise Rollladenkasten, Laibung, Außenwand, Lüftung, Leckagen, oder das Hausdach eine entsprechend geringere Dämmwirkung im Schlafraum aufweisen.

Um im Innenraum einen Pegel von 25 dB $L_{AF,eq}$ einzuhalten, dürfte bei einem Bauschalldämm-Maß von 50 dB in der Nachtschutzzone an einem Bestandsflughafen ein Nachtpegel von außen 75 dB $L_{Aeq,Nacht}$ nicht überschritten werden. Bei Geltung der Differenz von 9 dB zum Stundendauerschallpegel für 22-23 Uhr (vgl. Abschnitt 3.1) dürfte dieser 81 dB $L_{Aeq,1h}$, für die Stunde 22-23 Uhr nicht überschreiten.

4 Stellungnahme zu den Fragestellungen des Auftraggebers

4.1 Beantwortung der Fragestellungen

4.1.1 Fragestellung 1 – Wahrnehmung der Belastung in der ersten Nachtstunde 22-23 Uhr

Lässt sich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung feststellen, dass nach den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden die erste Nachtstunde regelmäßig als „Verlängerung des Flugbetriebs während des Tages“ oder gar so wahrnehmbar ist, dass „die Nacht zum Tag“ gemacht wird (also die Belastung in dieser Stunde als stärker belastend wahrgenommen wird, als während des Tages)?

Im Abschnitt 3.1 sind die Informationen zu Flugbewegungen und Fluglärmpegel am Flughafen Düsseldorf vorgelegt von Bürger gegen Fluglärm e.V. dargestellt. Aus ihnen geht hervor, dass über die vergangenen Jahre im Durchschnitt in der Stunde 22-23 Uhr ca. 8 (bzw. 5) mehr Landungen als in der Stunde davor sowie ca. 6-7 mehr Landungen (bzw. 3) gegenüber der Spitzenstunde am Tage (6-22 Uhr) in den sechs verkehrsreichsten Monaten (bzw. im Gesamtjahr) stattgefunden haben. Zwar sind hierbei die Starts nicht mitgezählt, allerdings entfallen diese in der Stunde 22-23 Uhr und außerdem erleben die je nach Betriebsrichtung 05 bzw. 23 unter der Anfluggrundlinie Wohnenden nur die Landungen, sofern in Wohngebieten unter überlagerten An- und Abflugpfaden nicht regelmäßig die Betriebsrichtungen ein oder mehrmals am Tag wechseln. Somit ergibt sich aus den vorgelegten Zahlen bezogen auf die Landungen für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden ein Anschwellen der Zahl der Flugbewegungen in der Stunde 22-23 Uhr.

Aus den für September 2024 vorgelegten Messwerten an drei DF DL-Messstellen (in Abbildung 3, S. 14) wurde abgeschätzt wie hoch jeweils der Modalwert der A-bewerteten Einzelpegel von Überflügen in den Abendstunden 18 bis 22 Uhr und in der ersten Nachtstunde 22-23 Uhr ist (Tabelle 6). Erneut zeigen die Messwerte deutlich höhere Flugbewegungszahlen in den Stunden 22-23 Uhr im Vergleich zu den Abendstunden davor bei entweder vergleichbar hohen Modalwerten oder um ca. 10 dB niedrigeren Modalwerten. In den Stunden, in denen die Modalwerte der Einzelpegel in den Abendstunden vor 22 Uhr so hoch sind wie in der Stunde 22-23 Uhr oder, wie an der Messstelle Lohhausen 1 um 5-10 dB höher, handelt es sich um Stunden mit deutlich geringeren Flugbewegungszahlen als in der Stunde 22-23 Uhr, so dass der Dauerschallpegel für diese Stunden, der sich aus der Höhe der Einzelpegel und der Zahl der Geräuschereignisse im Bezugszeitraum speist, geringer ausfallen sollte als der Dauerschallpegel in der Stunde 22-23 Uhr.

Tabelle 6: Übersicht der Modalwerte der A-bewerteten Einzelpegel von Überflügen zu ausgewählten Stunden im September 2024 in dB, abgeschätzt auf Basis der in Abbildung 3 (S. 14) dargestellten Messwerte.

DFDL-Messstelle	Modalwerte der A-bewerteten Einzelpegel von Überflügen zu ausgewählten Stunden in dB im September 2024				
	22-23 Uhr	21-22 Uhr	20-21 Uhr	19-20 Uhr	18-19 Uhr
Lohausen 1	ca. 80 dB	ca. 85 dB, aber in geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 75-80 dB, aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 85-90 dB, aber in geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 85-90 dB, aber in geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr
Tiefenbroich	ca. 80 dB	ca. 65-70 dB	ca. 80 dB aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 70 dB	ca. 70 dB
Brüderich	ca. 80 dB	ca. 70 dB	ca. 80 dB, aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 80 dB, aber in deutlich geringerer Anzahl gegenüber 22-23 Uhr	ca. 70 dB

Die vorgelegten Zahlen im Abschnitt 3.1 beinhalten in Abbildung 1d eine Gegenüberstellung der berechneten Stundenpegel für 20-21 Uhr, 21-22 Uhr und 22-23 Uhr und dem Tagespegel für 6-22 Uhr sowie dem maximalen Stundendauerschallpegel. Ausgehend von diesen vorgelegten Zahlen liegt der Stundendauerschallpegel 22-23 Uhr an zwei der drei DFLD-Messstellen in den sechs verkehrsreichsten Monaten im Jahr 2024 regelmäßig um 2 bis knapp 5 dB im $L_{Aeq,1h}$ über dem Tagesdauerschallpegel $L_{Aeq,Tag}$ und um 3 bis 4 dB über dem Stundenpegel $L_{Aeq,1h}$ in der Abendstunde 21-22 Uhr und um 2 dB über dem Stundenpegel $L_{Aeq,1h}$ in der Stunde 20-21 Uhr. Es handelt sich hierbei um Größenordnungen in der Differenz sowohl was die Zahl der stündlichen Flugbewegungen betrifft als auch die resultierenden Unterschiede in den Stundendauerschallpegeln, die wahrnehmbar sind (Ortscheid & Wende, 2004; Haubrich et al., 2020). Rechnet man noch den Belästigungs-Malus für den erhöhten Ruheanspruch in der Stunde 22-23 Uhr gegenüber den Abendstunden ab 20 Uhr in Höhe von rd. 5 dB hinzu (vgl. Abbildung 21, S. 36), dann kann geschlussfolgert werden, dass der Anstieg der Landungen in der Stunde 22-23 Uhr nicht nur als Verlängerung des Tages-Flugbetriebs wahrnehmbar ist, sondern auch für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden als deutlich belästigungssteigernd einzustufen ist; hinzu kommt dabei noch der Change-Effekt in der Lärmbelastung aufgrund von Fluglärmänderungen im Tagesverlauf äquivalent zu einem A-bewerteten Differenzpegel von 7,5 dB (vgl. Abschnitt 3.8.3.2).

Diese Einschätzung erfolgt auf Basis der vorgelegten Zahlen. Ein genaueres Beurteilung wäre möglich, wenn stündliche Auflösungen über einen 24-Stunden-Tag von Dauerschallpegel und Maximalpegel-Häufigkeitsverteilungen für einen längeren Zeitraum (zumindest für die sechs verkehrsreichsten Monate eines Jahres, das den aktuellen Flugverkehr widerspiegelt) getrennt für Landungen und Starts von Messstationen bzw. Messstellen am Flughafen Düsseldorf oder berechnet für relevante Immissionsorte vorliegen würden.

4.1.2 Fragestellung 2 – Beeinträchtigung durch die Flugverkehrsgeräuschbelastung in der ersten Nachtstunde im Vergleich zur Geräuschbelastung in den Abendstunden

Lässt sich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung feststellen, dass nach den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden die erste Nachtstunde eine Stunde ist, in der die Fluglärmbelastung der Anwohner in der Regel größer ist als in den Abendstunden?

Mit Verweis auf die Antwort zur Fragestellung 1 sowie folgenden Ausführungen wird dies bejaht.

- Die besondere Gestörtheit und Belästigung durch Fluglärm in der Stunde 22-23 Uhr ist aufgrund des höheren Ruheanspruchs zu dieser Stunde bei vergleichbarer Geräuschbelastung höher als die Belästigung in den Abendstunden davor; der Unterschied entspricht einem Malus gegenüber den Abendpegeln ab 20 Uhr von ca. 5 dB (vgl. Abbildung 21, S. 36).
- Die fluglärmbedingte Schlafgestörtheit ist vor allem zu Nachtrandstunden, also zu Beginn der Nacht in der Phase des Einschlafens und am Ende der Nacht wegen verfrühten Aufwachens in den Morgenstunden aufgrund von Fluglärm erhöht. Dies gilt sowohl für selbstberichtete Schlafgestörtheit (Abbildung 24, S. 38; Abbildung 22, S. 37), als auch für die physiologisch erfasste Schlafqualität (Abbildung 9, S. 23), Abbildung 12, S. 26).
- In der Einschlafphase betrifft dies weniger die physiologischen Aufwachreaktionen, definiert als Wechsel in die Schlafstadien S1 (leichtester Leichtschlaf) und Wach, sondern die Schwierigkeiten einzuschlafen bzw. in den Tiefschlaf zu gelangen, verbunden mit höheren Wachanteilen im Vergleich zu Nächten ohne Fluglärm.
- Je mehr sich Schlafperioden mit verkehrsreichen Stunden überlagern, umso stärker sind die Schlafstörungen (vgl. Abschnitt 3.5.1.6, S. 25), weswegen sich „frühschlafende“ Erwachsene (mit Schlafzeit vor 23:00 Uhr, vgl. Abbildung 23, S.38) durch den Nachtpegel stärker belästigt fühlen als „Spätschlafende“ (Schlafzeitbeginn nach 23:30 Uhr).
- Vor allem Kinder, die beispielsweise im Grundschulalter im Durchschnitt eine Schlafzeit von 21 bis 7 Uhr haben, sind vom Fluglärm in der Stunde 22-23 Uhr betroffen, da bei höherer Fluglärmexposition die Tiefschlafdauer verkürzt ist, die Einschlafzeit verlängert und schließlich die Schlafeffizienz tendenziell verringert ist. Das wiederum kann Auswirkungen auf die kognitive Entwicklung von Kindern haben, wenn insbesondere ihre Wissensverarbeitung und -konsolidierung im Tiefschlaf stattfindet und gerade diese Phase bei Schlafbeginn um 21 Uhr in die Stunde 22-23 Uhr fällt und dann beeinträchtigt wird.

4.1.3 Fragestellung 3 – Beurteilung des Konzepts eines Ab- und Anschwellens des Flugverkehrs Tag/Nacht und umgekehrt aus Lärmwirkungssicht

Lässt sich das in der Rechtsprechung aus § 29b LuftVG in Verbindung mit dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz entwickelte „Konzept eines Ab- und Anschwellens des Flugverkehrs“ vom Tag in die Nacht und umgekehrt auch auf Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung stützen?

Dies wird mit „ja“ beantwortet. Das unterschiedliche Ruhebedürfnis in der Nacht relativ zum Tag zeigt sich am prägnantesten an der Bonus-Malus-Darstellung von Brink et al. (2010), die deshalb hier noch einmal wiederholt wird (Abbildung 27). Die Darstellung zeigt, dass in den Abendstunden, teils auch schon von späten Nachmittagsstunden an, die Belästigungs-/Störungsempfindung bis in die

Nachtstunden ansteigt und in den Nachtstunden von 22-23 Uhr sowie in der letzten Nachtstunde 5-6 Uhr einen Höhepunkt im Malus erreichen. Die Nachtstunden dazwischen sind aufgrund der einfachen Tatsache, dass die meisten Menschen sich in diesen Stunden im Schlaf befinden, ausgespart.

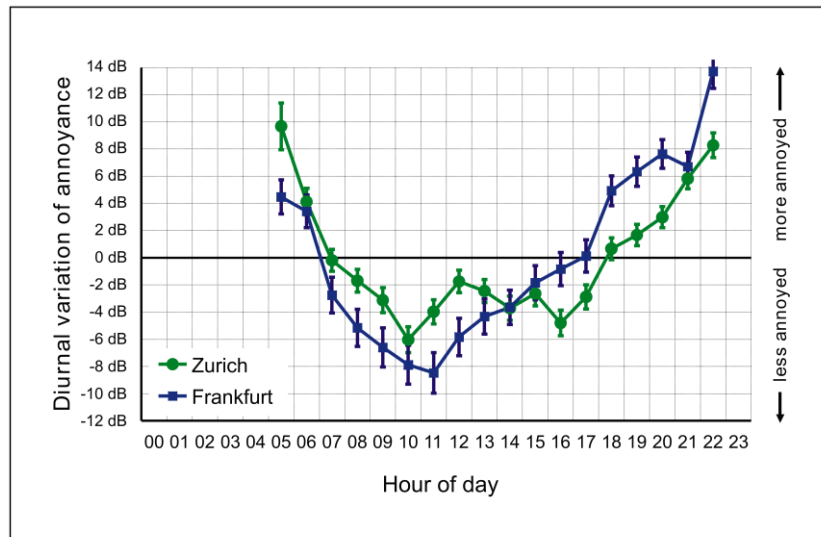


Abbildung 27: Profil der Variation hochgradiger Lärmbelastung im Tagesverlauf, dargestellt in normierten Differenzpegelwerten in dB gegenüber dem durchschnittlichen Pegel über 24 Stunden, normiert auf 0 dB. Quelle: Brink et al. (2010) – entspricht Abbildung 21, S. 36)

Das erhöhte Ruhebedürfnis in der Nacht wiederum wird belegt durch die Befunde zu den Fluglärmwirkungen auf die Schlafphysiologie (203.5.1 und 3.5.2) und insbesondere auch den weiteren, gesundheitlichen Folgen, die nächtlicher Fluglärm bzw. fluglärmbedingte Schlafstörungen im weiteren haben (Abschnitt 3.6).

4.1.4 Fragestellung 4 – Prüfung der Notwendigkeit einer Absenkung der Flugverkehrsgeräuschbelastung in der ersten Nachtstunde für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden

Ist es aus Lärmwirkungssicht zum Schutz der Bevölkerung vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Lärm geboten, die Fluglärmbelastung in den ersten Nachtstunden gegenüber der Fluglärmbelastung am Tage und/oder in den Abendstunden abzusenken?

Auch diese Frage wird mit „ja“ beantwortet. Die im Kapitel 3.5 beschriebenen Befunde zu den schlafbeeinträchtigenden Wirkungen des Fluglärms, die im Kapitel 3.6 dargestellten Ergebnisse zu den Gesundheitsrisiken, die durch nächtlichen Fluglärm und durch Störungen des Schlafs entstehen und schließlich auch die Bedeutung, die ein gesunder, ungestörter Schlaf für im Schlaf stattfindende, notwendige Gedächtnisprozesse hat, kognitive Prozesse, die gerade auch für eine gesunde, geistige Entwicklung von Kindern notwendig sind – all dies spricht aus Lärmwirkungssicht dafür, dass beginnend in den späten Abendstunden, die ersten Nachtstunden eine lärmsensible Tageszeit sind, die im besonderen Maße Schutz erfordern. Zwar finde sich immer wieder Aussagen darüber, dass lärmbedingte, physiologische Aufwachreaktionen in der zweiten Nachthälfte im stärkeren Maße auftreten als in der ersten Nachthälfte. Aber, zum einen sind diese Aufwachreaktionen eng definiert als Schlafstadienwechsel in S1 (Leichtschlaf) und Wach; andere Schlafstörungen wie Latenzen beim Einschlafen oder Erreichen des Tiefschlafs oder die Schlafenttiefung, d.h. ein (z.B. lärmbedingter)

Wechsel von Tiefschlaf in Leichtschlaf S2 oder REM-Schlaf, fallen hierbei raus. Zum anderen ist aufgrund zunehmender Entmüdung nach länger verstrichener Schlafzeit die Aufwachwahrscheinlichkeit am Ende der Nacht allemal höher, so dass die zu diesem Zeitpunkt erkennbare erhöhte fluglärminduzierten Aufwachreaktionsbereitschaft in ihrer gesundheitlichen Bedeutung anders zu bewerten ist als fluglärmbedingte Störungen, die es erschweren, überhaupt erst einmal in den Zustand des Schlafens zu gelangen oder die Phase des für die Schlafgesundheit notwendigen Tiefschlafs unverzögert zu erreichen und darin zu verbleiben – Prozesse, die vor allem in der ersten Nachthälfte relevant sind.

Ein – extremes – Gedankenspiel soll dies verdeutlichen: Für die NORAH-Studie wurde die Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit ereignisbezogener Fluglärmpegel bei Bettgehzeiten zwischen 22:00 und 22:30 Uhr für morgens ca. 5:30 Uhr berechnet, was in der Studie für die Fragestellungen am Frankfurter Flughafen zielführend war. Wenn die Aufwachwahrscheinlichkeit nur für eine viertel Stunde später, für 5:45 Uhr berechnet würde, dann würde wegen der bis dahin insgesamt verstrichenen Schlafzeit die fluglärminduzierte Aufwachwahrscheinlichkeit höher ausfallen, als die fluglärminduzierte Aufwachwahrscheinlichkeit für die Zeit von z.B. 23:30 Uhr (vgl. dazu Abbildung 14, S. 28). Aber wenn in dem Gedankenspiel um 6:00 Uhr morgens regelmäßig innerhalb der Woche der Wecker klingelt, dann dürfte die aufgrund höherer Aufwachwahrscheinlichkeit auftretende fluglärminduzierte Aufwachreaktion um 5:45 Uhr kaum stärkere weitere gesundheitsbeeinträchtigende Wirkungen haben, als der um 6.00 routinemäßig klingelnde Wecker und das dann anschließende Aufstehen. Die gesundheitliche Bedeutung, die eine extern bedingte Aufwachreaktion über die Fragmentierung des Schlafs hinaus hat, korreliert nicht zwangsläufig mit der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens.

4.1.5 Fragestellung 5 – Prüfung des Ausgleichsbedarfs für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden

Bedarf es aus Lärmwirkungssicht bei der aus den vorliegenden Informationen zur Fluglärmbelastung um den Flughafen Düsseldorf ersichtlichen Belastung der unter der Anfluggrundlinie Wohnenden in der ersten Nachtstunde unter Berücksichtigung der verbleibenden Nachtruhe eines besonderen Ausgleichs? Wie könnte ein solcher Ausgleich aus Lärmwirkungssicht erfolgen?

Das aus den vorliegenden Zahlen (vgl. Kapitel 3.1) ableitbare Anschwellen von Flugbewegungen und resultierenden Fluglärmbelastungen für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden in der ersten Nachtstunde von 22-23 Uhr stellt eine belastigungs- und störungssteigende Verteilung der Flugbewegungen über den Tag dar. Der Anstieg des Aufkommens landender Flugzeuge zu dieser Tageszeit hat eine andere (höhere) Belastigungswirkung als es ein vergleichbarer Aufkommensanstieg zu anderen Tagesstunden, z.B. frühen Nachmittagsstunden bedeuten würde. Insofern besteht für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden dann ein gesundheitlich beeinträchtigender Nachteil gegenüber Anwohnenden, die in Wohngebieten wohnen, in denen sie in der Stunde von 22-23 Uhr vom Wegfall oder zumindest Reduktion der Zahl von Starts profitieren. Eine Verrechnung dieser beiden Situationen, d.h. Aufrechnung der Vorteile für die unter Abflugpfaden Wohnenden gegenüber den Nachteilen für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden stellt aus Lärmwirkungssicht kein Konzept dar, um betroffene Anwohnende vor Gefahren, erheblichen Nachteilen und erheblichen Belästigungen durch Fluglärm zu schützen.

Eine andere Frage ist, ob Störungen, Belästigungen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in der ersten Nachtstunde bei verbleibender Nachtruhe in nachfolgenden Nachtstunden kompensiert werden können. Dies wird von Lärmwirkungsforschenden zumindest teilweise bejaht (Griefahn & Spreng, 2004). Allerdings gelingt die Kompensation nicht vollständig (Basner & Samel, 2005; Griefahn, 1977) und es können Nachwirkungen der Schlafstörungen auftreten, etwa in Form von Leistungsdefiziten (Tilley and Wilkinson, 1984). Basner (2008) untersuchte die Auswirkungen nächtlichen Fluglärms auf die anhand eines Pupillenunruhe-Index gemessene Tagesmüdigkeit nach einer lärmfreien und nach 9 Fluglärmnächten und findet eine erhöhte Tagesmüdigkeit nach Fluglärmnächten, obwohl die lärmbedingten Veränderungen in der Makrostruktur des Schlafs in den Nächten relativ gering war. Er kommt zu dem Schluss, dass die Aufrechterhaltung der Makrostruktur des Schlafs während der Nacht seinen Preis hat, nämlich den biologischen Preis mangelnder Schlaferholung am Folgetag.

Insofern sind auch unter Berücksichtigung der verbleibenden Nachtruhe, Folgewirkungen von Beeinträchtigungen in der ersten Nachtstunde möglich, d.h. durch eine verbleibende Nachtruhe nach Landung regulärer als auch verspäteter Flugzeuge in den ersten Nachtstunden wird ein Ausgleichsbedarf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden nicht ausgeschlossen.

Ein Ausgleichsbedarf für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden ist nachvollziehbar und aus Lärmwirkungssicht begründbar. Grundsätzlich gibt es dabei verschiedene Ausgleichsoptionen – eine Abkehr von der verbleibenden Nachtruhe dabei ausgeschlossen – von denen hier drei genannt werden. Für alle Optionen gilt, dass für deren Realisierbarkeit die Erfüllung weiterer Kriterien (z.B. Flugsicherheit) geprüft werden muss.

- d) (Monetäre) Kompensation aufgrund des Anschwellens des Flugverkehrsaufkommens (Landungen) in der ersten Nachtstunde.
- e) Reduktion eines Teils der Landungen in der ersten Nachtstunde und ggf. Umverteilung auf Tagesstunden tagsüber zwischen 6 und 22 Uhr.
- f) Die Einführung einer alternierenden Pause in den Landungen um 22-23 Uhr, in der Form wie es in Großbritannien durch operative Verfahren durchgeführt wird (Department for Transport, 2017). Das könnten unter (b) erwähnte Umverteilungen von Landungen auf andere Tagesstunden sein, die aber nicht fix festgelegt werden, sondern alternierend eingeführt werden.

Optionen der hier genannten Art zum Ausgleich für die unter der Anfluggrundlinie Wohnenden können nicht allein aus Sicht der Lärmwirkungsforschung abschließend bewertet werden, da hierzu technische, organisatorische und regulatorische Aspekte einzubeziehen sind.

Die grundsätzliche Option der monetären Kompensation ist aus Lärmwirkungssicht kritisch zu bewerten, da das Aufrechnen von Gesundheit gegenüber materiellen Vorteilen ethisch bedenklich ist und zum anderen eine interventions-induzierte Ungleichheit bedeuten kann, wenn gerade einkommensschwache Personen durch monetäre Kompensation dazu verleitet werden, Gesundheitsrisiken in Kauf zu nehmen.

Strenggenommen sind sowohl die Lärmbetroffenen als auch das Flugverkehrs- bzw. Fluglärmmanagement vor Ort diejenigen, die die eigentliche Expertise für die Identifikation geeigneter Ausgleichsmaßnahmen haben. In der Lärmwirkungsforschung ist seit langem bekannt, dass die

Fluglärmbelästigung von Lärmbetroffenen nicht nur Ergebnis der Fluglärmexposition ist, sondern auch mit dem erlebten Prozedere von Entscheidungen und Maßnahmen, die Auswirkungen auf den Fluglärm haben, einhergeht und hier der wahrgenommene Mangel an Mitwirkungsmöglichkeiten und eine als mangelnd erlebte Fairness von Entscheidungsprozeduren die Situation für Lärmbetroffene nur verschlimmert (z.B. Felscher-Suhr et al., 2001; Hauptvogel et al., 2021; Heyes et al., 2022). Andernorts, nämlich z.B. in Großbritannien, wird dieses Wissen genutzt, um die Perspektive von Lärmbetroffenen in einer Flughafenregion bei der Frage der Bündelung vs. Streuung von Flugrouten in die Planungen einzubeziehen (Porter et al., 2024).

5 Literaturverzeichnis

- Bartels, S. (2023). Auswirkungen des Fluglärms bei Kindern. Vortrag auf der Zentralen Veranstaltung des Tag gegen Lärm 2023, 25.04.2023. <https://www.tag-gegen-laerm.de/publikationen/tgl-veranstaltungen>.
- Bartels, S., Quehl, J., Fritsch, K., Aeschbach, D. (2024). Aircraft noise effects in vulnerable populations. Proceedings of Inter-Noise 2024, Nantes, France, 25-29 August 2024, Paper No. 3394. https://doi.org/10.3397/IN_2024_3707
- Basner, M., & Siebert, U. (2006). Markov-Prozesse zur Vorhersage fluglärmbedingter Schlafstörungen. *Somnologie*, 10(4), 176-191.
- Basner, M., & Samel, A. (2007). Schlafphysiologische Bewertung nächtlicher Fluglärmbeschränkungen vor dem Hintergrund aktueller Urteile des Bundesverwaltungsgerichts. *Lärmbekämpfung*, 2(3), 86-94.
- 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. doi:10.3390/ijerph15030519
- Basner, M., Griefahn, B., & Van den Berg, M. (2010). Aircraft noise effects on sleep: mechanisms, mitigation and research needs. *Noise and health*, 12(47), 95-109.
- Basner, M., Isermann, U., Samel, A. (2005). Die Umsetzung der DLR-Studie in einer lärmmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 4.
- Basner, M., Witte, M., & McGuire, S. (2019). Aircraft noise effects on sleep—results of a pilot study near Philadelphia International Airport. *International journal of environmental research and public health*, 16(17), 3178.
- Basner M., H. Buess, D. Elmenhorst, A. Gerlich, N. Luks, H. Maaß, L. Mawet, E.W. Müller, U. Müller, G. Plath, J. Quehl, A. Samel, M. Schulze, M. Vejvoda, J. Wenzel (2004). *Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung*. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- Benz, S., Kuhlmann, J., Jeram, S., Bartels, S., Ohlenforst, B., & Schreckenberger, D. (2022). Impact of Aircraft Noise on Health. In L. Lylekian, A. Covrig and A. Maximova (Eds.). *Aviation Noise Impact Management* (p. 173-196). Springer Open Access. DOI:10.1007/978-3-030-91194-2_7. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-91194-2_7
- Brink, M., Schreckenberger, D., Thomann, G., Basner, M. (2010). Aircraft noise indexes for effect oriented noise assessment. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 1012-1025.
- Brink, M., Schäffer, B., Vienneau, D., Pieren, R., Foraster, M., Eze, I. C., ... & Wunderli, J. M. (2019). Self-reported sleep disturbance from road, rail and aircraft noise: exposure-response relationships and effect modifiers in the SiRENE study. *International journal of environmental research and public health*, 16(21), 4186.
- Brown, A.L. & van Kamp, I. (2009a). Response to a change in transport noise exposure: Competing explanations of change effects. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125 (2), 905-914.
- Brown, A.L. & van Kamp, I. (2009b). Response to a change in transport noise exposure: A review of evidence of a change effect. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(5), 3018-3029.
- Brown, A.L. & 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, 873. doi:10.3390/ijerph14080873.
- Brown, R. E., Basheer, R., McKenna, J. T., Strecker, R. E., & McCarley, R. W. (2012). Control of sleep and wakefulness. *Physiological Reviews*, 92, 1087-1187. doi:10.1152/physrev.00032.2011
- Clark, C., Martin, R., van Kempen, E., Alfred, T., Head, J., Davies, H. W., ..., Stansfeld, S. A. (2006). Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension: The RANCH Project. *American Journal of Epidemiology*, 163, 27-37. doi:10.1093/aje/kwj001
- Clark, C., Crumpler, C. & Notley, A. H. (2020). Evidence for Environmental noise Effects on Health for the United Kingdom Policy Context: A systematic review of the effects of environmental noise on mental health, wellbeing, quality of life, cancer, dementia, birth, reproductive outcomes, and cognition. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 393. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020393>
- Department for Transport. (2017). *Air Navigation Guidance 2017*.
- Deutsche Bundestag. Wissenschaftliche Dienste. (2025). *Gesundheitliche Auswirkungen von Fluglärm. Stand der Forschung mit Fokus auf Studien aus Deutschland. Sachstand WD 8 - 3000 - 091/24.* <https://www.bundestag.de/resource/blob/1050714/c42f9843a6369c223968a9cff8308f68/WD-8-091-24-pdf.pdf>
- Elmenhorst, E-M., Pennig, S., Roly, V., Quehl, J., Müller, U., Maaß, H., Basner, M. (2012). Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance. *Science of the Total Environment* 424 (2012) 48–56.
- European Environment Agency (EEA). (2025). *Environmental noise in Europe – 2025*. EEA Report 05/2025. Kopenhagen, Dänemark: European Environment Agency. doi: 10.2800/1181642

- Felscher-Suhr, U., Schreckenberger, D., Schuemer, R., Möhler, U. (2001). Vertrauensbildung als flankierende Maßnahme zur Lärmbelastigungsminderung? Ein Vorschlag für eine interdisziplinäre Umsetzung in der Praxis. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2001*, 228-229.
- Greiser, E. & Greiser, C. (2010). Risikofaktor nächtlicher Fluglärm. Abschlussbericht über eine Fall-Kontroll-Studie zu kardiovaskulären und psychischen Erkrankungen im Umfeld des Flughafens Köln/Bonn. Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 3708 51 101. Schriftenreihe Umwelt & Gesundheit, 01/2010. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/risikofaktor-naechtlicher-fluglaerm>
- Griefahn, B. (1977). Long-term exposure to noise – aspects of adaptation, habituation, and compensation. *Waking Sleeping*, 1, 383-386.
- Griefahn, B., & Spreng, M. (2004). Disturbed sleep patterns and limitation of noise. *Noise and Health*, 6(22), 27-33.
- Griefahn, B., Basner, M., Bröde, P., Robens, S. (2008). Development of a sleep disturbance index (SDI) for the assessment of noise-induced sleep disturbances. *Somnologie*, 12, 150–157.
- Guski, R., Basner, M., Brink, M. (2012). Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Fluglärms: aktueller Wissensstand (Literaturauswertung). Schlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Bochum: Fakultät für Psychologie der Ruhr-Universität.
- Guski, R., Schreckenberger, D., Schuemer, R. (2017). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1539; DOI:10.3390/ijerph14121539.
- Guski, R., Schreckenberger, D., Kuhlmann, J., Seidler, A., Schubert, M., Romero Starke, K. (2023). Aktualisierung der Evaluierung der Forschungsergebnisse zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen. Gutachten im Auftrag des FluglärmSchutzvereins Rhein-Main e. V. Frankfurt. Inhalt: 22.12.2023, redaktionelle Überarbeitung: 02.04.2024. URL: <https://www.flk-frankfurt.de/datei/de/flk/-/2005/extLink>
- Haubrich, J., Benz, S., Isermann, U., Schäffer, B., Schmid, R., Schreckenberger, D., Wunderli, J.-M. & Guski, R. (2020). Leq+X - Lärmexposition, Ereignishäufigkeiten und Belästigung: Re-Analyse von Daten zur Belästigung und Schlafstörung durch Fluglärm an deutschen und Schweizer Flughäfen. Hauptbericht. Bochum: Ruhr-Universität Bochum. DOI:10.46586/rub.164.139
- Hauptvogel, D., Müller, U., Márki, F. (2021). Aircraft-noise induced awakenings as a more adequate indicator for better night noise protection concepts around airports. *Proceedings of the 13th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem*. Stockholm, Sweden, 14-17 June 2021.
- Hauptvogel, D., Bartels, S., Schreckenberger, D., & Rothmund, T. (2021). Aircraft noise distribution as a fairness dilemma — A review of aircraft noise through the lens of social justice research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 7399. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147399>
- Heritier, H.; Vienneau, D.; Foraster, M.; Eze, I.C.; Schaffner, E.; Thiesse, L.; Ruzdik, F.; Habermacher, M.; Kopfli, M.; Pieren, R.; et al. Diurnal variability of transportation noise exposure and cardiovascular mortality: A nationwide cohort study from Switzerland. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 2018, 221, 556–563.
- Heyes, G., Hauptvogel, D., Benz, S., Schreckenberger, D., Hooper, P., & Aalmoes, R. (2022). Engaging Communities in the Hard Quest for Consensus. In L. Leylekian, A. Covrig and A. Maximova (Eds.). *Aviation Noise Impact Management* (p. 219-240). Springer Open Access. DOI:10.1007/978-3-030-91194-2_9. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-91194-2_9
- Itzkowitz, N., Gong, X., Atilola, G., Konstantinou, G., Adams, K., Jephcote, C., ... & Blangiardo, M. (2023). Aircraft noise and cardiovascular morbidity and mortality near Heathrow Airport: a case-crossover study. *Environment International*, 177, 108016
- Järup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadum, E., Dudley, M.L., Savigny, P., Seiffert, I., Swart, W., Breugelmans, O., Bluhm, O., Selander, J., Haralabidis, A., Dimakopoulou, K., Soutzi, P., Velonakis, M., Vigna-Tagliani, F., on behalf of the HYENA study team. (2008). Hypertension and Exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environmental Health Perspectives*, 116, 329-333
- Klatte, M., Spilski, J., Mayerl, J., Möhler, U., Lachmann, T., & Bergström, K. (2017). 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.
- Müller, U. (2021). ANIMA D3. 2-Development of indicators for night noise protection zones. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5517783>
- Müller, U., Aeschbach, D., Elmenhorst, E.-M., Mendolia, F., Quehl, J., Hoff, A., Rieger, I., Schmitt, S., Littel, W. (2015). Fluglärm und nächtlicher Schlaf. In Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 4). Kelsterbach: Umwelthaus gGmbH. URL: https://www.norah-studie.de/de/publikationen.html?file=files/norah-studie.de/Downloads/NORAH_Bd4_M2_Schlaf_Endbericht.pdf
- Münzel, T., Daiber, A., & Hahad, O. (2023). Bedeutung der Umwelt–Luftverschmutzung, Lärm und Hitze als kardiovaskuläre Risikofaktoren. *Aktuel Kardiologie*, 12, 113–119. doi:10.1055/a-1978-6169

- Münzel, T., Sørensen, M., & Daiber, A. (2021). Transportation noise pollution and cardiovascular disease. *Nature Reviews Cardiology*, 18(9), 619-636. doi:10.1038/s41569-021-00532-5
- Ohayon, M. M., Carskadon, M. A., Guilleminault, C., & Vitiello, M. V. (2004). Meta-analysis of quantitative sleep parameters from childhood to old age in healthy individuals: developing normative sleep values across the human lifespan. *Sleep*, 27(7), 1255-1273.
- Persson Waye, K., Löve, J., Lercher, P., Dzhambov, A.M., Klätte, M., Schreckenberger, D., Belke, C., Leist, L., Ristovska, G., Jeram, S., Kanninen, K.M., Selander, J., Arat, A., Lachmann, T., Clark, C., Botteldooren, D., White, K., Julvez, J., Foraster, M., Kaprio, J., Bolte, G., Psyllidis, A., Gulliver, J., Boshuizen, H., Bozzon, A., Fels, J., Hornikx, M., van den Hazel, P., Weber, M., Brambilla, M., Braat-Eggen, E., Van Kamp, I., Vincens, N., Equal-life Scientific Team (2023). Adopting a child perspective for exposome research on mental health and cognitive development - conceptualisation and opportunities. *Environmental Research*, 117279. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117279>
- Porter, N.D., Kershaw, A.D. & Ollerhead, J.B. (2000). Adverse effects of night-time aircraft noise. R&D report 9964. London (UK): Civil Aviation Authority.
- Porter, N., Hooper, P., Knowles, A., Raje, F., Monaghan, R. (2024). Exploring the concept of fair and equitable distribution to minimise social unacceptability of airspace design options – final report. East Sussex: Anderson Acoustics Ltd. https://www.gatwickairport.com/on/demandware.static/-/Sites-Gatwick-Library/en_GB/v1749638617200/images/Corporate-PDFs/Noise%20%20Airspace/Engagement/NMB%203/FED-FINAL-REPORT-7.pdf
- Quehl, J., Mueller, 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, 765-778.
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological Review*, 93, 681-766. doi:10.1152/physrev.00032.2012
- Rechtschaffen, A., & Kales, A. (1968). A manual of standardised terminology, techniques and scoring system of sleep stages in human subjects. Bethesda: U.S. Department for Health, Education and Welfare. Public Health service.
- Saucy, A., Schäffer, B., Tangermann, L., Vienneau, D., Wunderli, J. M., & Röösli, M. (2021). Does night-time aircraft noise trigger mortality? A case-crossover study on 24 886 cardiovascular deaths. *European Heart Journal*, 42(8), 835-843.
- Seidler, A., Schubert, M., Romero Starke, K., Hegewald, J., Riedel-Heller, S. G., Zülke, A., . . . Zeeb, H. (2023). Einfluss des Lärms auf psychische Erkrankungen des Menschen, Texte | 04/2023, Dessau: Roßlau: Umweltbundesamt.
- Smith, M. G., Cordoza, M., & Basner, M. (2022). Environmental Noise and Effects on Sleep: An Update to the WHO Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ Health Perspect*, 130(7), 76001. doi:10.1289/ehp10197
- Spilski, J., Koole, R., Giehl, C., Boshuizen, H., Bergström, K., Lachmann, T., & Klätte, M. (2022). The relevance of the number of aircraft events for children's cognition: Further evidence from a machine learning algorithm. *Proceedings of 24th International Congress on Acoustics, October 24 to 28, 2022, Gyeongju, South Korea.*
- Schreckenberger, D., Guski, R., Haubrich, J. & Spilski, J. (2019). Assessment of the impact of changes in noise exposure at an expanding airport by means of the multiple item aircraft noise annoyance scale (MIAS). *Proceedings of ICA 2019. Aachen, Germany: International Congress on Acoustics 9-13 September 2019. DOI:10.18154/RWTH-CONV-239852*
- Schreckenberger, D., Faulbaum, F., Guski, R., Ninke, L., Peschel, C., Spilski, J. & Wothge, J. (2015). Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität. In Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 3). Kelsterbach: Umwelthaus gGmbH. https://www.norah-studie.de//de/publikationen.html?file=files/norah-studie.de/Downloads/NORAH_Bd3_M1_Endbericht_151031.pdf
- Tilley, A. J., & Wilkinson, R. T. (1984). The effects of a restricted sleep regime on the composition of sleep and on performance. *Psychophysiology*, 21(4), 406-412.
- Van Kamp, I. & Davies, H. (2013). Noise and health in vulnerable groups: a review. *Noise & Health*, 15, 153-159.
- Van Kamp, I., Simon, S., Notley, H., Baliatsas, C. & Van Kempen, E. (2020). Evidence relating to environmental noise exposure and annoyance, sleep disturbance, Cardio-Vascular and Metabolic Health Outcomes in the context of IGCB (N): A Scoping Review of New evidence. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3016. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093016>
- Walker, M. P. (2009). The role of slow wave sleep in memory processing. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 5(2 suppl), S20-S26.
- Watson, N.F., Badr, M.S., Belenky, G., Bliwise, D.L., Buxton, O.M., Buysse, D., Dinges, D.F., Gangwisch, J., Grandner, M.A., Kushida, C., Malhotra, R.K., Martin, J.L., Patel, S.R., Quan, S.F. & Tasali, E. (2015). Joint consensus statement of the American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society on the recommended amount of sleep for a healthy adult: methodology and discussion. *Sleep*, 38(8), 1161-1183.
- World Health Organization (WHO) (2009). Night Noise Guidelines for Europe. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe. <https://iris.who.int/handle/10665/326486>
- World Health Organization (WHO). (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

6 Zur Person des Sachverständigen

Der um die Stellungnahme gebetene Sachverständige, Dr. Dirk Schreckenberger, ist Diplom-Psychologe und arbeitet in dem von ihm geleiteten Institut, ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie- und Sozialforschung, Hagen, seit 29 Jahren in der Lärmwirkungsforschung. Er hat zahlreiche interdisziplinäre Feld- und Laborstudien zur Wirkung von Umgebungslärm, darunter Fluglärm, einschließlich Überschallgeräusche, Straßen- und Schienenverkehrslärm, Lärm von Windenergieanlagen, Luftwärmepumpen, Sport- und Freizeitanlagen sowie zum Infraschall verantwortlich durchgeführt und dazu publiziert.

Zur Fluglärmwirkung hat Herr Schreckenberger an dem Einzelgutachten von Frau Prof. Dr. Griefahn, das im Jahr 2004 in Teilen in die sog. Fluglärmsynopse einfließt, mitgewirkt und seit 2003 mehrere Feldstudien und Gutachten am Flughafen Frankfurt im Zuge des Ausbaivorhabens zur Landebahn Nordwest durchgeführt (u.a. RDF-Studie, NORAH-Studie, Lärmpausen-Evaluation, Erarbeitung der Frankfurter Fluglärmindizes). Er war in mehreren von der Europäischen Union geförderten internationalen Forschungsprojekten zur Fluglärmwirkung maßgeblich beteiligt (*COSMA*, *ANIMA*, *RUMBLE*). In den vergangenen zwei Jahren 2023/2024 hat Herr Schreckenberger zusammen mit Forschungskolleginnen und -kollegen das vom Umweltbundesamt geförderte Forschungsvorhaben "Vergleich vorhandener Verfahren zur Beurteilung von nächtlichem Fluglärm und für Entscheidungen über baulichen Schallschutz für Schlafräume" (FKZ 3720 56 102 0) abgeschlossen sowie das vom Fluglärmschutzverein Rhein-Main e.V. im Auftrag der Fluglärmkommission Frankfurt a.M. beauftragte Gutachten "Aktualisierung der Evaluierung der Forschungsergebnisse zur Wirkung von Fluglärm auf den Menschen" erstellt. Im Auftrag der Schutzgemeinschaft Fluglärm Dortmund – Unna hat Herr Schreckenberger die Stellungnahme zur Bestimmung der Abwägungsrelevanz für nächtlichen Fluglärm im Einzelfall angefertigt, welche dem Oberlandesgericht NRW für die Verhandlung am 23.08.2024 zum Nachtflugverkehr am Flughafen Dortmund vorgelegt wurde.

Herr Schreckenberger war als Mitglied des *Systematic Review Teams* an der Aufbereitung des Forschungsstands zu den *WHO Environmental Noise Guidelines* von 2018 beteiligt. Seitdem berät er die WHO, Region Europa und seit 2023 die WHO Region West Pazifik, zu methodischen Fragen der Bewertung von Gesundheitsfolgen von Umgebungslärm.

Er ist seit 2017 Mitglied der von der Europäischen Kommission, DG Environment, einberufenen Noise Expert Group und nominiertes Mitglied des Umweltausschusses (*CAEP*) der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (*ICAO*). Weiterhin ist Herr Schreckenberger in der wissenschaftlichen Fachorganisation *International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN)* engagiert (2017-2021 Leiter der Fachgruppe "Community Response to Noise", 2021-2023 ICBEN Vice President, seit 2023 Mitglied des Executive Committee, das die allgemeine Aufsicht über ICBEN-Aktivitäten ausübt) und seit 2015 stellvertretender Vorsitzender des ALD - Arbeitsring Lärm der Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA).