



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung EKLB
Commission fédérale pour la lutte contre le bruit CFLB
Commissione federale per la lotta contro il rumore CFLR
Cumissiun federala per il cumbat cunter la canera CFCC

Grenzwerte für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm

**Empfehlungen der Eidgenössischen Kommission für
Lärmbekämpfung EKLB**

**Herausgegeben von der Eidgenössischen Kommission für
Lärmbekämpfung EKLB
Bern, 2021**

Impressum

Herausgeber

Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung (EKLB)

Mitglieder (in alphabetischer Reihenfolge): Blaise Arlaud, Jürg Artho, Dario Bozzolo, Christian Cajochen, Stefan Fahrländer, Anne-Christine Favre (bis 2019), Christoph Jäger, Ottilia Lütolf Elsener, Christa Perregaux, Martin Röösl, Sabine Schlittmeier, André Schrade, Georg Thomann, Silvia Tobias, Jean-Marc Wunderli

Arbeitsgruppe (in alphabetischer Reihenfolge)

Jürg Artho, Dr. phil. (EKLB)

Hans Bögli, Dr. sc. techn. (BAFU)

Mark Brink, PD Dr. phil. (EKLB und BAFU)

Christoph Jäger, Dr. iur. (EKLB)

Martin Röösl, Prof. Dr. phil. (EKLB)

Georg Thomann, Dr. sc. techn. (EKLB)

Jean Marc Wunderli, Dr. ing. (EKLB)

Zitierung

EKLB (Hrsg.) 2021: Grenzwerte für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm. Empfehlungen der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung EKLB, Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung, Bern.

PDF-Download

<https://www.eklb.admin.ch/de/dokumentation/berichte>

(Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden)

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Deutsch.

© EKLB 2021

Die EKLB arbeitet als interdisziplinäre und selbständige ausserparlamentarische Fachkommission des Bundes auf den Gebieten der Lärm- und Erschütterungsbekämpfung unter Einbezug von Wissenschaft, Forschung, Vollzug und Verwaltung. Sie berät das eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in wissenschaftlichen und methodischen Fragen der Lärm- und Erschütterungsbekämpfung und deren Auswirkungen auf Gesundheit / Wohlbefinden und Lebensraum und erarbeitet die entsprechenden Berichte, Empfehlungen und Anträge.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage, Zielsetzung, Vorgehen	9
1.1 Ausgangslage	9
1.2 Vorarbeiten	10
1.3 Auftrag und Ziel.....	11
1.4 Grundsätzliches Vorgehen zur Bestimmung von Belastungsgrenzwerten ..	12
2 Rechtliche Grundlagen	15
2.1 Allgemeines	15
2.2 Schutzziel.....	15
2.3 Schutzgut.....	16
2.4 Schutzkonzept	16
2.5 Belastungsgrenzwerte	17
2.6 Massgebende Lärmwirkung.....	18
2.7 Geltungsbereich und Ermittlungsort der Lärmbelastung.....	20
2.8 Auslegung unbestimmter Rechtsbegriffe	22
3 Ermittlung von generischen Grenzwerten in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night}	25
3.1 Schritt 1: Festlegung von gesundheitsrelevanten Wirkungen.....	26
3.2 Schritt 2: Ermittlung von Disability Weights (DWs)	31
3.3 Schritt 3: Festlegung von Mindestanforderungen für die Qualität der berücksichtigten wissenschaftlichen Studien.....	33
3.4 Schritt 4: Ermittlung des Stands der Wissenschaft	33
3.5 Schritt 5: Bestimmung von akzeptierbaren Risiken, die den Übergang zwischen unerheblichen und erheblichen Lärm-Belastungen definieren.....	34
3.6 Schritt 6: Ermittlung von Expositions-Wirkungsbeziehungen und Endpunkt-bezogenen Schwellenwerten	38

3.7	Schritt 7: Bestimmung generischer Grenzwerte als L_{den} und L_{night} für die untersuchten Lärmarten.....	41
4	Analyse weiterer Elemente der Lärm-Beurteilungsmethodik und deren Anpassungsbedarf	45
4.1	Geltungsbereich.....	45
4.2	Ermittlungsort.....	46
4.3	Belastungsmass.....	49
4.4	Beurteilungszeiten	50
4.5	Differenzierung der Belastungsgrenzwerte in Empfindlichkeitsstufen (ES) .	52
4.6	Differenzierung in Planungs-, Immissionsgrenz- und Alarmwert	54
4.7	Grenzwertschema.....	57
4.8	Festlegung der Lärmart-bezogenen Grenzwerte	59
4.9	Beurteilungspegel und Pegelkorrekturen.....	64
4.10	Offene Punkte und Forschungsbedarf	69
5	Empfehlungen.....	73
5.1	Geltungsbereich und Ermittlungsort.....	74
5.2	Beurteilungsmass und Beurteilungszeiten.....	74
5.3	Empfindlichkeitsstufen (ES)	75
5.4	Belastungsgrenzwerte und Grenzwertschema	75
5.5	Einordnung der Empfehlungen in den nationalen und internationalen Kontext.....	77
Anhang	84	
A.1	Tabellen	84
A.2	Im Zusammenhang mit der Grenzwertsetzung relevante rechtliche Normen im Originalwortlaut (mit Hervorhebungen wichtiger Begriffe).....	89
A.3	Für spezifische Fragestellungen erstellte gesonderte Auswertungen	91
A.4	Glossar der Begriffe, Abkürzungen und Symbole.....	115
A.5	Literaturverzeichnis.....	122

Zusammenfassung

Überblick

Das heutige Konzept zum Schutz der Bevölkerung vor Lärm in der Schweiz wurde in den 1980er-Jahren im Umweltschutzgesetz (USG) festgelegt und nachfolgend in der Lärmschutz-Verordnung (LSV) konkretisiert. Die heute gültigen Grenzwerte für Lärm wurden mit dieser Verordnung bestimmt. Da die wissenschaftlichen Grundlagen der zurzeit geltenden Grenzwerte für Verkehrslärm (Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) mittlerweile veraltet sind, legt die Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung (EKLB) in diesem Bericht Empfehlungen für eine Anpassung dieser Grenzwerte bzw. für die Anpassung des Grenzwertsystems in der LSV vor.

Die Empfehlungen in diesem Bericht basieren auf einer umfassenden Analyse der heute verfügbaren wissenschaftlichen Literatur über gesundheitliche Auswirkungen der Lärmbelastung einerseits, aber auch auf langjährigen Erfahrungen mit dem Vollzug der LSV und der Rechtsprechung im Bereich des Umweltlärms andererseits. Die Empfehlungen haben zum Ziel, dem Bundesrat die nötigen Mittel an die Hand zu geben, das Grenzwertsystem in der Schweiz so auszugestalten bzw. die Lärmgrenzwerte wo nötig so anzupassen, dass sie den Anforderungen des USG genügen. Die Empfehlungen beziehen sich ausschliesslich auf Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm.

Die wichtigsten Empfehlungen

Regelungsaspekt:	Empfehlung:
Geltungsbereich der Grenzwerte	Die Grenzwerte sollen wie bisher für alle lärmempfindlichen Räume gelten, allerdings sollen die Regelungen für Räume, die nicht einem langfristigen Wohnzweck dienen, flexibler ausgelegt werden.
Ermittlungsort	Ermittlungsort soll neu der lauteste Punkt auf der Gebäudehülle der zu beurteilenden Wohn- bzw. Nutzungseinheit sein (anstelle der Mitte des offenen Fensters lärmempfindlicher Räume).
Belastungs- und Beurteilungsmasse	Als Belastungsmass soll der L_{Aeq} für die Tag- und Nachtperiode oder für die Tagperiode alternativ zum L_{Aeq} der L_{den} verwendet werden. Die Beurteilung der Lärmimmissionen soll wie bisher mittels eines Beurteilungspegels L_r , zusammengesetzt aus Belastungsmass und Pegelkorrekturen, erfolgen.
Beurteilungszeiten	Die Nachtperiode soll neu auf 9 Stunden (22–07 Uhr) ausgedehnt werden; die Tagperiode reduziert sich auf 15 Stunden (07–22 Uhr). Für Fluglärm wird für die Stunde zwischen 06 und 07 Uhr neu ein zusätzlicher Einzelstundengrenzwert empfohlen.

Regelungsaspekt:	Empfehlung:
Empfindlichkeitsstufen	Empfindlichkeitsstufen (ES) sollen beibehalten werden. Neu sollen die Grenzwerte in der ES II und III gleichgesetzt werden.
Grenzwertschema	Das bisherige Grenzwertschema mit einheitlichen IGW für alle Verkehrslärmarten soll im Wesentlichen beibehalten werden. In der ES II und ES III sollen die IGW bei 60 dB für die Tagperiode und 50 dB für die Nachtperiode festgelegt werden. Lärmart-spezifische Unterschiede sollen wie bisher durch Pegelkorrekturen im Beurteilungspegel L_r abgebildet werden.
Grenzwerte	Die Grenzwerte sollen gemäss dem aktuellen Stand des Wissens angepasst werden. Daraus resultieren je nach Lärmart, Beurteilungsperiode und ES, Verschärfungen des IGW um typischerweise 0 bis 11 dB.

Übersicht über die Arbeiten der Kommission

In einer ersten Phase ihrer Arbeit stellte die Kommission die rechtlichen Grundlagen zusammen und sichtete und bewertete die im Bereich der Lärm-Epidemiologie und Belästigungsforschung relevante wissenschaftliche Literatur. Es wurde eine systematische, schrittweise Vorgehensweise festgelegt, wie ausgehend von wissenschaftlichen Grundlagen mittels sog. Expositions-Wirkungsbeziehungen Lärmgrenzwerte bestimmt werden können.

Zunächst wurden «generische Grenzwerte» für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm ermittelt, welche auf den in den meisten Grundlagenstudien und Meta-Analysen zu Lärmwirkungen verwendeten Lärmbelastungsmassen L_{den} und L_{night} basieren. Sie können als eine Art Immissionsgrenzwerte (IGW) im Sinne des USG aufgefasst werden, denn sie definieren für jede der drei Lärmarten, bei welchem akustischen Pegel die Grenze zur Schädlichkeit bzw. Lästigkeit überschritten wird. Für die Ermittlung der generischen Grenzwerte waren sowohl somatisch-medizinische Wirkungen (Erkrankungen im engeren Sinne, z.B. des Herz-Kreislauf-Systems) als auch Belästigung und selbstberichtete Schlafstörungen durch Lärm massgebend. Für somatisch-medizinische Wirkungen und für selbstberichtete Wirkungen (Belästigung und Lärm-induzierte Schlafstörungen) wurden pro Lärmart zunächst separate Grenzwerte aus den jeweiligen Expositions-Wirkungsbeziehungen abgeleitet und danach der jeweils niedrigere Wert als generischer Grenzwert übernommen.

In einem nachfolgenden Schritt wurden weitere Elemente der bisherigen Lärm-Beurteilungsmethodik analysiert und es wurde ein Grenzwertschema entworfen, in welchem die generischen Grenzwerte in konkrete Belastungsgrenzwerte übersetzt wurden. Im Weiteren wurden Empfehlungen zur Definition des Ermittlungsortes der Lärmbelastung und zur Festlegung der Beurteilungszeiten sowie weiteren Regelungsaspekten der LSV entwickelt.

Zuletzt wurden die Empfehlungen mit anderen bereits existierenden Regularien verglichen, insbesondere mit den bisherigen Grenzwerten in der LSV.

Empfehlungen für Grenzwerte

Die umfassend aktualisierten wissenschaftlichen Grundlagen, welche von der Lärmwirkungsforschung und Umweltepidemiologie in den letzten Jahren und Jahrzehnten bereitgestellt wurden, legen diverse Anpassungen der Grenzwerte in der LSV nahe, welche abhängig von der Lärmart, der Empfindlichkeitsstufe, und der beurteilten Zeitperiode, unterschiedlich stark ausfallen.

Beim **Strassenlärm** bleibt der IGW in der ES II tags etwa gleich. In der Nachtperiode wird der IGW in der ES II um 3 dB strenger.

Beim **Eisenbahnlärm** wird empfohlen, sowohl die Tag- als auch die Nachtperiode strenger zu beurteilen: Der IGW soll in der ES II am Tag um 6 dB und in der Nacht um 2 dB strenger werden.

Der **Fluglärm** wird gemäss Empfehlung sowohl am Tag als auch in der Nacht strenger beurteilt als bisher. In der ES II tags werden die Grenzwerte um 6 dB strenger. Die Nachtzeit wird weiterhin mit Einzelstundengrenzwerten beurteilt, die in der ES II um 1–3 dB strenger werden.

Da bei allen in diesem Bericht behandelten Lärmarten empfohlen wird, den IGW in der ES III auf das Niveau der ES II zu senken, ergibt sich in der ES III eine grundsätzliche Verschärfung von 5 dB.

Allgemeine Empfehlungen

Geltungsbereich. Räume, die nicht einem langfristigen Wohnzweck dienen, können in Bezug auf die Geltung der Grenzwerte und die Massnahmen zum Schutz vor Lärm flexibler behandelt werden als Wohnungen, sofern der Lärmschutz im Inneren gewährleistet ist.

Ermittlungsort. Als Ermittlungsort der Lärmbelastung ist der lauteste Punkt auf der Gebäudehülle der zu beurteilenden Wohn- oder Nutzungseinheit vorzusehen (ohne Berücksichtigung von auskragenden Anbauten wie z.B. Balkonen). Die Lärmbelastung am lautesten Punkt soll anzeigen, ob grundsätzlich ein Lärmproblem besteht und ob die lärmverursachende Anlage zu sanieren ist oder nicht.

Beurteilungszeiten. Es wird empfohlen, die Beurteilungszeit für die Nachtperiode für alle Verkehrslärmarten prinzipiell auf den Zeitraum von 22–07 Uhr und damit auf eine 9-stündige Dauer auszudehnen resp. die Tagperiode auf den Zeitraum von 07–22 Uhr und damit von heute 16 auf 15 Stunden zu verkürzen.

Beurteilungsmass. Als Beurteilungsmass für die Lärmbelastung wird wie bisher die Verwendung eines Beurteilungspegels L_r empfohlen. Dieser wird gebildet aus einem

akustischen Belastungsmass und Normierungskorrekturen, welche die unterschiedlich ausgeprägten Wirkungen der verschiedenen Lärmarten berücksichtigen. Dieses Vorgehen führt dazu, dass das Werturteil über die unerwünschte und deshalb mit einem Grenzwert zu beschränkende Wirkung einer bestimmten Lärmart lediglich in den Normierungskorrekturen (in der LSV mit K bezeichnet) zum Ausdruck kommt. Damit wird das bisherige System der LSV in einem wesentlichen Element übernommen, wobei die Normierungskorrekturen dem aktuellen Stand des Wissens angepasst werden.

Grenzwertschema. Es wird empfohlen, am bisherigen Grenzwertschema mit den zwei Zeitperioden Tag und Nacht sowie den drei Arten von Belastungsgrenzwerten, Planungswert (PW), Immissionsgrenzwert (IGW) und Alarmwert (AW), festzuhalten. Der Beurteilungspegel des IGW soll für alle Lärmarten einheitlich festgelegt werden, und Unterschiede in der Wirkung zwischen Lärmarten sollen wie bis anhin mit Pegelkorrekturen (K) berücksichtigt werden. Die Kommission spricht sich grundsätzlich auch für die Beibehaltung der Empfindlichkeitsstufen (ES) aus. Sie erkennt aber auch die Wichtigkeit eines einheitlichen Schutzes des Wohnens vor Lärm. Entsprechend empfiehlt sie die Gleichsetzung der Grenzwerte für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm in den ES II und ES III. Die Kommission empfiehlt für Zonen der ES II und ES III, den IGW bei $L_r = 60$ dB für die Tagperiode resp. $L_r = 50$ dB für die Nachtperiode festzulegen.

Zur Beschreibung der akustischen Belastung während der Tagperiode wird empfohlen, als Belastungsmass entweder den L_{den} mit den Zeiträumen 07–19 Uhr, 19–22 Uhr und 22–07 Uhr, oder einen ungewichteten Mittelungspegel über 15 Stunden zwischen 07 und 22 Uhr zu verwenden. Vor- und Nachteile beider Varianten werden im Bericht diskutiert. Da sich Vor- und Nachteile gegenseitig etwa aufheben, wird keine Empfehlung für das eine gegenüber dem anderen Mass formuliert.

Als Belastungsmass für die Nachtperiode wird grundsätzlich ein L_{night} über 9 Stunden, zwischen 22 und 07 Uhr empfohlen. Die Beurteilung des Fluglärms in der Nacht weicht in der LSV schon heute von den anderen zwei Verkehrslärmarten ab. Neu wird vorgeschlagen, für Fluglärm nebst den bisherigen drei Nachtstunden (22–23 Uhr, 23–00 Uhr, und 05–06 Uhr) auch die Morgenstunde zwischen 06 und 07 Uhr mit einem gesonderten 1-Stunden-Grenzwert zu belegen.

Es wird empfohlen, sämtliche Pegelkorrekturen zur Berücksichtigung geringer Verkehrsmengen aus der LSV zu streichen. Die Pegelkorrekturen, welche spezielle Geräuschcharakteristiken wie beispielsweise Rangierlärm und Schienenkreischen berücksichtigen, sind hingegen beizubehalten, da keine Hinweise vorliegen, dass diese nicht störungs- bzw. wirkungsgerecht wären.

1 Ausgangslage, Zielsetzung, Vorgehen

1.1 Ausgangslage

Die heute geltende Regelung zur Bekämpfung des Lärms wurde mit Inkrafttreten des Umweltschutzgesetzes (USG, 1985) und der Lärmschutz-Verordnung (LSV, 1987) in ihren Grundprinzipien festgelegt. Sie enthält Vorschriften zur Vorsorge gegen Lärm, Anforderungen zum Lärmschutz bei neuen Anlagen und zur Sanierung von bestehenden Anlagen sowie Anforderungen an Bauzonen und Gebäude mit lärmempfindlichen Räumen in lärmbelasteten Gebieten.

Im Grundsatz soll die Bevölkerung vor schädlichem oder lästigem Lärm geschützt werden (Art. 74 BV). Was als schädlicher oder lästiger Lärm gilt, muss vom Bundesrat in Form von Belastungsgrenzwerten festgelegt werden. Er hat diesen Auftrag mit der Festlegung von Belastungsgrenzwerten in den Anhängen der LSV erfüllt. Diese enthalten seit Inkrafttreten der Verordnung im Jahr 1987 Belastungsgrenzwerte für Strassen, Eisenbahnanlagen, zivile Schiessanlagen, Industrie- und Gewerbeanlagen, Militärflugplätze und zivile Flugplätze für Kleinflugzeuge. Zudem regeln die Anhänge, wie die massgeblichen Lärmbelastung ermittelt werden muss. Die LSV regelt ebenso, wo die Belastungsgrenzwerte eingehalten werden müssen. Seit 1987 wurde die LSV mehrmals revidiert und mit Belastungsgrenzwerten für weitere Lärmarten ergänzt, unter anderem mit Belastungsgrenzwerten für zivile Flugplätze (Flughäfen) mit Grossflugzeugen (2001).

Obwohl die Lärmbekämpfung merkbare Erfolge beim Schutz und bei der Vorsorge vor Lärm und bei der Sanierung von lärmigen Anlagen vorweisen kann, wurden die Beurteilungsmethode und die aktuell gültigen Belastungsgrenzwerte vor allem im Bereich des Lärms von Strassen, Eisenbahnen und Flughäfen in den letzten Jahren verschiedentlich infrage gestellt. Dies ist nicht überraschend, denn die massgeblichen wissenschaftlichen Grundlagen dieser Belastungsgrenzwerte stammen zu einem grossen Teil aus den 1970er, 1980er- und 1990er- Jahren.

Die Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung (EKLB, im Folgenden auch einfach als «Kommission» bezeichnet) und ihre Vorgängerin (Eidgenössische Kommission für die Beurteilung von Lärm-Immissionsgrenzwerten) veröffentlichten bisher sieben Berichte¹ mit Empfehlungen für Belastungsgrenzwerte. Die den Lärm für Transportinfrastrukturanlagen (Strassen, Eisenbahnen und Flughäfen) betreffenden Berichte sind teilweise schon bis zu 40 Jahre alt. Einmal festgelegte Belastungsgrenzwerte sind jedoch periodisch auf ihre Übereinstimmung mit neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und Erfahrungen zu überprüfen und nötigenfalls an diese anzupassen [1]. Eine unterbliebene Anpassung kann dazu führen, dass ein Belastungsgrenzwert im Rahmen der Rechtsanwendung als nicht mehr gesetzeskonform beurteilt wird, wie

¹ Siehe <https://www.eklb.admin.ch/de/dokumentation/berichte/>

dies z.B. beim Fluglärm am frühen Morgen von 06–07 Uhr der Fall war.² Auch die Lärmwirkungsforschung hat in den letzten Jahrzehnten viele neue Erkenntnisse hervorgebracht. Die Entwicklungen in den letzten rund 30 Jahren führten somit einerseits zu neuen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen und andererseits zu Problemen beim Vollzug der geltenden Regelungen. Es ist daher unbestritten, dass eine Überprüfung der geltenden Belastungsgrenzwerte in der LSV notwendig ist. Dies wurde auch von der EKLB sowie vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) erkannt, welche schon im Jahr 2007 ein entsprechendes Projekt zur Überprüfung der wissenschaftlichen Grundlagen der Belastungsgrenzwerte initiierten. Dieses kam 2010 mit der Vorlage eines Berichts zum Handlungsbedarf zum Abschluss [2]. Auch der vom Bundesrat im Jahr 2017 beschlossene «Nationale Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung» [3] bekräftigte die Notwendigkeit einer solchen Überprüfung.

1.2 Vorarbeiten

Die ersten Überlegungen der Kommission für eine Überprüfung und allfällige Anpassung der Belastungsgrenzwerte für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm fanden schon im Jahr 2007 und in den Folgejahren statt. In einem ersten Schritt wurde damals im Rahmen einer umfangreichen Vorstudie von einem interdisziplinären Projektteam im Auftrag der EKLB geklärt, wie sich verschiedene Dimensionen des Lärmumfelds (Technik und Betrieb, Akustik, Lärmwirkung, Recht) seit Inkrafttreten der Belastungsgrenzwerte entwickelt haben und ob sich daraus ein begründeter Handlungsbedarf zur detaillierten Überprüfung der Belastungsgrenzwerte ergäbe. Die Vorstudie umfasste fünf sog. Input-Papiere [4-8] und einen Synthesebericht [2], welcher den Handlungsbedarf aufzeigte. Im Synthesebericht kam das Projektteam zum Ergebnis, die empirisch-wissenschaftlichen Grundlagen der Lärmbeurteilung, insbesondere der Lärm-Wirkung (Belästigung, Störung, somatisch-medizinische und soziale Auswirkungen), müssten aktualisiert werden.

Nach Vorliegen des erwähnten Syntheseberichts hatte sich die Kommission und das BAFU in einem zweiten Schritt mit der Umsetzung des Forschungsbedarfs zur Überprüfung und ggf. Anpassung der Belastungsgrenzwerte auseinandergesetzt und eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe beauftragt, ein entsprechendes Forschungskonzept [9] zu erstellen. Im Forschungskonzept wurde die Aktualisierung des Wissens in folgenden Themenbereichen als vordringlich eingestuft:

- Aktivitätsmuster bzw. Zeitnutzung der Schweizer Bevölkerung (Tag/Nacht-Unterscheidung)

² Vgl. Urteil BGer 137 II 58 (Flughafen Zürich), 22.12.2010

- Langfristige Auswirkungen des Lärms auf die (somatisch-medizinische oder psychische) Gesundheit (epidemiologische Studien)
- Belastungs-Wirkungsbeziehungen für Verkehrslärm nach Tageszeiten für Belästigung und Schlafstörung
- Lärminduzierte Schlafstörungen

In der Folge dienten diese Vorarbeiten als Grundlage für die Lancierung der vom Schweizerischen Nationalfonds und teilweise vom BAFU finanzierten SiRENE-Studie, die zwischen 2014 und 2020 in mehreren Teilstudien die Wirkungen der Lärmbelastung durch Strassen-, Schienen- und Flugverkehr auf Belästigung, Schlaf sowie kardiovaskuläre und kardiometabolische Morbiditäts- und Mortalitätsrisiken in der Schweiz untersuchte. Die Ergebnisse der SiRENE-Studie sind in diversen wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert worden.³

Neben der SiRENE-Studie sind im fast gleichen Zeitraum die «Environmental Noise Guidelines for the European Region» (Richtlinien für Umgebungslärm/Umweltlärm) der WHO [10] erarbeitet und im Oktober 2018 veröffentlicht worden. Diese vielbeachtete Publikation beinhaltet, ausgehend von der wissenschaftlichen Literatur im Zeitraum von 2000–2014, konkrete Richtlinien für den Schutz der Gesundheit vor Lärm.

Mit der SiRENE-Studie, den WHO-Guidelines und anderen in der Zwischenzeit durchgeführten empirischen Studien aus dem In- und Ausland liegen nun Grundlagen vor, auf deren Basis geprüft werden kann, ob die Belastungsgrenzwerte für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm noch den gesetzlichen Anforderungen entsprechen oder ob bzw. in welchem Umfang diese Grenzwerte anzupassen sind.

1.3 Auftrag und Ziel

Die Ausarbeitung von Vorschlägen für Belastungsgrenzwerte und damit zusammenhängend von Vorschlägen zur Lärm-Beurteilungsmethodik gehört zu den Aufgaben der EKLb gemäss der bundesrätlichen Einsetzungsverfügung vom 14. Dezember 2018.⁴

Gestützt auf aktualisierte wissenschaftliche Grundlagen einerseits und auf die langjährigen Erfahrungen mit dem Vollzug der LSV andererseits, erarbeitete die EKLb im hier vorliegenden Bericht Vorschläge, wie die LSV bzw. die in ihr definierten Lärmgrenzwerte anzupassen sind, um den Anforderungen des Umweltschutzgesetzes (USG) in Zukunft zu genügen.

³ Vollständige Publikationsliste der SiRENE-Studie unter <http://www.sirene-studie.ch>

⁴ Einsehbar auf: <https://www.eklb.admin.ch/de/die-kommission/uebersicht/>

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf **Strassenlärm, Eisenbahnlärm und zivilen Fluglärm** (ohne Kleinfliegerei). Dies sind die – an der Anzahl Betroffener gemessen – wichtigsten Lärmquellen in der Schweiz. Wo im Bericht nichts anderes erwähnt ist, ist mit dem Begriff «Lärm» nur der Lärm dieser drei Quellen gemeint. Ziviler Schiesslärm, Industrie- und Gewerbelärm, Lärm von militärischen Waffen-, Schiess- und Übungsplätzen, militärischer Fluglärm, Alltagslärm oder Störungen und Belästigungen durch Infraschall werden im Bericht nicht behandelt.

Die Ziele des Berichtes sind:

- zu überprüfen, ob aufgrund des aktuellen Standes der Wissenschaft oder der Erfahrung (Art. 15 USG) Hinweise bestehen, welche Änderungen an den bestehenden Belastungsgrenzwerten für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm und an der Beurteilungsmethodik der LSV notwendig machen;
- Vorschläge für die Beurteilung von Lärmimmissionen zu entwickeln, die auf klar festgelegten gesundheitlichen Kriterien und auf dem aktuellen Stand des Wissens oder der Erfahrung beruhen;
- wo nötig Empfehlungen für Anpassungen an der bestehenden Beurteilungsmethodik einschliesslich der Belastungsgrenzwerte zu machen.

1.4 Grundsätzliches Vorgehen zur Bestimmung von Belastungsgrenzwerten

Das ganze Gefüge der Regelungen zum Schutz vor Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm in der LSV besteht nicht nur aus den Belastungsgrenzwerten in Dezibel, sondern ist weit komplexer. Zur Reduktion der Komplexität beim Vorhaben, Belastungsgrenzwerte für Verkehrslärm verschiedener Quellen zu überprüfen und ggf. neue Grenzwerte und damit zusammenhängende Beurteilungsmethoden für Lärm vorzuschlagen, gliederte sich die Arbeit der Kommission in in mehrere Phasen:

In einer ersten Phase sichtete die Kommission zunächst die rechtlichen Grundlagen und nahm eine Auslegung unbestimmter Rechtsbegriffe im Lärmschutzrecht vor (siehe Kapitel 2). Dann stellte sich die Kommission die Aufgabe, generische Grenzwerte für alle drei Verkehrslärmarten zu ermitteln (siehe Kapitel 3). Sie verwendete dazu die in der EU und in der Forschung gängigen Belastungsmasse L_{den} (für den 24-Stunden-Tag) und L_{night} (für die Nacht). Mit dem Begriff «generisch» ist gemeint, dass in diesem Schritt ganz allgemein der Frage nachgegangen wird, wie Gesundheitsschutz-orientierte Grenzwerte festgelegt werden müssen und wo sie nach wissenschaftlichen Kriterien liegen, um ihre Funktion erfüllen zu können, den Menschen vor schädlichen und lästigen Einwirkungen zu schützen. Diese generischen Grenzwerte haben zum Ziel, für jede Verkehrslärmart (Strasse, Eisenbahn, Luftverkehr) diejenige

akustische Belastung – in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night} – zu definieren, welche im Sinne des Gesetzes als «schädlich oder lästig» gelten kann. Die generischen Grenzwerte definieren somit, ähnlich den IGW in der LSV, bei welchem akustischen Pegel die Grenze zur Schädlichkeit bzw. Lästigkeit überschritten wird.

Für die Festlegung von Grenzwerten braucht es erstens (mindestens) eine Expositions-Wirkungsbeziehung, welche aufzeigt, wie sich die Wirkung bei einer Zunahme der Lärmbelastung (Exposition) ändert. Zweitens ist ein Kriterium notwendig, welches definiert, wie stark die Lärmbelastung sein darf, um weder als schädlich noch als lästig zu gelten. In fast allen Lärmwirkungsstudien werden Wirkungen des Lärms lärmartspezifisch untersucht, d.h. bezogen auf eine bestimmte Lärmquelle wie Strassen-, Eisenbahn- oder Fluglärm. L_{den} und L_{night} sind dabei die am besten untersuchten Belastungsmasse.⁵ Sie werden sowohl in der Umgebungslärmrichtlinie der EU [11] als auch in den Environmental Noise Guidelines der WHO [10] verwendet und lassen sich mit guter Näherung auf andere Belastungsmasse, z.B. den 16-Stunden-Tagesmittelungspegel L_{day} , umrechnen [12]. Im Weiteren bilden L_{den} und L_{night} die massgeblichen Expositionsvariablen in einer ganzen Reihe von Originalstudien, unter anderem in der SiRENE-Studie, und in vielen Meta-Analysen. Es ist daher sinnvoll, sich (vorerst) auf diese beiden Belastungsmasse zu konzentrieren, für ebendiese generische Grenzwerte zu bestimmen und sich erst in einem zweiten Schritt mit weiteren Ausdifferenzierungen der Grenzwert-Systematik und allenfalls einer Konversion in andere, ggf. für die Schweiz geeignetere Belastungsmasse zu befassen (siehe Kapitel 4).

Die generischen Grenzwerte für jede Lärmart wurden grundsätzlich bei derjenigen Belastung festgelegt, bei der *gegenüber einem ausreichend niedrigen, «unkritischen» Pegel ein wissenschaftlich belegtes, erhöhtes Risiko für gesundheitsschädliche oder lästige Auswirkungen besteht*. Für die Ermittlung der generischen Grenzwerte waren somit sowohl somatisch-medizinische und psychische Wirkungen als auch die Belästigung durch Lärm mit den entsprechenden Expositions-Wirkungsbeziehungen massgebend. Damit wird impliziert, dass ein Grenzwert nur dann den gesetzlichen Vorgaben genügt, wenn er sowohl schädliche als auch lästige Immissionen begrenzt. Zur Beurteilung der Schädlichkeit zog die Kommission den Stand des Wissens zu somatisch-medizinischen und psychischen Wirkungen bei. Zur Beurteilung der Lästigkeit bezog sich die Kommission auf Befragungen mit selbstberichteten Angaben zur Lärmbelästigung und zu ebenfalls selbstberichteten lärminduzierten Schlafstörungen.

Die Umsetzung der einzelnen Schritte mit dem Ziel der Festlegung lärmartspezifischer generischer Grenzwerte (in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night}) wird in den Kapiteln 3.1 bis 3.7 beschrieben.

⁵ Der L_{den} setzt sich aus dem energieäquivalenten Durchschnitts- bzw. Dauerschallpegel (L_{Aeq}) des Tages (07–19 Uhr), des Abends (19–23 Uhr) und der Nacht (23–07 Uhr) zusammen. Der Abend- und der Nachtzeitraum werden dabei mit einer Korrektur (Malus) von 5 dB resp. 10 dB beaufschlagt, um die in diesen Zeitperioden erhöhte Empfindlichkeit der Menschen gegenüber Lärm zu berücksichtigen. Der L_{night} entspricht dem energieäquivalenten Mittelungspegel während der Nachtstunden (23–07 Uhr). Ggf. kommen andere Zeitbezüge als die hier genannten zur Anwendung.

In einer zweiten Phase wurden die verbleibenden Elemente und Regelungsaspekte bzw. die gesamte Beurteilungsmethodik der LSV hinsichtlich ihres Anpassungsbedarfs untersucht (siehe Kapitel 4). Im Vordergrund der Analysen standen der massgebliche *Ermittlungsort* der Lärmbelastung, das zu empfehlende *Belastungs- und Beurteilungsmass*, die *Beurteilungszeiten*, die raumplanerische Differenzierung nach *Empfindlichkeitsstufen*, die *Differenzierung zwischen Planungs-, Immissionsgrenz- und Alarmwerten* und die in der LSV zurzeit angewendeten *Pegelkorrekturen*. Dies geschah einerseits basierend auf der aktuellen wissenschaftlichen Literatur sowie auf gesonderten Auswertungen von Daten der SiRENE-Studie, namentlich der SiRENE-Befragung [13, 14] (vgl. Anhang A.3), und andererseits basierend auf den in den letzten Jahrzehnten gesammelten Erfahrungen mit dem Vollzug der LSV. Ausgehend von diesen Grundlagen werden in Kapitel 5 konkrete Empfehlungen zur Beurteilungsmethodik für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm, zum Grenzwertschema in der LSV und zu den Grenzwerten selbst formuliert.

2 Rechtliche Grundlagen

2.1 Allgemeines

Der Lärmschutz ist Teil des Umweltschutzes, der in der Bundesverfassung (BV)⁶ und hauptsächlich im Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG) geregelt ist. Die Lärmschutz-Verordnung (LSV) des Bundesrates konkretisiert den gesetzlichen Rahmen.

Im Bereich des Verkehrslärms ist zusätzlich die Spezialgesetzgebung als funktionales Lärmschutzrecht zu beachten, insbesondere das Bundesgesetz über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE, Massnahmen zur Sanierung von Eisenbahnstrecken), das Bundesgesetz über die Luftfahrt (LFG) mit der Verordnung über die Infrastruktur der Luftfahrt (VIL, Nachtflugverbot)⁷ sowie das Strassenverkehrsgesetz (SVG) mit der Verkehrsregelnverordnung (VRV, Sonntags- und Nachtfahrverbot für Lastwagen).⁸ Hinzu kommen Erlasse, in denen die zulässigen Lärmemissionen von Fahr- und Flugzeugen begrenzt werden.

USG und LSV bilden den rechtlichen Rahmen für die Festsetzung von Belastungsgrenzwerten. Im vorliegenden Kapitel werden die wichtigsten Elemente des gesetzlichen Lärmschutzkonzepts sowie die Vorgaben der BV und des USG für die Festsetzung von Belastungsgrenzwerten dargestellt. Die Interpretation auslegungsbedürftiger bzw. unbestimmter Rechtsbegriffe und Regelungen erfolgen in Kapitel 2.8, sowie bei der Herleitung der generischen Grenzwerte im Kapitel 3.

2.2 Schutzziel

Der Umweltschutz soll gemäss Bundesverfassung und USG den Menschen und seine natürliche Umwelt, mithin Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen schützen.⁹ Der Bund ist verpflichtet und ermächtigt, Vorschriften zum Erreichen dieses Ziels zu erlassen.¹⁰

Im Bereich des Lärmschutzes wird dieses allgemeine Schutzziel dahingehend eingeschränkt und konkretisiert, dass «die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden» nicht «erheblich gestört» sein darf.¹¹ Die Gesetzesmaterialien erläutern, dass die Menschen vor Belästigungen zu schützen sind, die «[...] beim Menschen dazu führen, dass die

⁶ Vgl. Art. 74 BV

⁷ Art. 39 VIL

⁸ Art. 91 VRV

⁹ Vgl. Art. 74 Abs. 1 BV; Art. 1 Abs. 1 USG

¹⁰ Griffel [15], Art. 74 N 24; Griffel [16], S. 10 f.

¹¹ Art. 15 USG

Leistungsfähigkeit und die Lebensfreude, der Naturgenuss, das Gefühl der Ungestört-heit, das private Leben überhaupt beeinträchtigt werden».¹²

Das USG ist somit auf den Schutz des Menschen ausgerichtet (anthropozentrischer Ansatz); es wird mitunter auch als «Gesundheitsgesetz» bezeichnet.¹³ Dies gilt besonders im Bereich des Lärmschutzes. Tiere, Pflanzen und ihre Lebensräume sind jedoch – vor allem mangels genügender wissenschaftlicher Erkenntnisse über die Wirkung von Lärm auf diese – vom Schutz ausgeklammert.¹⁴

Im Sinne eines wirksamen Schutzes der Bevölkerung gegen Lärm sollte davon ausgegangen werden, dass nicht nur die Vermeidung unmittelbarer Störungen des Wohlbefindens unter das Schutzziel fallen, sondern auch langfristige gesundheitliche Auswirkungen vermieden werden sollen.

2.3 Schutzgut

Aus dem dargestellten Schutzziel lässt sich als Schutzgut der Lärmbekämpfung das Wohlbefinden der Bevölkerung ableiten. Beide Begriffe (Wohlbefinden und Bevölkerung) sind im rechtlichen Sinn auslegungsbedürftig und werden in Kapitel 2.8 geklärt.

2.4 Schutzkonzept

Das gesetzliche Schutzkonzept knüpft an den Bau und Betrieb von *Anlagen* (Transportinfrastruktur, Gewerbe- und Industriebauten und -maschinen etc.) an und greift ansonsten nicht.¹⁵ Das USG will nicht lärmige Tätigkeiten oder Anlagen verhindern, sondern die Immissionen möglichst begrenzen resp. unter einem bestimmten Mass halten, indem der Bau und der Betrieb durch Massnahmen an der lärmemittierenden Anlage optimiert werden.¹⁶

Das USG sieht zum Schutz des Menschen vor schädlichen oder lästigen Lärmimmissionen (wie für andere Immissionen) ein mehrstufiges Schutzkonzept vor. In einer ersten Stufe soll Lärm unabhängig von der bestehenden Lärmbelastung im Sinne der Vorsorge so weit begrenzt werden, als dies technisch und betrieblich möglich sowie wirtschaftlich tragbar ist. Wenn diese Massnahmen nicht ausreichend sind, um die

¹² Botschaft USG 1979, BBl 1979 III S. 755

¹³ Vgl. Griffel [15]

¹⁴ Vgl. Wagner Pfeifer [17], Rz. 450. Tiere können aber u. U. vom Schutz des Menschen vor Lärmimmissionen mit-erfasst sein, vgl. Urteil BGer 1C_579/2017 vom 18. Juli 2018 (betr. NIS) und BGE 118 Ib 4c/bb; BGE 117 Ib 10, E. 4.

¹⁵ Griffel [16], S. 81 ff.

¹⁶ Griffel [16], S. 83 und S. 85

Grenzwerte einzuhalten, muss in der zweiten Stufe mit verschärften Massnahmen dafür gesorgt werden, dass die Grenzwerte eingehalten werden. Bei öffentlichen oder konzessionierten Anlagen kommt die dritte Stufe zum tragen: Sofern diese verschärften Massnahmen unverhältnismässig wären oder wenn andere Interessen höher gewichtet werden als der Schutz vor Lärm, müssen die betroffenen Gebäude mit Schallschutz ausgerüstet werden.

2.5 Belastungsgrenzwerte

Das Lärmschutzrecht sieht drei abgestufte Belastungsgrenzwerte für Lärm vor, wobei dem Immissionsgrenzwert (IGW) eine zentrale Funktion zukommt. Der (tiefere) Planungswert (PW) und der (höhere) Alarmwert (AW) stehen jeweils in Relation zum IGW.

Der IGW wird nach den Vorgaben von Art. 13 und 15 USG in der LSV festgelegt (vgl. dazu Kapitel 2.6). Er dient der Beurteilung der schädlichen oder lästigen Einwirkungen am Empfangsort und legt die Schwelle zur Schädlichkeit oder Lästigkeit des Lärms fest. Das Recht zieht somit eine klare, quantitative Grenze, bei deren Überschreiten die Lärmbelastung als schädlich bzw. lästig gilt (Legaldefinition).¹⁷ Bei technischen Lärmarten (Lärm von Fahrzeugen, Maschinen oder Geräten) lässt sich die Belastung zahlenmässig eindeutig ermitteln, sei es durch Berechnung oder durch Messung, und mit dem IGW vergleichen.¹⁸

Abgeleitet vom IGW muss der Bundesrat auf Verordnungsebene unterhalb des IGW liegende Planungswerte (PW) festlegen.¹⁹ Sie konkretisieren – allerdings nicht abschliessend – das Vorsorgeprinzip.²⁰ Die PW beeinflussen die Raumplanung, indem sie für die Ausscheidung oder Erschliessung von Bauzonen,²¹ für die Errichtung von ortsfesten, lärmigen Neuanlagen²² oder bei sehr umfangreichen Änderung von Altanlagen²³ eingehalten werden müssen.

Ergänzend kann der Bundesrat nach dem Wortlaut des Gesetzes Alarmwerte (AW) festlegen. Diese Werte liegen über den IGW und dienen zur Beurteilung der Dringlich-

¹⁷ Schrade & Loretan [18], Art. 13 N 1 f.; Griffel [16], S. 80

¹⁸ Schrade & Loretan [18], Art. 13 N 12

¹⁹ Vgl. Art. 23 USG

²⁰ Vgl. z.B. BGE 141 II 476 E. 3.3, 3.5.1; 124 II 517, E. 4b

²¹ Vgl. Art. 24 USG

²² Vgl. Art. 25 USG

²³ Vgl. z.B. BGE 141 II 483; 133 II 181 E. 7.2; Urteil BGer 1C_10/2010 vom 16.09.2010, E. 4. Vgl. zu den lärmschutzrechtlichen Anforderungen bei geänderten Anlagen z.B. Gossweiler [19], S. 104 f.; Alig & Schärmeli [20], S. 193 ff.

keit von Sanierungen. Sie sind überdies von Bedeutung als Schwelle für die Anordnung von passiven Schallschutzmassnahmen²⁴ und als Obergrenze für Erleichterungen von der Sanierungspflicht²⁵ bei bestehenden ortsfesten Anlagen.²⁶

Die Belastungsgrenzwerte sind mittels Lärmempfindlichkeitsstufen (ES)²⁷ mit der Raumplanung (Nutzungsplanung) verknüpft. Jeder Nutzungszone muss bundesrechtlich zwingend eine der vier ES zugeordnet werden. Jede ES hat ihre eigenen IGW, PW und AW.

Die Überschreitung der IGW hat nicht nur aufseiten der lärmigen Anlagen Folgen, sondern kann auch das Bauen neuer Gebäude mit lärmempfindlichen Räumen in der Umgebung von Lärmquellen verhindern oder einschränken. Gemäss Art. 22 USG dürfen neue Gebäude, die dem längeren Aufenthalt von Personen dienen, nur bewilligt werden, wenn die IGW nicht überschritten sind. Für den Fall, dass am Bau neuer Gebäude ein den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung überwiegendes Interesse besteht, kann – mit Zustimmung einer kantonalen Behörde – eine Ausnahmegewilligung erteilt werden.²⁸

2.6 Massgebende Lärmwirkung

Nach den Vorschriften des USG sind die IGW für Lärm «so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören».²⁹ Die «Wirkungen der Immissionen auf Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit, wie Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere», müssen dabei «berücksichtigt» werden.³⁰ Dabei handelt es sich um eine Präzisierung zum Auftrag an den Bundesrat, IGW festzulegen, bzw. um ein Hilfskriterium.³¹ Die Grenze der Schädlichkeit oder Lästigkeit der Lärmimmissionen wird damit dort gezogen, wo die Lärmbelastung eine erhebliche Störung im Wohlbefinden der betroffenen Bevölkerung verursacht.³²

Der Beurteilung der Schädlichkeit oder Lästigkeit von Lärm wird ein objektivierter Massstab der Lärmempfindlichkeit zugrunde gelegt:³³

²⁴ Vgl. Art. 20 USG

²⁵ Vgl. Art. 17 Abs. 2 USG, relativiert in Art. 20 Abs. 1 USG

²⁶ Vgl. Griffel [16], S. 119

²⁷ Vgl. Art. 43 LSV

²⁸ Vgl. Art. 22 Abs. 2 USG; Art. 31 LSV; Griffel [16], S.131 ff.

²⁹ Art. 15 USG

³⁰ Vgl. Art. 13 Abs. 2 und Art. 15 USG

³¹ Vgl. Griffel & Rausch [21], Art. 13 N. 2

³² Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 22

³³ Vgl. zum Folgenden: Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 24 ff.; Schrade & Loretan [14], Art. 13 N. 16 ff.

- Ausgangspunkt ist die gesamte Bevölkerung; es darf keine Personengruppe übergangen werden, wobei naturgemäss nur Personen erfasst werden können, welche tatsächlich Lärm ausgesetzt sind. Dabei muss auf die Repräsentativität der Untersuchung geachtet werden.³⁴
- Art. 13 Abs. 2 USG enthält sodann eine Vorgabe, wie innerhalb der Gesamtbevölkerung die unterschiedlichen Empfindlichkeiten verschiedener Personengruppen bei der Festlegung der IGW zu bewerten sind. Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit müssen berücksichtigt werden, was das ausschliessliche Abstellen auf die Lärmempfindlichkeit der Durchschnittsbevölkerung verbietet.³⁵ Das Schutzbedürfnis dieser Gruppen ist «relativ stärker zu gewichten als jenes der durchschnittlichen oder gar besonders robusten Personengruppen», was etwa eine arithmetische Mittelung ausschliesst.³⁶
- Die heutigen IGW werden in der Rechtsliteratur mitunter kritisch kommentiert, weil sie Art. 13 Abs. 2 USG nicht genügend Rechnung tragen würden. So genüge es nicht, die IGW nach einem bestimmten Prozentsatz «stark Belästigter» auszurichten, sondern es müsse zusätzlich analysiert werden, ob bestimmte (besonders empfindliche) Personengruppen in ihrer Bewertung signifikant vom Durchschnitt abweichen.³⁷
- Umgekehrt ist es nicht möglich und rechtlich auch nicht geboten, die IGW so tief anzusetzen, dass sich durch Lärm unterhalb der IGW niemand gestört fühlt. Ein absoluter Schutz gegen jeden Lärm muss nicht gewährleistet werden.³⁸ Auch nach der Rechtsprechung des Bundesgerichts besteht kein Anspruch auf absolute Ruhe. Untergeordnete Störungen bleiben unberücksichtigt, weil menschliche Aktivitäten in der Regel mit Geräuschemissionen verbunden sind, die auf andere Menschen einwirken und insofern ein Toleranzspielraum bleiben muss, in welchem Lärmbelastigungen hinzunehmen sind.³⁹

Die Lärmempfindlichkeit der Bevölkerung bzw. die Störung im Wohlbefinden werden nach dem «Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung» beurteilt. Daraus folgt, dass die Beurteilung, wieweit der Lärm die betroffene Bevölkerung stört, möglichst nach anerkannten wissenschaftlichen Methoden zu erfolgen hat. Stehen diese nicht zur Verfügung oder ergeben sich Lücken, Unstimmigkeiten oder Unklarheiten, darf stattdessen oder ergänzend auf die Erfahrung von Fachleuten abgestellt werden. Differen-

³⁴ Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 17 ff.

³⁵ Vgl. Art. 13 Abs. 2 USG; Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 25; Schrade & Loretan [14], Art. 13 N. 4 und N. 19

³⁶ Innerhalb dieser Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit ist wiederum ein objektiverer Massstab anzuwenden und zumindest auf das durchschnittliche Schutzbedürfnis dieser Gruppe abzustellen (vgl. Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 19).

³⁷ Vgl. Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 24 [18]

³⁸ Vgl. Botschaft USG 1979, BBl 1979 III S. 794

³⁹ Vgl. Botschaft USG 1979, BBl 1979 III S. 794; Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 23

ziert ausgestaltete Belastungsgrenzwerte, die alle massgeblichen Lärmwirkungen berücksichtigen, lassen sich meistens nicht in jedem Punkt auf wissenschaftliche Untersuchungen abstützen.⁴⁰

Der rechtliche Begriff der «erheblichen Störung» wird in der Lärmwirkungsforschung häufig mit «starke Belästigung» umschrieben. Die Rechtslehre und die Rechtsprechung verweisen zur Konkretisierung dieses unbestimmten Rechtsbegriffs jeweils auf die Überlegungen im Zuge der erstmaligen Festlegung der IGW. Danach seien die IGW so festgelegt worden, dass sich bei der entsprechenden Lärmbelastung nicht mehr als 15 bis 25 % der betroffenen Personen als «stark belästigt» bezeichnen.⁴¹ Unterhalb dieser Erheblichkeitsschwelle nimmt das Gesetz eine gewisse Störung der Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden von vornherein in Kauf.⁴²

Nach dem umweltrechtlichen Ganzheitlichkeitsprinzip müssen Einwirkungen sowohl einzeln als auch gesamthaft und nach ihrem Zusammenwirken beurteilt werden.⁴³ IGW sollen daher die Beurteilung der Gesamtbelastung ermöglichen. Unter diesem Blickwinkel muss die gesamte Lärmbelastung berücksichtigt werden, die am Einwirkungsort unabhängig von der Art der verursachenden Anlagen (Lärmarten) wahrgenommen wird.⁴⁴ Damit soll Kombinationswirkungen Rechnung getragen werden. Allerdings fehlen dazu häufig belastbare Grundlagen, um solche Effekte bei gleichartigen (mehrere Lärmquellen/-arten) oder sogar verschiedenartigen Einwirkungen (z.B. Lärm- und Luftbelastungen) im Rahmen der Festsetzung von IGW erfassen zu können.⁴⁵ Immerhin hält Art. 40 Abs. 2 LSV im Sinne der Ganzheitlichkeit fest, dass die Belastungsgrenzwerte auch überschritten sind, wenn die Summe gleichartiger Lärmimmissionen, die von mehreren Anlagen erzeugt werden, diese überschreitet.

2.7 Geltungsbereich und Ermittlungsort der Lärmbelastung

Nach dem Schutzziel des USG müssen IGW überall dort gelten, wo Schutzobjekte von Immissionen betroffen werden.⁴⁶ Das Gesetz enthält allerdings keine ausdrückliche Regelung des massgebenden Geltungsbereichs bzw. Ermittlungsorts; zu beachten sind aber die Vorschriften, welche auf die Grenzwerte Bezug nehmen (v.a. Art. 20 bis 22, Art. 24 und 25 USG).

⁴⁰ Vgl. Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 27

⁴¹ Vgl. z.B. BGE 126 II 522 E. 42 S. 575; Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 24; Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 26 halten jedoch fest, dass der Anteil der stark durch Lärm gestörten Personen bei 20–30 % gehalten worden sei.

⁴² Vgl. Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 14

⁴³ Art. 8 USG; Griffel [16], S. 44

⁴⁴ Vgl. Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 29

⁴⁵ Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 29; Griffel [16], S. 44; Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 14a; vgl. auch BGE 121 I 334 E. 11/b/aa

⁴⁶ Schrade & Loretan [18], Art. 13 N. 14b

Der Geltungsbereich wird erst auf Verordnungsstufe konkret bestimmt. Nach Art. 41 LSV gelten die Belastungsgrenzwerte (also sowohl IGW als auch PW und AW) bei überbauten Gebieten bei den Gebäuden mit lärmempfindlichen Räumen.⁴⁷ In noch nicht überbauten Bauzonen gelten sie, wo nach dem Bau- und Planungsrecht Gebäude mit lärmempfindlichen Räumen erstellt werden dürfen und generell im nicht überbauten Gebiet von Zonen mit erhöhtem Lärmschutzbedürfnis (gemeint sind Zonen denen die Empfindlichkeitsstufe I gemäss Art. 43 Abs. 1 Bst. a LSV zugewiesen ist). Belastungsgrenzwerte müssen nur dort eingehalten werden, wo sie nach Art. 41 LSV gelten.⁴⁸

Die Lärmimmissionen sind im bereits überbauten Gebiet in der Mitte der offenen Fenster lärmempfindlicher Räume zu ermitteln; Fluglärmimmissionen können auch in der Nähe der Gebäude ermittelt werden. In noch nicht überbauten Bauzonen erfolgt die Ermittlung dort, wo nach dem Bau- und Planungsrecht Gebäude mit lärmempfindlichen Räumen erstellt werden dürfen.⁴⁹

Die zulässige Lärmbelastung ist somit genau betrachtet diejenige, welche auf das bzw. am Gebäude einwirkt. Durch die Festlegung der Mitte des offenen Fensters als Ermittlungsort sollen nicht nur die Gebäude bzw. die Innenräume bei offenen Fenstern vor über dem IGW liegendem Lärm geschützt werden, sondern indirekt auch die unmittelbare Umgebung (Balkone, Terrassen, Vorgärten etc.) als Orte, wo sich Menschen längere Zeit aufhalten und dem Lärm ausgesetzt sind.⁵⁰

In zeitlicher Hinsicht unterscheiden (erst) die Anhänge der LSV zwischen Tag- und Nachtgrenzwerten, wobei dort je nach Lärmart spezifisch auch die Tages- und Nachtdauer definiert werden. Die (damalige) Kommission sah aus Praktikabilitätsgründen von der ursprünglich vorgeschlagenen Dreiteilung in Tag-, Abend- und Nachstunden ab.⁵¹ Das Bundesgericht hielt in diesem Zusammenhang fest, dass im Rahmen einer einzelfallweisen Beurteilung von Lärm dem erhöhten Erholungsbedürfnis der Bevölkerung am Abend durchaus Rechnung getragen werden dürfe.⁵²

⁴⁷ Die lärmempfindlichen Räume sind in Art. 2 Abs. 6 LSV definiert: Räume in Wohnungen, ausgenommen Küchen ohne Wohnanteil, Sanitärräume und Abstellräume, sowie Räume in Betrieben, in denen sich Personen regelmässig während längerer Zeit aufhalten. Ausgenommen sind Räume für die Nutztierhaltung und Räume mit erheblichem Betriebslärm.

⁴⁸ Gossweiler [19], Rz. 139

⁴⁹ Art. 39 Abs. 1 und 3 LSV. Im nicht überbauten Gebiet von Zonen mit erhöhtem Lärmschutzbedürfnis werden die Lärmimmissionen 1,5 Meter über dem Boden ermittelt (vgl. Art. 39 Abs. 2 LSV).

⁵⁰ Vgl. BGE 142 II 100; Zäch & Wolf [1], USG-Kommentar, Art. 15 N. 38; A. Schrade (im Auftrag der EKLB): Ratio legis des Orts zur Ermittlung von Lärmimmissionen bei Gebäuden (<https://www.eklb.admin.ch/de/dokumentation/berichte/>).

⁵¹ Vgl. Griffel & Rausch [21], Art. 15 N. 21

⁵² Urteil BGER 1A.139/2002 vom 5.3.2003, E. 4.1

2.8 Auslegung unbestimmter Rechtsbegriffe

Wie aus den vorhergehenden Kapiteln deutlich wurde, sind die rechtlichen Vorgaben zur konkreten Festlegung der IGW relativ offen und dementsprechend auslegungsbedürftig. Die gesetzlichen Regelungen sind von z.T. unbestimmten Rechtsbegriffen geprägt («Wohlbefinden», «Bevölkerung», «nicht erheblich gestört», um nur einige zu nennen). Dadurch ergibt sich ein gewisser Interpretationsspielraum, welcher im Sinne des Schutzziels bzw. des Zwecks des Lärmschutzes sowie nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung zu konkretisieren ist, was nachfolgend geschehen soll. Dabei gilt es, die im Recht verwendeten Begriffe «Schädlichkeit und Lästigkeit», «Wissenschaft und Erfahrung», «Wohlbefinden» sowie «Bevölkerung» etc. so auszulegen, dass damit dem materiellen Gehalt von Art. 15 USG und den anderen relevanten Normen im USG Rechnung getragen wird.

2.8.1 Schädlichkeit und Lästigkeit (Art. 74 BV, Art. 1 und 13 USG)

Für diesen Bericht wird bezüglich der Begriffe «schädlich» und «lästig» von folgendem Verständnis ausgegangen:

- *Schädliche Einwirkungen* greifen die Gesundheit (im Folgenden "somatisch-medizinische und psychische Gesundheit") des Menschen an oder verursachen einen Schaden an der natürlichen Umwelt, unabhängig davon, ob sie als lästig oder störend wahrgenommen werden.
- *Lästige Einwirkungen* beeinträchtigen den Menschen in seinem Dasein und in seiner Lebensqualität, auch wenn solche Einwirkungen nicht notwendigerweise manifeste Krankheitsfolgen nach sich ziehen.

Schädliche oder lästige Einwirkungen können also nicht nur physischer Art, sondern beispielsweise auch sozialer Art sein. Diesem Umstand trägt die WHO-Definition von Gesundheit [22] Rechnung, die hier übernommen wird.⁵³ Schädliche oder lästige Lärmimmissionen liegen aus rechtlicher Sicht vor, wenn Einwirkungen des Lärms direkte Nachteile für die somatisch-medizinische oder psychische Gesundheit (z.B. Gehörschädigung, Schlafstörungen mit ihren Folgen, Störung des Herz-Kreislauf-Systems, Depressionen etc.) oder für das geistige oder soziale Wohlbefinden zur Folge haben, wie beispielsweise Störungen der Ruhe und Erholung, die Beeinträchtigung der Kommunikation oder die Störung der Konzentration bei geistigen Arbeiten.⁵⁴

⁵³ Gemäss WHO-Verfassung von 1946: «Die Gesundheit ist ein Zustand des vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlergehens und nicht nur das Fehlen von Krankheit oder Gebrechen.»

⁵⁴ Zäch & Wolf [1], Art. 15 N. 16 ff.

2.8.2 Wissenschaft und Erfahrung (Art. 15 USG)

Grenzwerte – insbesondere der IGW – müssen auf einem belegten Zusammenhang zwischen einer bestimmten akustischen Belastung und einer subjektiv wahrgenommenen Störung oder Belästigung oder einer objektiv nachweisbaren Gesundheitseinwirkung beruhen, bei dessen Erreichen eine «erhebliche Störung der Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden» anzunehmen ist. Der Zusammenhang kann mit wissenschaftlichen Methoden ermittelt werden. Die Kommission lässt aber auch die Erfahrung von Fachleuten als Grundlage zu, v.a. in Fällen, wo systematisch erhobene Daten und Auswertungen fehlen.

Das Gebot einer wissenschaftlichen Vorgehensweise bei der Begründung von Grenzwerten ist unbestritten. Die massgebliche Lärmwirkung ist deshalb durch repräsentative Bevölkerungsbefragungen und durch andere Ermittlungen (z.B. umweltepidemiologische Studien) in Erfahrung zu bringen.

Bei der Festlegung der IGW ist der jeweilige *Stand der Wissenschaft oder Erfahrung* massgebend. Dies erfordert im Grundsatz auch eine periodische Überprüfung und evtl. Anpassung der Grenzwerte, wenn es ernstzunehmende Gründe gibt, dass diese nicht mehr dem aktuellen Wissens- bzw. Erfahrungsstand entsprechen.

2.8.3 Wohlbefinden (Art. 15 USG)

Das *Wohlbefinden* der Bevölkerung umfasst das psychische, physische und soziale Wohlbefinden des Menschen als Grundlage für seine ungestörte Entfaltung, Leistungsfähigkeit und Lebensfreude und bedeutet keineswegs nur das Fehlen von Krankheit und Gebrechen (vgl. Fussnote 53). Weil die Störung des Wohlbefindens somit sowohl die gesundheitliche Schädigung im engen medizinischen Sinn als auch die (blosse) Belästigung umfasst, sind IGW so festzulegen, dass sichergestellt ist, dass vor beidem – gesundheitliche Schädigungen *und* Belästigungen – geschützt wird.

Dabei sind allerdings nur *erhebliche* Störungen im Wohlbefinden der Bevölkerung massgebend, und es besteht daher ein Toleranzrahmen, in dem gewisse Störungen bzw. Belästigungen hingenommen werden müssen. Welche Störungen des Wohlbefindens aus Sicht der Kommission als erheblich gelten, wird in Kapitel 3.5 für verschiedene gesundheitliche Auswirkungen erörtert.

2.8.4 Bevölkerung (vs. Individuum) (Art. 15 USG)

Die Bundesverfassung (BV) schreibt vor, dass der Bund Vorschriften über den Schutz des Menschen vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen erlässt (Art. 74 BV). Auch in Art. 1 Abs. 1 USG wird der Schutz vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen u.a.

auf Menschen bezogen.⁵⁵ Während bei den Kriterien zur Festlegung der Immissionsgrenzwerte für Luftverunreinigung in Art. 14 USG ebenfalls der Begriff «Menschen» verwendet wird, wird bei den Festlegungskriterien der Lärm-Immissionsgrenzwerte in Art. 15 USG auf die «Bevölkerung» Bezug genommen.⁵⁶ Damit stellt sich die Frage, ob der Lärmschutz so ausgestaltet werden soll oder kann, dass die Bevölkerung *im Durchschnitt* den angestrebten Schutz genießt, oder ob jeder einzelne Mensch als Individuum grundsätzlich ein Mindestmass an Schutz zugute hat. Im ersten Fall wäre es möglich, dass ein gewisser Anteil Menschen besser geschützt wird als ein anderer Anteil, der angestrebte Schutz der Bevölkerung – im Durchschnitt – aber trotzdem erreicht würde.⁵⁷ Eine Interpretation der gesetzlichen Grundlagen (z.B. «Schutz des Menschen» [Art. 74 Abs. 1 BV] statt «der Bevölkerung», «Gesetz soll Menschen [...] schützen» [Art. 1 Abs. 1 USG] und nicht «die Bevölkerung», Schutz von einzelnen Personengruppen [Art. 13 Abs. 2 USG]) lässt aber den Schluss zu, dass der Schutz vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen individuell zu verstehen ist, und alle Menschen Anspruch auf das gleiche Mindestmass an Schutz haben. Auf welcher Höhe dieser Schutz, bzw. ein entsprechender Grenzwert, anzusetzen ist, wird jedoch ausgehend von einem Durchschnittsmenschen bzw. eben der Durchschnitts-Bevölkerung festzulegen sein.

⁵⁵ «Dieses Gesetz soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen schützen sowie die natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens, dauerhaft erhalten.»

⁵⁶ «Die Immissionsgrenzwerte für Lärm und Erschütterungen sind so festzulegen, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören.»

⁵⁷ Dies ist z.B. beim «Zürcher Fluglärm-Index» (ZFI) der Fall, wo die Anzahl «Erheblich belästigter und schlafgestörter Personen» zu einem Index addiert und dieser Index mit einem Richtwert verglichen wird. Auch wenn dieser Index unterhalb des festgelegten Richtwerts liegt, kann einem Teil der Bevölkerung eine wesentlich höhere Belastung (z.B. durch Kanalisierung des Flugverkehrs) zugemutet werden.

3 Ermittlung von generischen Grenzwerten in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night}

Ein zentrales Instrument für die Bestimmung von Grenzwerten sind die in empirischen Studien ermittelten sog. *Expositions-Wirkungsbeziehungen*. Solche stellen eine quantitative Beziehung her zwischen der akustischen Belastung durch Lärm (hier ausgedrückt in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night}) und der dadurch hervorgerufenen unerwünschten Wirkung. Expositions-Wirkungsbeziehungen werden in Originalstudien oder auch in Meta-Analysen mit statistischen Verfahren ermittelt und können in der Regel als Expositions-Wirkungs-Funktionen mathematisch formalisiert werden. Mittels vorab festgelegter Kriterien (z.B. «Ausmass der maximal akzeptierbaren Lärm-Belästigung» oder «maximal zulässiges Risiko für Herzinfarkt») lassen sich daraus Grenzwerte bestimmen. Bei der Festlegung dieser Kriterien standen die IGW im Fokus.

Für die Ermittlung von generischen Grenzwerten entschied sich die Kommission für ein systematisches, möglichst nicht von Wertungen geleitetes Vorgehen. Das in diesem ersten Teil angewendete Verfahren zur Grenzwertfindung stützt sich hauptsächlich auf die Methodologie der WHO bei der Entwicklung der Environmental Noise Guidelines [10] ab, wurde jedoch in einigen Punkten angepasst.

Die einzelnen Schritte zur Festlegung von generischen Grenzwerten in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night} waren die Folgenden:

- Schritt 1:** Bestimmung von gesundheitsrelevanten Wirkungen der Lärmbelastung (im Folgenden «Endpunkte» genannt), welche begrenzt werden sollen (z.B. Belästigung, Schlafstörungen, Herzinfarktrisiko, Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen etc.).
- Schritt 2:** Ermittlung von Gewichtungsfaktoren (Disability Weights, DWs) für die in Schritt 1 festgelegten Wirkungen. DWs dienen der Charakterisierung des Schweregrads von Krankheiten und Gebrechen. Sie erlauben damit eine Gewichtung der Endpunkte.
- Schritt 3:** Definition von Mindestanforderungen an die Qualität der wissenschaftlichen Studien, welche für die Bestimmung generischer Grenzwerte massgeblich sind.
- Schritt 4:** Festlegung je Lärmart, welche Originalstudien oder Meta-Analysen zu den Belastungsmassen L_{den} und L_{night} den Kriterien aus Schritt 3 genügen.
- Schritt 5:** Festlegung von akzeptierbaren Risiken je Endpunkt unter Berücksichtigung des jeweiligen DW.
- Schritt 6:** Ermittlung von Expositions-Wirkungsbeziehungen je Endpunkt und Ableitung von Endpunkt-bezogenen Schwellenwerten der Lärmbelastung unter Berücksichtigung des jeweils akzeptierbaren Risikos.

Schritt 7: Festlegung von Lärmart-bezogenen generischen Grenzwerten (Strassen-, Eisenbahn-, Fluglärm) für den L_{den} und den L_{night} auf Grundlage der in Schritt 6 ermittelten Endpunkt-bezogenen Schwellenwerte.

Die konkrete Umsetzung der einzelnen Schritte mit dem Ziel der Festlegung generischer Grenzwerte für jeweils den Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm wird in den folgenden Kapiteln 3.1 bis 3.7 beschrieben.

3.1 Schritt 1: Festlegung von gesundheitsrelevanten Wirkungen

In diesem Schritt wird dargelegt, welche gesundheitlichen Folgen der Belastung durch Lärm als relevant erachtet werden, um auf Grundlage entsprechender Expositions-Wirkungsbeziehungen Grenzwerte zu empfehlen. Unter «gesundheitlichen Folgen» werden hierbei nicht nur medizinisch diagnostizierte physische oder psychische Erkrankungen (z.B. Bluthochdruck, Herzinfarkt, Diabetes, Depression) und Todesfälle verstanden, sondern, in Übereinstimmung mit der WHO-Definition von Gesundheit, auch Beeinträchtigungen des geistigen und sozialen Wohlergehens, worunter insbesondere auch die blosser Belästigung durch Lärm fällt.

Das bisher in der Schweiz angewendete Vorgehen zur Grenzwertsetzung ging von der Annahme aus, dass am Tag die Belästigung und in der Nacht die Störung des Schlafes als repräsentativ für alle anderen allenfalls auftretenden gesundheitsabträglichen Lärmeffekte stehen und dass der Schutz vor diesen Haupteffekten auch vor anderen Gesundheitsauswirkungen des Lärms schützt. Zum Beispiel ging man bislang davon aus, dass am Tag somatisch-medizinische oder psychische gesundheitliche Effekte durch Lärm in der Regel nur auftreten können, wenn auch eine durch diesen Lärm hervorgerufene Lärmbelästigung beobachtet wird. In der Folge betrachtete man Belästigung als die massgebende Lärmwirkung [1]. Die im Hinblick auf die Grenzwertsetzung relevante Frage ist indes, ob diese Annahme auch heute noch gerechtfertigt ist oder ob somatisch-medizinische Effekte schon bei tieferen Pegeln auftreten können als es Belästigungen tun. Verschiedene Studien bestätigen mittlerweile, dass Lärmwirkungen auch bei Personen auftreten, welche sich nicht belästigt fühlen.

Empirische Hinweise für gesundheitsrelevante Auswirkungen der Lärmbelastung bestehen für folgende Endpunkte [mit beispielhaften Literatur-Referenzen]:

- Lärmbelästigung [13, 23]
- Schlafstörungen (z.B. Ein- und Durchschlafstörungen, Aufwachreaktionen, selbstberichtete lärminduzierte Schlafstörungen) [14, 24]
- Kardiovaskuläre Erkrankungen (z.B. Bluthochdruck, ischämische Herzkrankheit [IHD, von engl. Ischaemic Heart Disease], Herzinfarkte, Schlaganfälle [25-28])

- Kardiovaskuläre Mortalität [29-31]
- Metabolische und Stoffwechselkrankheiten und deren Vorläufer, z.B. Diabetes, Übergewicht, Adipositas [27, 32-34]
- Psychische Krankheiten, z.B. Depressionen [35-37]
- Kognitive Auswirkungen (v.a. Auswirkungen auf das Lernverhalten bei Kindern) [38-40]
- Subklinische Symptome wie erhöhte arterielle Gefäßsteifigkeit [41], erhöhte Blutzuckerwerte [42], erhöhter Blutdruck [43], sowie Endotheliale Dysfunktion [44]

Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren weitere Endpunkte untersucht werden. So gibt es auch schon einzelne, allerdings nicht gesicherte Hinweise zu Atemwegs- und Krebserkrankungen im Zusammenhang mit Lärm.

Für die nachfolgend aufgeführten Wirkungskategorien konnten ausreichende empirische Grundlagen identifiziert werden:

- a) Belästigung
- b) Selbstberichtete lärminduzierte Schlafstörungen
- c) Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems (inkl. dadurch hervorgerufener Todesfälle) und Diabetes

Diese Wirkungskategorien werden als relevant erachtet, um Grenzwerte für den Schutz der Gesundheit und des Wohlbefindens zu bestimmen. Auf sie wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

3.1.1 Belästigung

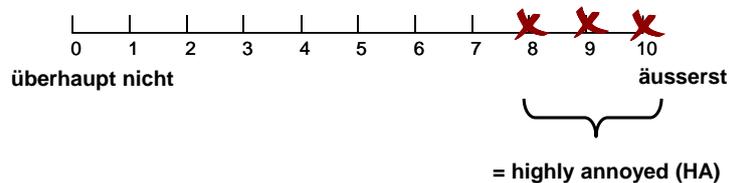
Unter dem Begriff «Belästigung» werden Reaktionen auf Einwirkungen des Lärms subsummiert, die das seelische Wohlbefinden, Erholung und Entspannung, Arbeits- und Konzentrationsfähigkeit sowie Kommunikation und soziale Interaktion beeinträchtigen können. Lärmbelästigung kann als «eine Mischung aus leichtem Ärger darüber, dass man etwas hören muss, was man nicht hören will, dass man bei einer Tätigkeit gestört wird und dass man gegenüber der Quelle relativ machtlos ist» definiert werden [45]. Lärmbelästigung kann somit als Lärmwirkung verstanden werden, die zwar nicht demonstrierbar pathogen (Krankheiten verursachend) ist, das Wohlbefinden einer Person aber dennoch beeinträchtigt.

Lärmbelästigung ist ein vergleichsweise umfassender Indikator der als negativ erlebten Schallwirkung und korreliert vergleichsweise gut mit dem energieäquivalenten Dauerschallpegel (L_{eq}) [46].

Es hat sich in der Lärmwirkungsforschung zu einem Standard entwickelt, die Belästigung durch Lärm in Befragungen mit einer mehrstufigen Skala zu erheben und den

Anteil derjenigen Personen, welche die oberen Stufen einer mündlich oder schriftlich präsentierten Belästigungsskala angeben, als «stark Belästigte» (HA, für «highly annoyed») auszuweisen, z.B. mittels der sog. ICBEN-Skalen [47] (siehe Abbildung 1). Nach gängiger Auffassung ist eine Person dann stark gestört oder belästigt (d.h. «HA»), wenn sie in Befragungen auf einer numerischen 11-Punkte-Belästigungsskala (mit den Werten 0–10) den Wert 8, 9 oder 10 oder die beiden obersten Skalenwerte («stark» und «äusserst» [... gestört oder belästigt]) auf der 5-Punkte-ICBEN-Skala [47] angibt, wobei in den bisherigen Grenzwert-relevanten Schweizer Lärmwirkungsstudien [48-54] fast immer die 11-Punkte-Skala zur Anwendung kam.

Wenn Sie an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken, welche Zahl zwischen 0 und 10 gibt am besten an, wie stark Sie sich durch Lärm von <Lärmart> insgesamt gestört oder belästigt fühlten?



Wenn Sie einmal an die letzten 12 Monate bei Ihnen denken, wie stark haben Sie sich durch <Lärmart> insgesamt gestört oder belästigt gefühlt?



Abbildung 1: Numerische 11-Punkte- und verbale 5-Punkte-ICBEN-Skala mit dazugehöriger Belästigungs-Frage gemäss [47]. Personen, die eine der oberen drei numerischen Kategorien auf der 11-Punkte-Skala oder eine der beiden obersten Verbalmarken auf der 5-Punkte-Skala ankreuzen, gelten nach gängiger Konvention als «stark belästigt» («highly annoyed» bzw. «HA»).

In Übereinstimmung mit der breiten WHO-Definition für Gesundheit wurde beschlossen, den Endpunkt Belästigung zu berücksichtigen und den **Prozentsatz der stark Belästigten (%HA)** als Indikator für Lärmwirkungen zu betrachten.

3.1.2 Schlafstörungen

Schlaf spielt eine elementare Rolle bei der Erholung und ist eine notwendige Voraussetzung für den langfristigen Erhalt der Gesundheit. Schlaf fördert die neuronale Plastizität und hält die kognitive Leistungsfähigkeit aufrecht, ist wesentlich beteiligt

bei der Gedächtniskonsolidierung und Stimmungsregulierung und spielt eine wichtige Rolle bei physiologischen Prozessen, etwa dem Stoffwechsel, der Appetitregulation oder der Immun- und Hormonfunktion [55].

Während im Schlaf optische Reize durch den Lidschluss weitgehend ausgeschlossen werden können, wird das Gehör nur wenig eingeschränkt. Durch Lärm wird somit der Schlaf sowohl quantitativ als auch qualitativ beeinträchtigt. Lärminduzierte Schlafstörungen können mit einer Reihe von Indikatoren beschrieben werden. Bei der gesundheitlichen Bewertung von Störungen des Schlafes durch Lärm wurden bislang den Arousal (kurzzeitige Aktivierungserhöhungen des EEG), den (EEG-)Aufwachreaktionen, der Verweildauer in den einzelnen Schlafstadien sowie der selbstberichteten Bewertung der Schlafqualität (z.B. mittels Fragebogen⁵⁸) eine wichtige Rolle zugewiesen. Neben Fragebogenerhebungen zur Bestimmung des Prozentsatzes der stark Schlafgestörten (engl. «highly sleep disturbed» bzw. «HSD») kommen auch objektiv ermittelte Indikatoren nächtlicher Störungen (z.B. durch polysomnografische Ableitungen) oder sog. signalisierte Aufwachreaktionen zur Anwendung.

Die Ermittlung von repräsentativen und breit anwendbaren Expositions-Wirkungsbeziehungen gestaltet sich bei den sog. *objektiven* Erhebungsmethoden (z.B. EEG-Aufwachreaktionen, gemessen mit Polysomnografie) schwieriger als bei Erhebungen des selbstberichtet gestörten Schlafes. Studien über die physiologischen Auswirkungen von Lärm auf den Schlaf und insbesondere polysomnografische Untersuchungen sind komplex und ressourcenintensiv und umfassen daher immer nur eine geringe Anzahl von Versuchspersonen, die zudem oft gesunde junge Freiwillige, also nicht repräsentativ für die allgemeine Bevölkerung, sind (siehe z.B. [56]). Diese Wirkungen sind daher auch ungeeignet für die Bestimmung eines generischen Nachtgrenzwerts. Aus den genannten Gründen wurden für diesen Bericht nur Studien über selbstberichtete Schlafstörungen berücksichtigt und der **Prozentsatz der selbstberichtet stark Schlafgestörten (%HSD)** als Indikator für Lärmwirkungen auf den Schlaf beigezogen.

3.1.3 Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems, kardiometabolische Mortalität, Diabetes

Gemäss einer Vielzahl epidemiologischer Untersuchungen kann eine andauernde hohe Lärmbelastung manifeste somatisch-medizinische oder psychische Auswirkungen im Sinne chronischer Erkrankungen bis hin zu Todesfällen zur Folge haben. Von diesen Auswirkungen wurden in der Lärm-Epidemiologie bisher vor allem kardiovaskuläre sowie den Metabolismus betreffende Erkrankungen untersucht [27]. Zu den Hauptursachen langfristiger Auswirkungen des Lärms gehören ganz allgemein die

⁵⁸ Meist wird auch hierzu eine entsprechend sprachlich leicht angepasste IC BEN-Skala benutzt, z.B. wie in [14].

chronisch wiederholte Stimulation des sympathischen Nervensystems, was z.B. arterielle Blutdruckerhöhungen durch Vasokonstriktion oder Herzratenanstiege zur Folge hat, sowie eine Überaktivierung der Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA-Achse) mit der potenziellen Folge hormoneller Störungen und entsprechenden Auswirkungen auf den Metabolismus und das Immunsystem. Diese Auswirkungen können generell als stressbedingt betrachtet werden. Grundsätzlich treten die genannten Reaktionen auch im Schlaf auf, und es wird vermutet, dass der Nachtzeitraum möglicherweise sogar die wichtigere Zeitperiode für die Entstehung langfristiger Lärmwirkungen sein könnte, als der Tag [57]. Obwohl die Mechanismen der chronischen Auswirkungen von Lärm auf das Herz-Kreislauf- und das Stoffwechselsystem noch nicht vollständig verstanden sind, gibt es mehrere plausible Ursache-Wirkungsketten, die in der einschlägigen Literatur [58-60] beschrieben sind.

Für die drei Endpunkte **kardiovaskuläre Mortalität**, **ischämische Herzkrankheit (IHD)** sowie **Diabetes** besteht heute gut gesicherte empirische Evidenz für einen Zusammenhang mit Lärmbelastung. Die Kommission beschloss daher, diese drei Endpunkte bei der Grenzwertsetzung zu berücksichtigen.

3.1.4 Zusammenfassung

Die für die Grenzwertfindung berücksichtigten Wirkungen bzw. konkreten Endpunkte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Für die Herleitung von generischen Grenzwerten berücksichtigte Wirkungen bzw. Endpunkte

Massgebliche Zeitperiode(n)	Gesundheitsrelevante Wirkung / Endpunkt	Erhebungsmethode	Bemerkungen
24h- oder 16h-Tag	Lärm-Belästigung (%HA)	Selbstberichtet und ermittelt anhand von ICBEN-Skalen	Grosse Teile der Bevölkerung betroffen, gute empirische Grundlagen, Daten aus der Schweiz vorhanden
8h-Nacht	Lärminduzierte Schlafstörungen (%HSD)	Selbstberichtet und ermittelt anhand von Skalen	Grosse Teile der Bevölkerung betroffen, gute empirische Grundlagen, Daten aus der Schweiz vorhanden
24h-Tag	Kardiovaskulärer Todesfall, Herzinfarkt-Todesfall	Todesursachenstatistik oder Kohortenstudie	Hohe Objektivität, schwerwiegender Effekt, Daten aus der ganzen Schweiz vorhanden
	Ischämische Herzkrankheit (IHD)	Klinisch diagnostiziert, Kohorten- oder Querschnittstudie	Hohe Objektivität, schwerwiegender Effekt, am besten gesicherte Evidenz aller kardiovaskulären Endpunkte, viele

Massgebliche Zeitperiode(n)	Gesundheitsrelevante Wirkung / Endpunkt	Erhebungsmethode	Bemerkungen
			internationale Studien dazu vorhanden
	Diabetes Typ 2	Klinisch diagnostiziert, Kohorten- oder Querschnittstudien	Hohe Objektivität, hohe Prävalenz in der Schweiz, Schweizer Daten vorhanden

Mit auf diesen Wirkungen basierenden Grenzwerten kann das Ziel des Gesundheitsschutzes sowie der Schutz vor Belästigungen und vor lärminduzierten Schlafstörungen prinzipiell erreicht werden. Die genannten Wirkungen dürften sensitiv genug sein, um auch andere nicht direkt berücksichtigte, aber für die Gesundheit bedeutsame Auswirkungen des Lärms zu umfassen. Dazu gehören etwa Auswirkungen auf den Blutdruck und auf diverse sonstige physiologischen Parameter, aber auch auf die kognitive Leistungsfähigkeit, psychische Gesundheit, generelle Lebensqualität etc. Diese Wirkungskategorien werden aus verschiedenen Gründen für die Grenzwertfindung nicht direkt berücksichtigt, z.B. weil die Qualität der wissenschaftlichen Grundlagen nicht zufriedenstellend ist, weil keine belastbaren Studien aus der Schweiz vorliegen oder weil eine Interpretation der infrage stehenden Lärmwirkung (z.B. Verzögerung beim Lesenlernen durch Umweltlärm in Schulen) im Hinblick auf eine Grenzziehung, was noch als akzeptierbar erscheint und was nicht, kaum möglich ist.

3.2 Schritt 2: Ermittlung von Disability Weights (DWs)

In der Lärmwirkungsforschung wird der Einfluss von Lärm auf eine Vielzahl von Gesundheitsauswirkungen unabhängig von deren Schweregrad untersucht und quantifiziert. Für die Ermittlung von Grenzwerten, die sich auf verschiedene Endpunkte abstützen, sollten Wirkungen gemäss ihrem relativen Schweregrad gewichtet werden. Solche Gewichtungen können dann bei der Erwägung berücksichtigt werden, wie «streng» ein Grenzwert sein sollte, um vor unerwünschten Gesundheitsauswirkungen zu schützen (strenger, d.h. niedriger, bei schwerwiegenden Auswirkungen, weniger streng bei geringfügigen Auswirkungen), bzw. welches Risiko einer Gesundheitsauswirkung noch als akzeptierbar gelten kann und welches nicht mehr. Ein solches Instrument sind die sog. Disability Weights (DWs). Sie widerspiegeln den Schweregrad von Krankheiten und Behinderungen mit einer Spannweite von 0–1, wobei der Wert 0 vollkommener Gesundheit und der Wert 1 dem Tod entspricht. So wurden gemäss aktueller Literatur beispielsweise das DW für einfachen Diabetes bei 0.05 [61], für das unipolare depressive Syndrom bei 0.4 [62] oder für Blindheit bei 0.18 [63] angesetzt. DWs wurden bisher vor allem für die Berechnung von Disability Adjusted Life-Years

(DALY) des Global Burden of Disease (GBD) der WHO⁵⁹ und sich daran anlehende Berechnungen, beispielsweise für die Schweiz [64], verwendet.

Im Zusammenhang mit gesundheitsrelevanten Lärmwirkungen als Grundlage für die Grenzwertfestlegung sind DWs nicht einfach zu handhaben. So gibt es in der einschlägigen Literatur für einige der üblicherweise untersuchten Lärmwirkungen, z.B. Bluthochdruck, gar keine publizierten DWs. Bezüglich des Schweregrads von lärminduzierten Belästigungen und Schlafstörungen herrscht grosse Unsicherheit. Es gibt bisher keine systematische empirische Studie, welche DWs für Lärmbelästigung und Schlafstörung ermittelt hat. In den beiden bisher wichtigsten Veröffentlichungen der WHO im Bereich Umweltlärm der letzten zehn Jahre wurden für starke Belästigung (HA) ein DW von 0.02 und für starke (lärminduzierte) Schlafstörung (HSD) ein DW von 0.07 angesetzt [10, 65]. Für bestimmte der in epidemiologischen Kohorten- oder Querschnittstudien untersuchten Wirkungen, z.B. Schlaganfall oder Herzinfarkt, ist die Bandbreite der zugewiesenen DWs sehr gross, weil sich beispielsweise der Schweregrad im Verlaufe von Tagen schnell ändern kann (Beispiel: Herzinfarkt akut: DW = 0.432; Herzinfarkt nach drittem Tag und stabilem Kreislauf: DW = 0.074). Es ist an dieser Stelle also darauf hinzuweisen, dass DWs, abhängig vom Endpunkt, eine mehr oder weniger grosse Unsicherheit aufweisen und aus diesem Grund nur als grobe Richtschnur für den Vergleich der Schweregrade verschiedener Lärmauswirkungen beigezogen werden können.

Tabelle A.T.1 (im Anhang A.1) zeigt für lärmwirkungsrelevante Endpunkte ermittelte DWs in der einschlägigen Literatur. Tabelle 2 listet die in diesem Bericht benutzten DW-Werte auf.

Tabelle 2: Disability Weights (DWs) für jeden untersuchten Endpunkt

Endpunkt	Disability Weight (DW)	Herkunft / Referenz im Literaturverzeichnis
HA (starke Belästigung)	0.020	Dieser Wert wird von der WHO in den neuen Environmental Noise Guidelines [10] verwendet.
HSD (starke Schlafstörung, lärminduziert)	0.070	Dieser Wert wird von der WHO in den neuen Environmental Noise Guidelines [10] verwendet.
IHD (Ischämische Herzkrankheit)	0.405	Das DW für IHD wurde von der WHO (2018) [10] übernommen.
Kardiovaskuläre Mortalität	1.000	Todesfällen wird per definitionem ein DW von 1 zugewiesen.
Diabetes (Inzidenz)	0.049	Das DW wurde aus der Global Burden of Disease Study (2016) [61] übernommen.

⁵⁹ Siehe https://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/en

3.3 Schritt 3: Festlegung von Mindestanforderungen für die Qualität der berücksichtigten wissenschaftlichen Studien

Für die Berücksichtigung der in der wissenschaftlichen Literatur dokumentierten Lärmwirkungs-Studien wurden die folgenden Anforderungen definiert:

- Die in einer Studie untersuchten Endpunkte werden nur berücksichtigt, wenn die wissenschaftliche Evidenz für einen Zusammenhang mit Lärm gesichert und die Annahme eines kausalen Zusammenhangs plausibel ist.
- Für den spezifischen Endpunkt sind belastbare Expositions-Wirkungsbeziehungen in der wissenschaftlichen Literatur ausreichend detailliert dokumentiert, entweder in Originalstudien oder Meta-Analysen.
- Neben internationalen Studien gibt es mindestens eine qualitativ gute Studie aus der Schweiz, die eine Expositions-Wirkungsbeziehung des fraglichen Endpunkts beschreibt.
- Resultate aus Schweizer Studien widersprechen nicht den Resultaten aus internationalen Meta-Analysen (und umgekehrt).

3.4 Schritt 4: Ermittlung des Stands der Wissenschaft

Als wichtigste Quellen für die Eruierung des Stands der Wissenschaft für die unter Kapitel 3.1 aufgeführten Endpunkte identifizierte die Kommission die Ergebnisse der SiRENE-Studie [namentlich 13, 14, 30, 33], bzw. deren Aktualisierungen [31] sowie die für die WHO Environmental Noise Guidelines erstellten Meta-Analysen («Evidence Reviews» genannt)⁶⁰, darunter insbesondere jene für Belästigung [23], für Schlafstörungen [24], und für ischämische Herzkrankheiten und Diabetes [27].

Die genannten Evidence Reviews der WHO stellen zwar eine wichtige Quelle dar, die aktuellsten Originalstudien – damit gemeint sind solche, die nach 2015 erschienen sind – sind darin jedoch noch nicht berücksichtigt. Dies gilt insbesondere für die NO-RAH⁶¹ und die SiRENE-Studie, deren Ergebnisse alle erst nach 2015 publiziert wurden. Aus diesem Grund liess die Kommission die in den Evidence Reviews (namentlich [27]) bzw. in den Environmental Noise Guidelines aufgeführten Meta-Schätzer für ischämische Herzkrankheit und Diabetes aktualisieren, sodass auch neuere Studien (bis ca. Februar 2019) berücksichtigt sind. Als Ausgangspunkt für die Berechnungen der Meta-Schätzer wurden die in den WHO Evidence Reviews ermittelten Werte verwendet und mit den Resultaten der nach 2014 erschienenen Studien zusammenge-

⁶⁰ Siehe https://www.mdpi.com/journal/ijerph/special_issues/WHO_reviews

⁶¹ Noise Related Annoyance, Cognition, and Health (NORAH), grosse Deutsche Lärmwirkungsstudie (siehe <http://www.laermstudie.de>)

legt. Die Berechnungen wurden lärmartspezifisch, d.h. separat für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm gemacht. Die Ergebnisse dieser Aktualisierungen sind in [66] konsolidiert (und werden hier «WHO Review+» genannt).

Tabelle A.T.2 (im Anhang A.1) listet pro Endpunkt und Lärmart die Literaturquellen auf, welche letztlich für die Bestimmung der generischen Grenzwerte verwendet wurden. Die aufgeführten Originalstudien bzw. Meta-Analysen beinhalten die wesentlichen Expositions-Wirkungsbeziehungen, aufgrund derer unter Berücksichtigung der im nächsten Kapitel festgelegten Kriterien für akzeptierbare Risiken generische Grenzwerte vorgeschlagen werden können.

3.5 Schritt 5: Bestimmung von akzeptierbaren Risiken, die den Übergang zwischen unerheblichen und erheblichen Lärm-Belastungen definieren

Die gesetzlichen Vorgaben zum Schutz vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen des Lärms lassen sich aufgrund ihrer Unbestimmtheit im Rahmen einer Grenzwertsetzung nicht direkt verwenden, sondern müssen konkretisiert werden. Im Rahmen der Grenzwertsetzung soll zwecks Operationalisierung der «Erheblichkeit» von Störungen durch Lärm (vgl. Art. 15 USG) der Begriff des «akzeptierbaren Risikos» eingeführt werden. Eine Störung des Wohlbefindens soll dann als erheblich gelten, wenn das gesellschaftlich akzeptierte Risiko, eine Schädigung oder Belästigung zu erleiden, überschritten wird. Für die Bestimmung des akzeptierbaren Risikos gibt es allerdings keine allgemeingültigen Vorgaben, und die Bandbreite akzeptierbarer Risiken durch physikalische oder chemische Einflüsse aus der Umwelt ist sehr gross [67]. Daneben gibt die Lärmforschung im Prinzip keine Antwort darauf, ab welchem Pegelwert eine Lärmbelastung bzw. das damit verbundene Gesundheitsrisiko nicht mehr akzeptierbar ist. Darüber hinaus lassen sich aus kontinuierlichen Expositions-Wirkungs-Verläufen, wie sie in der Epidemiologie und Belästigungsforschung typischerweise vorkommen, auch keine Hinweise auf Wirkungsgrenzen ableiten. Mit anderen Worten: Es gibt keine Pegelwerte unterhalb derer Lärmwirkungen zu 100% ausgeschlossen werden können.

Die von der Kommission schliesslich beschlossenen Kriterien für absolute (%HA, %HSD) und relative⁶² (IHD, kardiovaskuläre Mortalität, Diabetes) akzeptierbare Risiken bedurften somit einer gut begründeten Abwägung. Hinweise zum Schweregrad von Endpunkten lieferten die DWs (vgl. Tabelle 2), welche als Orientierungshilfe für die Festlegung des jeweils akzeptierbaren Risikos Verwendung fanden. Demgemäss waren bei geringeren DWs höhere akzeptierbare Risiken zulässig und umgekehrt.

⁶² Erläuterungen siehe Glossar

Die im Rahmen der Grenzwertsetzung als akzeptierbar erachteten Risiken wurden für jede Wirkungskategorie bzw. jeden Endpunkt festgelegt und sind nachfolgend beschrieben.

3.5.1 Akzeptierbares Risiko für Belästigung (bzw. %HA)

In Art. 15 USG wird gefordert, dass IGW für Lärm so festzulegen sind, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb der IGW die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören.⁶³

Da es de facto keine (noch so geringe) Lärmbelastung gibt, bei welcher sich gar niemand gestört oder belästigt fühlt, muss ein gewisser Prozentsatz stark belästigter Personen (%HA) in Kauf genommen werden.

In den bereits erwähnten Environmental Noise Guidelines [10] geht die WHO davon aus, dass die kritische Schwelle für %HA bei demjenigen Lärmpegel liegt, bei dessen Überschreitung die WHO Guideline Development Group (GDG)⁶⁴ gesichert davon ausgeht, dass ein erhöhtes Risiko für gesundheitsschädliche Auswirkungen besteht («[...] noise exposure level above which the GDG is confident that there is an increased risk of adverse health effects.»). Die GDG definierte diese Schwelle bei einer L_{den} -Belastung, bei welcher sich 10 % der Befragten stark gestört oder belästigt fühlen. Bisher wurde in der Schweiz, aber auch in anderen Ländern, namentlich Deutschland, der akzeptierbare Prozentsatz stark Belästigter in einem Bereich zwischen 15 und 30 % verortet [1, 68, 69].

Die meisten bisherigen in der LSV definierten Immissionsgrenzwerte (IGW ES II) orientierten sich, soweit nachvollziehbar, am Kriterium «25 %HA». Die genaue Herkunft des 25%-Kriteriums ist unklar. Im Jahr 1976 hatten die Arbeitsgruppen 1 und 2 der damaligen Kommission beschlossen, die «Grenzwerte 2. Art» (später IGW genannt) bei derjenigen Belastung festzulegen, bei welcher nicht mehr als eine «qualifizierte Minderheit (ca. 25 %)» stark gestört wird.⁶⁵ Möglicherweise geht dieses Kriterium auf einen Entwurf des Vorentwurfs (VE) zum USG 1977 zurück, in welchem konkrete Kriterien für die Festlegung von IGW entwickelt wurden. Der VE 1977 stellte dabei grundsätzlich auf die *Zumutbarkeit* der Immissionen ab. Lärmimmissionen galten danach

⁶³ Anstelle der Untersuchung der «Störung» hat sich in den letzten Dekaden in der Lärmwirkungsforschung die Untersuchung der «Belästigung» etabliert, ein Konzept, welches über das blosse «Gestörtsein» bei einer Tätigkeit hinausgeht und eine affektive Komponente (z.B. Ärger über den Lärmverursacher) beinhaltet. «Starke Belästigung» (als affektiv-kognitives Konzept) und «erhebliche Störung» (im Sinne des Gesetzes) können aber als Ausdruck einer gleichwertigen Gesundheits-abträglichen Lärmwirkung aufgefasst werden. Beides wird in den in der Forschung weitverbreiteten IC BEN-Fragen auch *zusammen* bzw. *gleichzeitig* abgefragt («gestört oder belästigt», siehe [47] bzw. Abbildung 1).

⁶⁴ Diese von der WHO eingesetzte Expertengruppe (GDG) definierte die wichtigsten Fragen und Prioritäten bei der Entwicklung der Guidelines, bewertete die verfügbare wissenschaftliche Evidenz und formulierte die Empfehlungen.

⁶⁵ Arbeitspapier für die Sitzung vom 11.5.1976 der Arbeitsgruppen 1 und 2, Original nicht auffindbar, zit. nach [8]

als zumutbar, «wenn sich nicht mehr als ein Viertel einer repräsentativen Bevölkerungsgruppe unter ähnlichen Verhältnissen (Anm.: gemeint ist die Lärmbelastung) erheblich gestört fühlt». Keine der bisher auffindbaren Schweizer Quellen beinhaltet indes eine Herleitung oder Begründung, warum die kritische Schwelle bei 25 %HA angesetzt wurde (und nicht etwa bei 10 oder 50 %). Die einzige empirische Untersuchung, die der Frage nachging, welcher Prozentsatz als kritische Schwelle zwischen «unerheblichen» und «erheblichen» Lärm-Belastungen in der Bevölkerung resultiert, stammt von Rohrmann [70]. Dieser kommt zum Schluss, dass es offenbar «naive» Vorstellungen darüber gibt, wie gross eine qualifizierte Minderheit sein darf, der ein belästigender Umweltstressor noch zugemutet werden kann. Im Mittel waren es in seiner eher kleinen Untersuchung 26 %.

Aufgrund obiger Ausführungen entschloss sich die Kommission, für die maximal zulässige Belästigung **25 % als %HA-Kriterium** zu bestimmen, somit also das bisher mutmasslich in den meisten Fällen massgebliche Kriterium unverändert beizubehalten. Dieses markiert einen Wert innerhalb der in der zumindest älteren Literatur vertretenen Bandbreite (15–30 %) und trägt damit einer gewissen Kontinuität Rechnung. Der Wert liegt aber deutlich höher als das entsprechende Kriterium in den neuen WHO Environmental Noise Guidelines [10] (dort 10 %HA).

3.5.2 Akzeptierbares Risiko für die Störung des Schlafs (bzw. %HSD)

Da bisher die Schweizer Grenzwerte für den Nachtzeitraum nicht aufgrund eines eindeutig definierten %HSD-Kriteriums festgelegt wurden, gibt es keine historischen Erfahrungswerte, auf die man sich abstützen könnte. Für lärminduzierte selbstberichtete Schlafstörungen wurde **15 %HSD** als akzeptierbares Risiko bestimmt. Das 15%-Kriterium ist strenger als das Kriterium für starke Belästigung (25 %HA). Dies ist jedoch begründbar durch das höhere DW für lärminduzierte Schlafstörungen (0.07 für HSD gegenüber 0.02 für HA, vgl. dazu Tabelle 2). Die maximal zulässigen 15 %HSD bedeuten jedoch weniger Schutz als das von der WHO verwendete sehr niedrige Kriterium von 3 %HSD. Weitere Begründungen für die Wahl dieses schwächeren Schutzkriteriums werden in Kapitel 5.5.2 beschrieben.

3.5.3 Akzeptierbares Risiko für ischämische Herzkrankheit (IHD), kardiovaskuläre Mortalität und Diabetes

Im Rahmen der Sichtung und Bewertung von epidemiologischen Studien zu kardiovaskulären und metabolischen Wirkungen wurden einerseits Daten zur kardiovaskulären Mortalität in der Schweiz [30, 31] und andererseits eine eigens für diesen Bericht erstellte (bereits erwähnte) Meta-Analyse zu ischämischen Herzkrankheiten (IHD) und Diabetes [66] («WHO Review+») berücksichtigt. Wie schon in Kapitel 1.4 ausgeführt,

hat sich die Kommission darauf geeinigt, akzeptierbare Risiken auf der Grundlage einer Exposition zu definieren, bei welcher ein «erhöhtes Risiko für gesundheitsschädliche oder lästige Auswirkungen besteht».⁶⁶ Von «erhöhtem Risiko» wird gesprochen, weil auch ohne Lärmbelastung ein Risiko für kardiovaskuläre Mortalität, IHD und Diabetes besteht. Lärmbelastungen erhöhen dieses Risiko jedoch. Die Prozentangabe des durch Lärmbelastung erhöhten Risikos (im Folgenden «Zusatzrisiko») beschreibt somit den Anteil der Erkrankungs- bzw. Todesfälle, die statistisch gesehen auf Lärm zurückzuführen sind.

Als eine Art Ankerwert für akzeptierbare Zusatzrisiken wurde das von der WHO in den Environmental Noise Guidelines [10] als kritisch definierte Risiko für ischämische Herzkrankheit (IHD) von 5 % übernommen. Ausgehend davon wurden unter Berücksichtigung des Schweregrads des jeweiligen Endpunkts (quantifiziert anhand der Rangreihenfolge des entsprechenden DW gemäss Tabelle 2) die Kriterien für die anderen beiden Endpunkte (kardiovaskuläre Mortalität und Diabetes) festgelegt. Diese Festlegungen erfolgten aus Gründen der relativen Unsicherheit von DWs (siehe Kapitel 3.2) aber nicht direkt numerisch proportional zur Höhe der entsprechenden DWs, vielmehr dienten die DWs eher als grobe Richtschnur für die Festlegung der akzeptierbaren Risiken.

Die Kommission legte das akzeptierbare Risiko (präzisiert: lärminduziertes Zusatzrisiko) für **IHD** bei **5 %** fest und jenes für **kardiovaskuläre Mortalität** bei **2.5 %**.⁶⁷

Metabolische Effekte des Lärms wurden bisher nirgends für eine Grenzwertempfehlung beigezogen. Dies liegt sehr wahrscheinlich an bisher mangelnden empirischen Grundlagen für solche Effekte. Mit den Resultaten der SiRENE/SAPALDIA-Studie zur Diabetes-Inzidenz in der Schweiz [33] bzw. der oben genannten aufdatierten Meta-Analyse der WHO [66] («WHO Review+») sind nun Aussagen zu Diabetes möglich. Die Kommission definierte als akzeptierbares Zusatzrisiko für **Diabetes** aufgrund der hohen Prävalenz dieses Endpunkts in der Bevölkerung einen Wert von **20 %**. Das bedeutet: Beim IGW darf höchstens jeder fünfte Diabetes-Fall auf die entsprechende Lärmbelastung (und nicht auf andere Ursachen) zurückzuführen sein. Dieses gegenüber kardiovaskulären Effekten höhere akzeptierbare Risiko ist durch das niedrigere DW begründbar.

⁶⁶ Aus diesem Grund sind die in diesem Bericht formulierten Grenzwertempfehlungen nicht als Wirkungs-Schwellen (d.h. sog. «lowest observed adverse effect levels» [LOAEL]) zu verstehen.

⁶⁷ Dies bedeutet, dass bei einer Person mit einer Lärm-Exposition auf Höhe des IGW das Risiko, kausal durch eben diesen Lärm (auf Höhe des IGW) einen tödlichen Herzinfarkt zu erleiden, höchstens 2.5 % betragen darf. D.h., nur einer von 40 tödlichen Herzinfarkten darf auf Höhe IGW durch Lärm als Ursache ausgelöst werden. Unterhalb des IGW muss das Risiko noch kleiner sein, d.h. weniger als 1 lärminduzierter Herzinfarkt auf 40.

3.6 Schritt 6: Ermittlung von Expositions-Wirkungsbeziehungen und Endpunkt-bezogenen Schwellenwerten

Für die Berechnung des jeweils lärmartspezifischen generischen Grenzwerts im Belastungsmass L_{den} wurden einerseits Studien bzw. Expositions-Wirkungsbeziehungen zur Belästigung (%HA) [13, 23] beigezogen, andererseits Studien zu kardiometabolischen Wirkungen [27, 30, 31, 66]. Für die Ermittlung des L_{night} -Grenzwerts wurden Studien über selbstberichtete Schlafstörungen [14, 24] berücksichtigt. Darüberhinaus wurde es als sinnvoll erachtet, die Expositions-Wirkungsfunktionen, die auf Studien mit dem Belastungsmass L_{den} [27, 30, 31, 66] basieren, auch auf die Grenzwertfindung für den Nachtzeitraum bzw. den L_{night} anzuwenden, damit der vorgeschlagene generische Nachtgrenzwert nicht ausschliesslich auf Angaben zu selbstberichteten Schlafstörungen basiert. Begründet werden kann dies damit, dass lärmbedingte kardiometabolische Wirkungen zweifellos auch durch die Lärmbelastung während der Nachtzeit verursacht werden können.

Die aus den als relevant erachteten Studien (vgl. Kapitel 3.4) übernommenen Expositions-Wirkungsfunktionen sind in Tabelle A.T.3 (im Anhang A.1) aufgelistet. Aus den in dieser Tabelle enthaltenen Informationen lässt sich für jeden Endpunkt und jede Lärmart derjenige Pegelwert ermitteln, bei welchem das weiter oben definierte akzeptierbare (Zusatz-)Risiko erreicht bzw. gerade noch nicht überschritten wird. Dieser Pegelwert wird im Weiteren «Endpunkt-bezogener Schwellenwert» (EBS) genannt.

Für **absolute Risiken** (%HA, %HSD) sind in Tabelle A.T.3 Polynome oder logistische Funktionen angegeben (abhängig davon, wie die Expositions-Wirkungsfunktion in der Originalliteratur formalisiert war). Für solche Risiken wird der EBS bei demjenigen Pegelwert bestimmt, bei welchem das akzeptierbare Risiko (also 25 %HA bzw. 15 %HSD) erreicht bzw. gerade noch nicht überschritten wird. In Abbildung 2 wird beispielhaft verdeutlicht, wie aufgrund der Definition von «starker Belästigung» (highly annoyed) auf einer 5- bzw. 11-stufigen Belästigungsskala (links unten in der Grafik) und dem Kriterium «25 %HA» auf einer Expositions-Wirkungskurve (rechts oben in der Grafik) ein EBS abgeleitet werden kann. Die Ermittlung des EBS beim Endpunkt %HSD erfolgt auf ähnliche Weise.

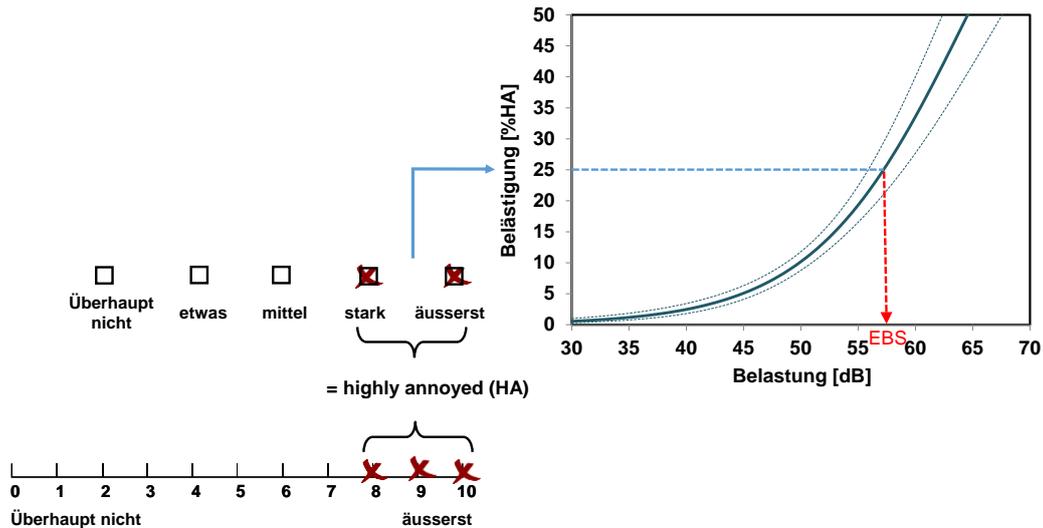


Abbildung 2: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Endpunkt-bezogenen Schwellenwerts («EBS», rot) für den Endpunkt «starke Belästigung» (%HA) am Beispiel des Fluglärms in der SiRENE-Studie. Dabei wird wie folgt vorgegangen: In der SiRENE-Befragung zur Belästigung durch (hier Flug-)Lärm wird denjenigen Personen das Ergebnis «starke Belästigung» (HA) zugewiesen, deren Antwort auf der Belästigungsskala einen bestimmten Skalenwert überschreitet (mit roten Kreuzen markiert). Für jeden Pegelwert kann hernach die Anzahl stark Belästigter und folglich die Kennzahl %HA (Prozent stark Belästigte) ermittelt oder mittels statistischer Modellierung geschätzt werden. Aus diesen Informationen erhält man die Expositions-Wirkungsbeziehung (ggf. mit 95%-Konfidenzintervallgrenzen wie in obiger Abbildung). Auf dieser Kurve kann dann der Pegelwert abgelesen werden, bei welchem ein vorab definiertes Wirkungs-Kriterium (akzeptierbares Risiko, hier 25 %HA) erreicht wird. In diesem Beispiel liegt der EBS bei 57.21 dB (vgl. Tabelle 3, erste Zeile).

Bei **relativen Risiken** (betrifft kardiovaskuläre Mortalität, ischämische Herzkrankheit sowie Diabetes) ist in Tabelle A.T.3 für jeden Endpunkt jeweils das relative Risiko (RR) pro 10 dB Pegelanstieg angegeben.⁶⁸ Für solche Risiken wird der Endpunkt-bezogene Schwellenwert als derjenige Belastungswert bestimmt, bei welchem das akzeptierbare Zusatzrisiko⁶⁹ (also 0.05 für IHD, 0.025 für kardiovaskuläre Mortalität, 0.2 für Diabetes) gegenüber einem Referenzpegel (mit per definitionem einem Zusatzrisiko von 0) erreicht wird. Als Referenzpegel wird in einem lärmepidemiologischen statistischen Modell die niedrigste untersuchte Lärmbelastungskategorie bezeichnet (meist liegt diese Kategorie im Bereich von etwa 30 bis 50 dB(A)). Statistisch wird eine (kausale)

⁶⁸ Im Falle des Eisenbahnlärms lagen die empirischen Schätzer für das relative Risiko bei den Endpunkten IHD und Diabetes so niedrig bzw. legten sogar einen protektiven Effekt nahe (IHD: 1.01, Diabetes: 0.99, vgl. [66]), dass daraus resultierend unrealistisch hohe EBS resultiert hätten. Diese unplausiblen Risikoschätzer wurden deshalb für Eisenbahnlärm durch einen allgemeinen Schätzer (anhand der Daten aus [66]) ersetzt, der von einer Meta-Analyse aller Verkehrsarten zusammen abgeleitet wurde, konkret durch 1.016 für den Endpunkt IHD und 1.076 für den Endpunkt Diabetes-Inzidenz.

⁶⁹ Das "Zusatzrisiko" ist definiert als RR-1

Wirkung der Exposition auf den jeweils untersuchten Endpunkt in dieser untersten Kategorie als null angenommen, was einem relativen Risiko von 1 bzw. einem Zusatzrisiko von 0 entspricht. Daraus lässt sich unter Annahme von Linearität des Zusammenhangs zwischen Belastung und relativem Risiko der Endpunkt-bezogene Schwellenwert (EBS) durch folgende Gleichung⁷⁰ bestimmen:

$$\text{EBS} = \text{Referenzpegel} + \frac{\text{akzeptierbares Zusatzrisiko}}{(\text{RR} - 1)} \times 10 \quad (1)$$

wobei:

EBS Endpunkt-bezogener Schwellenwert [dB]

RR Relatives Risiko pro Anstieg des Pegels um 10 dB

Bei der Anwendung von Expositions-Wirkungsfunktionen, die ein relatives Risiko pro 10 dB Zunahme des Pegels beschreiben (kardiovaskuläre Mortalität, ischämische Herzkrankheit, Diabetes), wurde ein Referenzpegel von **45 dB** beim L_{den} bzw. ein Referenzpegel von **35 dB** beim L_{night} angenommen,⁷¹ auch wenn die Referenzpegel in den zugrunde liegenden Originalstudien ggf. davon abweichen. Begründet werden können diese Setzungen von Referenzpegeln (45 dB L_{den} , 35 dB L_{night}) zum einen damit, dass (höhere) Referenzpegel in Originalstudien oft auch nur Setzungen sind, etwa bedingt durch die eingeschränkte Verfügbarkeit von Expositionsdaten im niedrigen Belastungsbereich, und zum anderen damit, dass bei allen Lärm-Wirkungen mangels Hinweisen auf «natürliche Schwellen» von einem über einen weiten Belastungsbereich linearen Zusammenhang ausgegangen werden kann und es mit grosser Wahrscheinlichkeit keine «ausreichend geringe» Exposition gibt, unterhalb derer das zusätzliche Risiko den Wert 0 erreicht.

Nachfolgende Tabelle 3 listet die anhand der festgelegten Kriterien und der Expositions-Wirkungsfunktionen aus Tabelle A.T.3 (Spalte «EWF») im Anhang ermittelten Endpunkt-bezogenen Schwellenwerte (EBS) für den L_{den} und den L_{night} auf.

⁷⁰ Am Beispiel Strassenlärm/Diabetes/ L_{den} ist Gleichung (1) folgendermassen zu interpretieren: Das akzeptierbare Zusatzrisiko des Endpunkts Diabetes beträgt 0.2. Das relative Risiko pro 10 dB Anstieg beträgt 1.11 und der Referenzpegel 45 dB(A). Der Endpunkt-bezogene Schwellenwert errechnet sich somit als $45 + (0.2 / (1.11 - 1)) \times 10$, was (abgerundet) 63 dB(A) ergibt.

⁷¹ Im Falle des Eisenbahnlärms wurden jedoch die Referenzpegel für kardiovaskuläre Mortalität und IHD auf 40 dB(A) L_{den} (bzw. 30 dB L_{night}) gesetzt, da Effekte bei diesem Pegel empirisch nachgewiesen sind [30].

Tabelle 3: Endpunkt-bezogene Schwellenwerte (EBS) für die Belastungsmasse L_{den} (obere Hälfte) und L_{night} (untere Hälfte) in dB, gemäss den vorab festgelegten Kriterien für akzeptierbare Risiken. Hellgrün hinterlegt: selbstberichtete Wirkungen; hellblau hinterlegt: somatisch-medizinische Wirkungen.

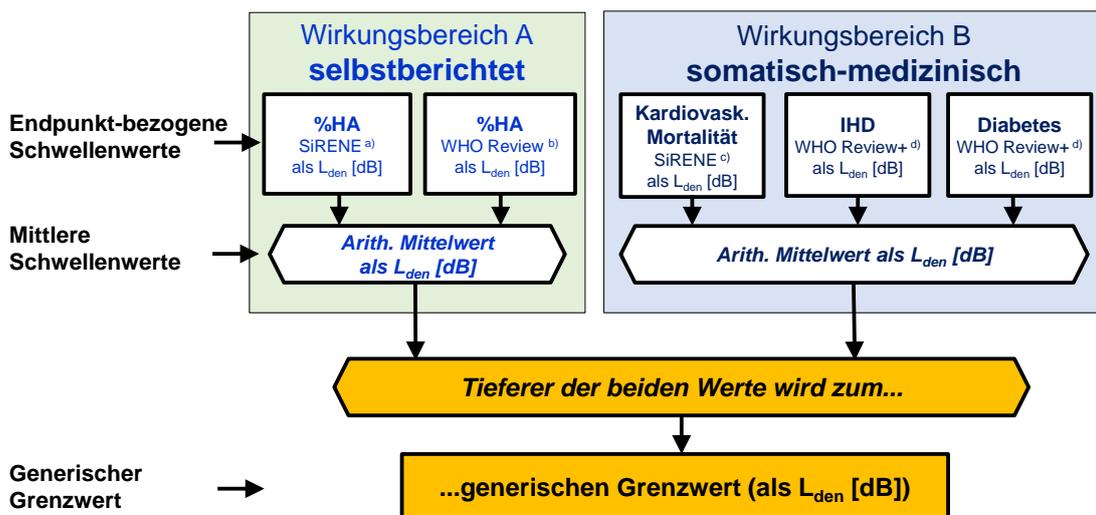
Endpunkt	Ref.	Belastungs- mass	EBS		
			Strasse	Bahn	Flug
%HA (SiRENE)	[13]	L_{den}	67.58	65.12	57.21
%HA (Meta-Analyse)	[23]	L_{den}	67.89	65.01	54.03
Kardiovask. Mortalität	[30, 31]	L_{den}	54.26	53.63	54.26
Ischämische Herzkrankheit	[66]	L_{den}	70.00	71.25	61.67
Diabetes	[66]	L_{den}	63.18	71.32	55.00
%HSD (SiRENE)	[14]	L_{night}	56.88	53.74	42.07
%HSD (Meta-Analyse)	[24]	L_{night}	68.99	58.48	44.92
Kardiovask. Mortalität	[30, 31]	L_{night}	41.26	45.63	44.26
Ischämische Herzkrankheit	[66]	L_{night}	60.00	61.25	51.67
Diabetes	[66]	L_{night}	53.18	61.32	45.00

3.7 Schritt 7: Bestimmung generischer Grenzwerte als L_{den} und L_{night} für die untersuchten Lärmarten

Im vorherigen Schritt wurden für die untersuchten Lärmarten Endpunkt-bezogene Schwellenwerte (EBS) in dB festgelegt, bei denen das vorgängig definierte akzeptierbare Zusatzrisiko erreicht bzw. gerade noch unterschritten wird. Daraus resultierten pro Lärmart und je Belastungsmass je fünf EBS (vgl. Tabelle 3). Diese müssen in diesem siebten Schritt nun für jede Lärmart je in einen generischen Grenzwert zusammengeführt werden. Der schematische Ablauf hierfür ist in Abbildung 3.1 bzw. 3.2 dargestellt. Zunächst wurden die zwei Wirkungsbereiche A) subjektive Wirkungen (Belästigung und Schlafstörung; in Tabelle 3 hellgrün hinterlegt) und B) somatisch-medizinische Wirkungen (kardiovaskuläre Mortalität, IHD und Diabetes; in Tabelle 3 hellblau hinterlegt) unterschieden. Anschliessend wurden pro Wirkungsbereich (A oder B), Belastungsmass (L_{den} oder L_{night}) und Lärmart (Strassen-, Eisenbahn- oder Fluglärm) die vorliegenden Endpunkt-bezogenen Schwellenwerte arithmetisch gemittelt

und das Ergebnis auf die nächste ganze dB-Zahl abgerundet⁷². Dadurch wird pro Wirkungsbereich, Belastungsmass und Lärmart ein einziger mittlerer Schwellenwert auf 1 dB genau bestimmt. Den Mittelwert zu berechnen ist eine einfache Methode, den resultierenden Schwellenwert gewissermassen zu stabilisieren. Alle in die Mittelung eingehenden Endpunkte innerhalb eines Wirkungsbereichs erhalten hierbei rechnerisch auch dasselbe Gewicht, weil die Gewichtung des Schweregrads jedes Endpunkts ja bereits in einem früheren Schritt, bei der Zuweisung des akzeptierbaren Risikos, vorgenommen wurde.

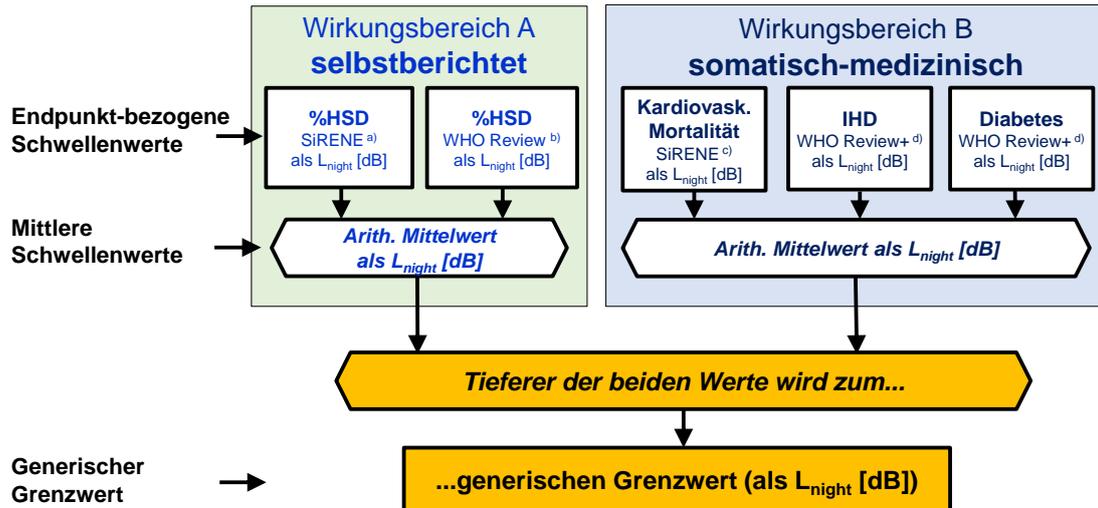
Schliesslich wurde pro Belastungsmass (L_{den} und L_{night}) und Lärmart der **tiefere** der beiden Werte aus den Wirkungsbereichen A und B als generischer Grenzwert für die jeweilige Lärmart definitiv festgelegt. Damit ist nach Auffassung der Kommission explizit die Forderung von Art. 74 BV und auch des Vorsorgeprinzips erfüllt, wonach nicht nur «schädliche» (hier: dem Wirkungsbereich B zugehörige), sondern auch «lästige» (hier: dem Wirkungsbereich A zugehörige) Einwirkungen zu begrenzen sind: Setzt eine Schädigung vor der Lästigkeit ein, so muss sich ein Grenzwert an dieser Schwelle orientieren und umgekehrt.



Quellen: ^{a)} [13]; ^{b)} [23]; ^{c)} [30, 31]; ^{d)} [66]

Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Ablaufs zur Ermittlung des generischen L_{den} -Grenzwerts anhand der Endpunkt-bezogenen Schwellenwerte für jeweils den Wirkungsbereich A (mittels Selbstbericht erhobene Wirkungen) und B (somatisch-medizinische Wirkungen).

⁷² Durch Abrunden kann das vorgängig definierte gesundheitliche Kriterium nicht verletzt werden. Zudem wirkt Abrunden der tendenziell allen umweltepidemiologischen Studien innewohnenden Unterschätzung des wahren Effekts einer Umweltbelastung entgegen.



Quellen: ^{a)} [14]; ^{b)} [24]; ^{c)} [30, 31]; ^{d)} [66]

Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Ablaufs zur Ermittlung des generischen L_{night} -Grenzwerts anhand der Endpunkt-bezogenen Schwellenwerte für jeweils den Wirkungsbereich A (mittels Selbstbericht erhobene Wirkungen) und B (somatisch-medizinische Wirkungen).

Die Berechnungen mit den entsprechenden Zahlenwerten jeweils pro Lärmart und Belastungsmass aus Tabelle 3 ergeben die in Gleichung 2 dargestellten generischen Grenzwerte (GGW).

$$\begin{aligned}
 \text{GGW}_{\text{Strasse,Lden}} &= \min\left(\left\lfloor \frac{67.58 + 67.89}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{54.26 + 70.00 + 63.18}{3} \right\rfloor\right) = \min(67,62) = 62 \text{ dB} \\
 \text{GGW}_{\text{Bahn,Lden}} &= \min\left(\left\lfloor \frac{65.12 + 65.01}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{55.63 + 71.25 + 71.32}{3} \right\rfloor\right) = \min(65,66) = 65 \text{ dB} \\
 \text{GGW}_{\text{Flug,Lden}} &= \min\left(\left\lfloor \frac{57.21 + 54.03}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{54.26 + 61.67 + 55.00}{3} \right\rfloor\right) = \min(55,56) = 55 \text{ dB} \\
 \text{GGW}_{\text{Strasse,Lnight}} &= \min\left(\left\lfloor \frac{56.88 + 68.99}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{44.26 + 60.00 + 53.18}{3} \right\rfloor\right) = \min(62,52) = 52 \text{ dB} \\
 \text{GGW}_{\text{Bahn,Lnight}} &= \min\left(\left\lfloor \frac{53.74 + 58.48}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{45.63 + 61.25 + 61.32}{3} \right\rfloor\right) = \min(56,56) = 56 \text{ dB} \\
 \text{GGW}_{\text{Flug,Lnight}} &= \min\left(\left\lfloor \frac{42.07 + 44.92}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{44.26 + 51.67 + 45.00}{3} \right\rfloor\right) = \min(43,46) = 43 \text{ dB}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Die generischen Grenzwerte als L_{den} und L_{night} sind schliesslich in Tabelle 4 dargestellt. Die massgeblichen Zahlenwerte (DWs, akzeptierbare Zusatzrisiken, EBS und RR pro 10 dB Anstieg des Pegels) zur Berechnung dieser Grenzwerte sind in den Tabellen A.T.4.1 und A.T.4.2 im Anhang dokumentiert.

Tabelle 4: Generische Grenzwerte als L_{den} und L_{night} in dB(A)

Lärmart:	L_{den}	L_{night}
Strassenlärm	62 ^B	52 ^B
Eisenbahnlärm	65 ^A	56 ^{A=B}
Fluglärm	55 ^A	43 ^A

^A Grenzwert festgelegt aufgrund selbstberichteter Wirkungen (Wirkungsbereich A)

^B Grenzwert festgelegt aufgrund somatisch-medizinischer Wirkungen (Wirkungsbereich B)

Es wird empfohlen, sich bei der Festlegung konkreter Belastungsgrenzwerte, in welchem Belastungs- und Beurteilungsmass auch immer diese ausgewiesen werden, an den obenstehenden generischen Grenzwerten zu orientieren. Die generischen Grenzwerte können als Immissionsgrenzwerte für Wohnzonen (Empfindlichkeitsstufe II, vgl. Kapitel 3.5) interpretiert werden und gelten grundsätzlich am lautesten Punkt auf der Gebäudehülle der jeweiligen Wohn- oder Nutzungseinheit.

4 Analyse weiterer Elemente der Lärm-Beurteilungsmethodik und deren Anpassungsbedarf

Die im vorangegangenen Kapitel hergeleiteten generischen Grenzwerte in den Belastungsmassen L_{den} und L_{night} entsprechen vom Schutzniveau her grundsätzlich dem Immissionsgrenzwert (IGW). Der IGW ist jedoch nur eines von mehreren Elementen (Regelungsaspekten) der Lärm-Beurteilungsmethodik. Daneben gibt es weitere Elemente:

- der Geltungsbereich der Grenzwerte,
- der massgebliche Ermittlungsort (auch «Immissionsort» genannt),
- das Belastungs- und Beurteilungsmass,
- die Beurteilungszeiten (Unterteilung des 24-Stunden-Tages in unterschiedliche Beurteilungszeiträume),
- die raumplanerische Differenzierung der Belastungsgrenzwerte in Empfindlichkeitsstufen (ES),
- die Differenzierung in Planungs-, Immissionsgrenz- und Alarmwerte (PW, IGW, AW), sowie
- die Pegelkorrekturen.

Die nachfolgenden Kapitel widmen sich der Überprüfung der genannten Elemente. Diese Elemente wurden dahingehend untersucht, ob im Lichte des aktuellen Stands des Wissens oder der Erfahrung in diesen Bereichen Anpassungen notwendig und/oder angemessen erscheinen. Dazu wurden die langjährigen Erfahrungen im Vollzug, die wissenschaftliche Literatur, sowie zum Zwecke dieses Berichts erstellte Auswertungen der SiRENE-Studie, insbesondere der SiRENE-Befragung [13, 14] (vgl. Anhang A.3) einbezogen. Dabei wird in den folgenden Kapiteln grossmehrheitlich je Element zunächst die bisher gültige Regelung erläutert, danach werden Erwägungen diskutiert, inwiefern die jeweilige Regelung anpassungsbedürftig ist, und schliesslich Schlussfolgerungen gezogen, ob und welche Anpassungen der jeweiligen Regelung angezeigt sind.

4.1 Geltungsbereich

4.1.1 Bisherige Regelung

Die Belastungsgrenzwerte gelten für lärmempfindliche Räume. Diese werden in der LSV in Art. 2 Abs. 6 definiert. Als lärmempfindliche Räume gelten nicht nur Räume in Wohnbauten mit Ausnahme von Küchen ohne Wohnanteil, Sanitärräumen und Ab-

stellräumen, sondern z.B. auch Räume in Betrieben, Räume also, die zwar dem längeren Aufenthalt von Menschen dienen, aber nicht Wohnungen im engeren Sinne sind.

4.1.2 Erwägungen

USG und LSV regeln den Lärmschutz vor allem, aber nicht ausschliesslich, im Bereich des Wohnens, denn die eigene Wohnung oder das eigene Haus ist der Ort, an und in welchem sich Menschen die meiste Zeit ihres Lebens aufhalten. Wohnungen, inkl. unmittelbar zugehöriger Aussenbereiche, dienen u.a. der geistigen und körperlichen Erholung und müssen deshalb besonders vor Lärm geschützt werden. Aber auch die meisten betrieblich genutzten und nicht primär einem Wohnzweck dienenden Räume sind grundsätzlich als lärmempfindliche Räume zu betrachten und sind in die Regelungen der LSV eingeschlossen. Solche Räume dienen allerdings nicht primär der oben beschriebenen geistigen und körperlichen Erholung bzw. werden nicht über längere Zeiträume zu diesem Zweck benutzt. Der Schutz des unmittelbaren Aussenbereichs spielt bei dieser Art von Räumen ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Daneben verfügen viele solcher Räume auch über kontrollierte Raumlüftungen die etwa ein Öffnen der Fenster zu Lüftungszwecken unnötig machen.

4.1.3 Schlussfolgerungen

Die LSV ist primär ein Instrument, welches den Schutz des *Wohnens* vor Lärm regeln soll. Zum Wohnen können alle Tätigkeiten (inkl. Schlafen) gezählt werden, die in und unmittelbar um die eigene Wohnung stattfinden. Räume die dem längeren Aufenthalt von Personen dienen, aber keine Wohnungen im engeren Sinne sind, können in Bezug auf die Geltung der Grenzwerte und die Massnahmen zum Schutz vor Lärm flexibler behandelt werden als Wohnungen. Dies jedoch nur unter der Voraussetzung, dass der notwendige Lärmschutz im Innenbereich gewährleistet, bzw. mit baulichen Massnahmen am Gebäude erreicht wird.

4.2 Ermittlungsort

4.2.1 Bisherige Regelung

Als Ermittlungsort wird der akustische Empfangspunkt bezeichnet, an welchem die Lärmbelastung ermittelt und mit den Belastungsgrenzwerten verglichen wird. Gemäss Art. 39 LSV ist dieser Ermittlungsort bei Gebäuden mit lärmempfindlichen Räumen die

Mitte der offenen Fenster.⁷³ Die Belastungsgrenzwerte müssen an allen Fenstern lärmempfindlicher Räume eingehalten werden.⁷⁴ Bei noch nicht überbauten Bauzonen wird der Lärm dort ermittelt, wo Gebäude mit lärmempfindlichen Räumen erstellt werden dürfen. Im nicht überbauten Gebiet von Zonen mit erhöhtem Lärmschutzbedürfnis ist der Ermittlungsort 1.5 m über dem Boden (vgl. Kapitel 2.7).

4.2.2 Erwägungen

Aus Sicht der Kommission sollte der Ermittlungsort folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Schallexposition am Ermittlungsort soll dazu geeignet sein, die unerwünschten Auswirkungen des Lärms auf die Betroffenen im Innen- aber auch im unmittelbaren Aussenbereich der jeweiligen Wohn- bzw. Nutzungseinheit möglichst gut abzubilden.
- Der Ermittlungsort sollte mit demjenigen akustischen Empfangspunkt übereinstimmen, der bei denjenigen Grundlagenstudien massgeblich war, welche zur Festlegung von Belastungsgrenzwerten beigezogen wurden (vgl. Kap 3.1 und 3.4). So wird gewährleistet, dass die gemessene oder berechnete akustische Belastung mit der zu begrenzenden Lärmwirkung korrespondiert.⁷⁵
- Der Ermittlungsort soll so festgelegt werden, dass generell Lärmschutz-Massnahmen begünstigt werden, welche der vom USG verfolgten Strategie der Lärmbekämpfung entsprechen. Diese Strategie priorisiert Massnahmen an der Quelle vor allen anderen Massnahmen.
- Der Ermittlungsort sollte eindeutig definiert sein und die akustische Belastung sollte an diesem Ort sowohl gemessen als auch berechnet werden können. Der Ermittlungsort muss dazu in der Praxis einfach zugänglich sein.

Der bisher massgebliche Ermittlungsort «in der Mitte der offenen Fenster lärmempfindlicher Räume» kann die oben formulierten Anforderungen nur teilweise erfüllen, dies aus folgenden Gründen:

- **Praktische Bedeutung:** Bereits weiter zurückliegende sozio-akustische Belästigungsbefragungen in der Schweiz haben aufgezeigt, dass die Belästigung durch Lärm am Wohnort nicht primär durch die Situation im Gebäudeinneren bestimmt wird, sondern dass auch die Lärmbelastung des unmittelbaren Aussenbereichs in das Belästigungsurteil einfliesst [71]. Eine wichtige Erkenntnis aus der SiRENE-Studie war zudem, dass die Belastung an der lauten Gebäudeseite stärker mit dem Anteil stark Belästigter (%HA) sowie dem Anteil der

⁷³ Was genau als «Fenster» gilt, wird in der LSV nicht definiert.

⁷⁴ vgl. BGE 142 II 100

⁷⁵ Die meisten Lärmwirkungsstudien verwenden als Belastungsmass rechnerisch bestimmte Pegel auf der Fassade (ohne Berücksichtigung von z.B. Anbauten, Blenden, Brüstungen, Balkonen etc.), d.h. entweder den Fassadenpunkt mit der höchsten Exposition pro Gebäude oder wie im Falle der SiRENE-Studie pro Stockwerk.

stark im Schlaf Gestörten (%HSD) korreliert als auf der lärmabgewandten leisen Seite (siehe Tabelle A.T.5 im Anhang). Analoge Ergebnisse ergeben sich auch aus epidemiologischen Studien, bei welchen sich der Pegel an der lautesten Fassade als geeigneteres Belastungsmass erwies als der Pegel auf der Gebäudeseite mit der niedrigsten Belastung [72].

- Übereinstimmung mit Grundlagenstudien: Die Mitte der offenen Fenster lärmempfindlicher Räume ist nicht in allen Fällen konsistent mit demjenigen Ermittlungsort, welcher in der Regel in umweltepidemiologischen und Belästigungsstudien herangezogen wird, um Expositions-Wirkungsfunktionen zu berechnen – und letztlich daraus abgeleitete Grenzwerte zu bestimmen. Lärmempfindliche Räume werden üblicherweise zur lärmabgewandten Seite hin ausgerichtet, während fast alle Lärmwirkungsstudien ihren Analysen die Exposition am lautesten Fassadenpunkt eines Gebäudes oder einer Wohneinheit zugrunde legen.
- Schaffung von Anreizen für «pro-forma» Lärmschutzmassnahmen am Gebäude, statt an der Quelle: Es kommt in der Praxis oft vor, dass der Lärm ausschliesslich am Ermittlungsort «offene(s) Fenster» durch unmittelbar vor diesem Punkt befestigte Bauteile (vorgehängte Blenden, verglaste Balkone etc.) reduziert wird, ohne dass sich dadurch die Lärmbelastung im unmittelbaren Aussenraum ändert. Als Konsequenz dieser Entwicklung entfällt der Druck, die Lärmemissionen an der Quelle weiter zu senken [73]. Massnahmen am Gebäude bzw. an einer Nutzungseinheit selbst zielen nur auf einen Schutz des Gebäudeinnern ab. Solche Massnahmen können zwar Sinn ergeben, wenn dadurch ein besserer Schutz des Innenraumes erzielt wird. Analog zum Einbau eines Schallschutzfensters sind sie aber nur als Ersatzmassnahme zu werten und erfüllen die zusätzliche Anforderung des Schutzes des unmittelbaren Aussenraums vor Lärm nicht.

4.2.3 Schlussfolgerungen

Der aktuell in der LSV definierte Ermittlungsort «in der Mitte der offenen Fenster lärmempfindlicher Räume» wird dem Lärmschutzziel nicht vollumfänglich gerecht. Als Alternative empfiehlt die Kommission, die Lärmbeurteilung am lautesten Punkt auf der Gebäudehülle der Nutzungseinheit mit lärmempfindlichen Räumen vorzunehmen, wobei ggf. unmittelbar vor diesem Punkt befestigte auskragende Anbauten wie Balkone, Brüstungen und Blenden etc. so behandelt werden, als wären sie nicht da. Weiter soll es unerheblich sein, ob die unmittelbar hinter dem lautesten Punkt liegenden Räume als lärmempfindlich gelten oder nicht. Dieser Ermittlungsort gewährleistet, dass die Notwendigkeit zur Lärmbekämpfung an der Quelle für Lärmverursacher/innen weiterhin gegeben ist. Zudem ist dieser Ermittlungsort mit den massgebenden Lärm-Berechnungsvorschriften der EU [11] kompatibel.

4.3 Belastungsmass

4.3.1 Bisherige Regelung

Das Schutzkonzept für Lärm von Verkehrsinfrastrukturanlagen (Strassen, Bahnlinien, Flughäfen) in der LSV beruht auf dem sog. Dosisprinzip, bei welchem die akustische Belastung (Dosis) über einen definierten Zeitraum (vgl. Kapitel 4.4) energetisch gemittelt wird.⁷⁶ Das heisst, Intensität, Dauer und Häufigkeit von Lärmereignissen fliessen in einen in der Regel mit dem A-Filter bewerteten Mittelungspegel (L_{Aeq}) ein. Bisher werden in der Schweizerischen Lärmschutzgesetzgebung von wenigen Ausnahmen abgesehen L_{Aeq} -basierte Belastungsmasse verwendet. Speziell störende Charakteristiken des Lärms, die nicht gut im L_{Aeq} abgebildet werden können, wie Tonhaltigkeit, Impulshaltigkeit, Anzahl Ereignisse, zeitliches Auftreten etc., werden durch Pegelkorrekturen K berücksichtigt, indem diese zum L_{Aeq} addiert werden (vgl. dazu Kapitel 4.9). Das so erhaltene Lärmbeurteilungsmass wird als «Beurteilungspegel» bezeichnet und mit L_r abgekürzt. Der L_r ist ein Indikator für die durch Lärm zu erwartenden unerwünschten Wirkungen. Um in der Praxis festzustellen, ob ein Belastungsgrenzwert eingehalten oder überschritten ist, muss der Beurteilungspegel L_r ermittelt und dann mit dem massgeblichen Belastungsgrenzwert verglichen werden.

4.3.2 Erwägungen

Grundsätzlich ist für die Begrenzung einer bestimmten Lärmwirkung mittels eines Grenzwerts dasjenige Belastungsmass das geeignetste, welches den Zusammenhang zwischen Belastung und Wirkung am besten erklären kann.

Die in diesem Bericht für die Grenzwertsetzung berücksichtigten Wirkungen werden mit einem auf einem Mittelungspegel basierenden Mass vergleichsweise gut abgebildet, da es sich beim Lärm durch Transportinfrastrukturen, vor allem am Tag, um kontinuierliche oder periodisch wiederkehrende Geräusche handelt.

Die zurzeit verwendeten, auf dem L_{eq} basierenden Belastungsmasse haben sich seit den späten 1970er-Jahren als wichtigste Lärmbeurteilungsgrössen in der Schweiz und auch international durchgesetzt, nicht zuletzt wegen des Aufkommens sog. integrierender Schallpegelmesser, welche die Messung des L_{eq} ohne grösseren Aufwand möglich machten [8]. Die gängigen, auf dem L_{eq} basierenden Belastungsmasse wie L_{den} , L_{dn} , L_{day} oder L_{night} korrelieren meist sehr hoch untereinander und können durch empirisch ermittelte Konversionsregeln hinreichend präzise ineinander umgerechnet werden [12].

⁷⁶ Für Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm wird die Lärmbelastung am Tag (06–22 Uhr) über 16 Stunden gemittelt. In der Nacht (22–06 Uhr) wird für Strassen- und Eisenbahnlärm über 8 Stunden gemittelt, für Fluglärm jeweils über drei getrennte Einzelstunden (22–23, 23–24 und 05–06 Uhr).

Eine aktuelle Sichtung der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur zeigt auf, dass die am häufigsten in Lärmwirkungsstudien verwendeten Belastungsmasse der L_{den} und der L_{night} sind, welchen als akustische Basisgrösse der L_{eq} zugrunde liegt.⁷⁷ Untersuchungen der letzten Jahre sind zum Schluss gekommen, dass kein Mass besser geeignet ist, die generelle Lärmbelastung vorherzusagen, als der L_{den} [74, 75]. L_{den} und L_{night} werden auch von der WHO empfohlen bzw. in deren Berichten und Richtlinien benutzt [10, 65, 76]. Während der L_{night} ein Mittelungspegel über die Nachtstunden ist, basiert der L_{den} auf einer Mittelwertbildung über 24 Stunden eines Tages. Dabei werden in Form von drei unterschiedlichen Teilpegeln die Tagesstunden, die Abendstunden und die Nachtstunden unterschiedlich gewichtet, indem die Abendstunden mit einer Beaufschlagung von +5 dB und die Nachtstunden mit einer solchen von +10 dB versehen werden.

4.3.3 Schlussfolgerungen

Es ist sinnvoll, weiterhin am Dosisprinzip festzuhalten und als Belastungsmass (akustisches Basismass) sowohl für die Tag- als auch für die Nachtperiode einen energetisch gemittelten Schalldruckpegel und als Beurteilungsmass einen Beurteilungspegel L_r (d.h. einen mit Pegelkorrekturen korrigierten Pegel) zu verwenden. Alternativ zum ungewichteten Mittelungspegel kann als Basismass für die Tagperiode auch der L_{den} als integrales Mass für den gesamten (24-stündigen) Tag, mit einer Beaufschlagung für die Abend- und Nachtzeit, empfohlen werden. Für den Fluglärm in der Nacht wird empfohlen, an den bestehenden 1-Stunden- L_{eq} festzuhalten (siehe Kapitel 4.4).

4.4 Beurteilungszeiten

4.4.1 Bisherige Regelung

Grundsätzlich erfolgt die Lärmbeurteilung in der LSV nach Tag- und Nachtzeitraum getrennt, indem für diese Zeitperioden separate Belastungsgrenzwerte gelten. Diese Zweiteilung fusst auf der Erkenntnis, dass der Mensch auf Nachtlärmstörungen empfindlicher reagiert als auf Störungen durch Lärm am Tag, und dementsprechend der Schutz in der Nacht strenger sein muss. Der Empfindlichkeitsunterschied zwischen Tag und Nacht wird im Allgemeinen mit ca. 10 dB beziffert und ist zumindest beim Fluglärm empirisch hinreichend gesichert [77, 78]. Die Lärmwirkungsforschung hat darüber hinaus gezeigt, dass das vegetative Nervensystem im Schlaf um 10 bis 12 dB

⁷⁷ Bevölkerungsbasierte epidemiologische Studien, die auf anderen Belastungsgrössen als dem L_{eq} beruhen, gibt es nach aktueller Kenntnis kaum – mit Ausnahme der Teilstudien aus dem SiRENE-Projekt, die auch den Einfluss der Intermittenz («Ereignishaftigkeit») untersucht haben.

empfindlicher ist als im Wachzustand [79]. In der LSV unterscheiden sich die Belastungsgrenzwerte zwischen Tag- und Nachtperiode bei fast allen Lärmarten um 10 dB (vgl. dazu auch Tabelle 5). Die Beurteilungszeiten bzw. die Definition der Zeiträume «Tag» und «Nacht» sind in der LSV dagegen lärmquellenabhängig,⁷⁸ wobei für die Verkehrslärmarten eine einheitliche Regelung gilt: Bei Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm wird der Zeitraum von 06–22 Uhr als Tag und der Zeitraum von 22–06 Uhr als Nacht beurteilt. In Art. 39 der Verordnung über die Infrastruktur der Luftfahrt (VIL) ist die landesweite⁷⁹ Nachtflugsperrung zwischen 00–05 Uhr verankert, welche beim Fluglärm dazu führt, dass nicht die Nacht als Ganzes, sondern nur die an den Zeitraum der Nachtflugsperrung angrenzenden Stunden, konkret 22–23, 23–24, und 05–06 Uhr, (jeweils einzeln) beurteilt werden. Durch die getrennte Beurteilung der nächtlichen Einzelstunden in der LSV wird die stündliche Schallenergie (als Ein-Stunden-Mittelungspegel, 1-h- L_{eq}) auf einer Höhe begrenzt, welche schon von wenigen lauten Flügen erreicht wird. Der Ein-Stunden-Mittelungspegel übernimmt beim Fluglärm zu den Randzeiten somit die Funktion eines Spitzenkriteriums, damit Aufwachreaktionen wirkungsvoll begrenzt werden können, ohne auf ein Maximalpegelkriterium pro Überflug zurückgreifen zu müssen [80].

4.4.2 Erwägungen

Die derzeit in der LSV unterschiedlichen Beurteilungsperioden für verschiedene Lärmarten lassen sich nicht durch Unterschiede bei gesundheitlichen oder Belästigungswirkungen erklären, sondern durch Besonderheiten des Betriebs der entsprechenden Anlagen bzw. auch durch unterschiedliche Erwartungen in der Bevölkerung, wann eine bestimmte Quelle Lärm machen darf und wann nicht.

Ausschlaggebend für die Festlegung von Tages- und Nachtperioden müssen aus Sicht der Kommission die Schlafgewohnheiten der Bevölkerung sein. Dies wurde auch im Bundesgerichtsentscheid zu den morgendlichen (Süd-)Anflügen auf den Flughafen Zürich⁸⁰ gefordert, mit dem Hinweis, dass die aktuelle Tag-Nacht-Einteilung (Beginn der Nacht um 22 Uhr, Ende um 06 Uhr) den Schlaf der Bevölkerung in der Zeit von 06–07 Uhr morgens nicht genügend schütze.

Aus Untersuchungen des Schlafverhaltens der Schweizer Bevölkerung (vgl. Anhang A.3.1) ist ersichtlich, dass es einerseits keinen Zeitpunkt im Tagesverlauf gibt, während dessen alle Menschen schlafen oder alle wach sind, und dass andererseits ein

⁷⁸ Für Industrie- und Gewerbelärm ist die Tagperiode von 07–19 Uhr und die Nachtperiode von 19–07 Uhr definiert. Ähnlich sind die Beurteilungszeiten beim Lärm von militärischen Schiess- und Übungsplätzen festgelegt, d.h. der Tag entspricht dem Zeitraum von 07–19 Uhr, wobei der Lärm im Zeitraum von 19–07 Uhr auch zum Tag gerechnet wird, jedoch mit einem Malus von 5 dB beaufschlagt wird.

⁷⁹ Betrifft effektiv nur die Landesflughäfen Genf und Zürich (der Euro Airport Basel liegt auf französischem Staatsgebiet). Die Nachtflugsperrung bei den übrigen Flugplätzen ist strenger.

⁸⁰ Vgl. Urteil BGer 137 II 58 (Flughafen Zürich), 22.12.2010

Beginn der Nacht um 22 Uhr sowie ein Ende um 06 Uhr zu früh angesetzt erscheinen, da um 22 Uhr die Mehrheit der erwachsenen Bevölkerung noch nicht im Bett ist und um 06 Uhr weniger als die Hälfte schon aufgestanden ist. Eine Verschiebung des derzeit in der LSV definierten Nachtzeitraums für Verkehrslärm (Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) von 22–06 Uhr um mindestens eine Stunde nach hinten, d.h. auf den Zeitraum von 23–07 Uhr, würde besser mit den Schlafgewohnheiten der Bevölkerung übereinstimmen. Mit einer Nachtperiode von 23–07 Uhr würde auch die kritische Stunde von 06–07 Uhr beim Fluglärm der Nacht zugerechnet. Hingegen würde nicht berücksichtigt, dass gerade Kinder früher zu Bett gehen und auch die Einschlafphase eines erhöhten Schutzes bedarf. Da zudem die Tageszeit-spezifische Lärmempfindlichkeit der Bevölkerung (vgl. Anhang A.3.2) in den Abendstunden erhöht ist, sollte der Beginn der Nachtperiode um 22 Uhr beibehalten werden. So argumentierte im Übrigen auch die im Nachgang des o.g. Bundesgerichtsentscheids vor ca. zehn Jahren vom UVEK eingesetzte Arbeitsgruppe Fluglärm-Belastungsgrenzwerte und raumplanerische Flexibilisierung, welche den Auftrag hatte, ein Konzept für die rechtskonforme Beurteilung des Fluglärms in den frühen Morgenstunden zu entwickeln [81, 82].

Mit dem Vorschlag der Kommission würde also bei Verkehrslärm (Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) die Nachtzeit von heute 8 auf neu 9 Stunden ausgedehnt und von 22–07 Uhr dauern.

4.4.3 Schussfolgerungen

Aus Sicht des Gesundheitsschutzes sollte die Beurteilungszeit für die Nacht für alle Verkehrslärmarten grundsätzlich auf den Zeitraum von 22–07 Uhr ausgedehnt werden. Damit wird die Beurteilungszeit während der Tagesstunden von heute 16 auf 15 Stunden verkürzt. Im Falle des Fluglärms soll für die Nachtperiode die Einzelstundenbetrachtung beibehalten und die drei bestehenden Einzelstunden um eine weitere Einzelstunde am Morgen von 06–07 Uhr ergänzt werden. Darüber hinaus ist es angezeigt, analog zum Fluglärm für die restlichen Verkehrslärmarten eine zusätzliche Beurteilung der lautesten Nachtstunde zu prüfen, um lärminduzierte Aufwachreaktionen zu begrenzen.

4.5 Differenzierung der Belastungsgrenzwerte in Empfindlichkeitsstufen (ES)

4.5.1 Bisherige Regelung

Mittels des Systems der Empfindlichkeitsstufen (ES) werden die Belastungsgrenzwerte mit der Raumplanung und bestimmten Nutzungszonen verknüpft (vgl. Art. 43

LSV sowie Kapitel 2.5). Mit wenigen Ausnahmen sind die Belastungsgrenzwerte nach ES abgestuft, wobei Erholungszonen (ES I) und reine Wohnzonen (ES II) tiefere Belastungsgrenzwerte aufweisen als Misch- und Gewerbezone (ES III) und Industriezonen (ES IV). Während über 90 % der Wohneinheiten in der Schweiz einer ES II oder III zugeordnet sind, sind Wohnnutzungen in der ES I oder ES IV die Ausnahme (z.B. Abwärtswohnungen in Industriezonen der ES IV).

Die LSV geht in Art. 43 implizit davon aus, dass sich die Menschen bei ihren Aktivitäten in einer Nutzungszone mit einer ES III erst bei höheren Pegeln stark belästigt oder gestört fühlen als Menschen in einer Zone der ES II (reine Wohnzone). Die gegenwärtige Regelung der LSV mit unterschiedlichen Belastungsgrenzwerten für die ES II und III mutet daher der Bevölkerung in Gebieten der ES III eine höhere Lärmbelastung zu als derjenigen in Gebieten der ES II.

4.5.2 Erwägungen

Die Differenzierung der Belastungsgrenzwerte in vier verschiedene ES impliziert, dass die Empfindlichkeit der Menschen gegenüber Lärm in unterschiedlichen Nutzungszonen (z.B. Industriezonen im Vergleich zu reinen Wohnzonen) ebenfalls unterschiedlich ist. Auswertungen von Daten aus der SiRENE-Befragung für Gebiete der ES II und ES III zeigen jedoch, dass die selbst-berichtete Lärmempfindlichkeit bei Strassen- und Eisenbahnlärm nicht und beim Fluglärm höchstens geringfügig davon abhängig ist, welcher ES der Wohnort zugeordnet ist (vgl. Anhang A.3.4). Aufgrund der Vorgaben des USG besteht das Lärmschutzziel jedoch darin, alle Menschen überall gleichermaßen zu schützen. In diesem Sinne erscheint angesichts der geschilderten Erkenntnisse die Beibehaltung eines Systems, welches für Wohnungen in Abhängigkeit der ES unterschiedliche Belastungsgrenzwerte festlegt, überholt, respektive wird dem gesetzlichen Schutzziel nicht gerecht.

Deshalb ist es im Zusammenhang mit Verkehrslärm (Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) angezeigt, zumindest in der ES II und ES III die Belastungsgrenzwerte gleichzusetzen. Da die ES für die betroffene Nutzungszone integral jeweils für alle Lärmarten gelten und auch für die Einzelfallbeurteilung bei Lärmarten ohne Grenzwerte eine Rolle spielt, ist diese Gleichsetzung der Grenzwerte für die ES II und ES III bei den Verkehrslärmarten nicht gleichbedeutend mit einer Abschaffung der ES an sich. Eine solche Gleichsetzung wurde im Übrigen auch in der Vergangenheit schon gemacht, so beim militärischen Fluglärm (vgl. dazu Anhang 8 Ziff. 21 LSV).

Abgesehen davon bleibt es auch bei den Verkehrslärmarten angebracht, für die ES I (Erholungszonen) und die ES IV (Industriezone) tiefere bzw. höhere Belastungsgrenzwerte festzulegen, da sich bei diesen Zonen die Schutzziele von denjenigen der ES II und ES III unterscheiden. Während in Gebieten der ES I mit tieferen Belastungsgrenzwerten einem erhöhten Lärmschutzbedürfnis Rechnung getragen wird, lassen

sich in Gebieten der ES IV höhere Belastungsgrenzwerte damit rechtfertigen, dass diese Gebiete sich nicht für Wohnnutzungen eignen (mit Ausnahme von Wohnungen, die sich aus betrieblichen Gründen auf dem entsprechenden Areal befinden müssen).

Die oben erwähnten Forschungsergebnisse wie auch der vorliegende Bericht beziehen sich ausschliesslich auf die Auswirkung von Verkehrslärm (Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) und die Überprüfung der diesbezüglichen Belastungsgrenzwerte. Es ist deshalb nicht auszuschliessen, dass das System der verschiedenen ES mit unterschiedlichen Immissionsgrenzwerten im Zusammenhang mit anderen Lärmarten, z.B. Alltagslärm, nach wie vor sinnvoll und angezeigt ist. Die vorliegenden Aussagen können daher nicht auf alle Lärmarten generalisiert werden.

4.5.3 Schlussfolgerungen

Um einen einheitlichen Schutz der Bevölkerung beim Wohnen sicherzustellen, ist es geboten, die Grenzwerte für Verkehrslärm (Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) für die ES II und ES III gleichzusetzen. Eine differenzierte Grenzwertsetzung für die ES I und ES IV rechtfertigt sich aber aus Gründen der unterschiedlichen Schutzziele. Unabhängig von der erwähnten Gleichsetzung soll die Abstufung in die vier ES beibehalten werden⁸¹.

4.6 Differenzierung in Planungs-, Immissionsgrenz- und Alarmwert

4.6.1 Bisherige Regelung

Nebst den IGW, die erhebliche von nicht erheblichen Störungen der Bevölkerung im Wohlbefinden trennen, enthält die LSV auch Planungswerte (PW) und Alarmwerte (AW). Auf die drei Arten von Grenzwerten wird nachfolgend kurz eingegangen (vgl. dazu auch Kapitel 2.5).

Immissionsgrenzwerte (IGW)

Die IGW trennen zwischen Einwirkungen, die im Sinne des Gesetzes schädlich oder lästig sind, und solchen, die dies nicht sind. Die IGW werden auch als «Leitwerte des Lärmschutzrechts» bezeichnet [1]. Zahlreiche Rechtsfolgen knüpfen an eine Überschreitung des IGW an, wie beispielsweise die Sanierungspflicht gemäss Art. 16 USG. Für die Höhe von Planungswert (PW) und Alarmwert (AW) hat der IGW als Ausgangsgrenzwert eine Art Ankerfunktion inne.

⁸¹ Dies auch im Hinblick auf (künftige) Regelungen und die Einzelfallbeurteilung bei anderen Lärmarten, z.B. beim Alltagslärm und namentlich dem Nachbarschaftslärm aus Gastronomiebetrieben, wo abgestufte Grenzwerte zwischen ES II und III sinnvoll sind.

Planungswerte (PW)

Für die Planung neuer Bauzonen und für den Schutz vor neuen lärmigen ortsfesten Anlagen legt der Bundesrat PW für Lärm fest (Art. 23 USG). Es handelt sich dabei um eine Muss-Vorschrift. Die PW liegen von gewissen Ausnahmen abgesehen jeweils 5 dB unterhalb der IGW. Gemäss der bundesgerichtlichen Rechtsprechung zu Anlagen, für die keine Grenzwerte gelten, sollen die PW ein Belastungsniveau umschreiben, bei dem die Bevölkerung höchstens geringfügig von Lärm gestört wird⁸². Im Unterschied zu den IGW sind die PW Festlegungen, welche konzeptionellen Überlegungen zum Lärmschutz entspringen und nicht (direkt) aus einem Expositions-Wirkungszusammenhang abgeleitet werden.

Konkret dienen PW dem Schutz vor neuen lärmigen ortsfesten Anlagen, indem solche grundsätzlich nur dann erstellt werden dürfen, wenn mindestens die PW eingehalten werden. Zudem dürfen neue Bauzonen, auf denen Gebäude mit lärmempfindlichen Räumen erstellt werden, nur ausgeschieden resp. erschlossen werden, wenn die PW eingehalten sind oder bei denen diese Werte durch planerische, gestalterische oder bauliche Massnahmen eingehalten werden können (vgl. Art. 24 Abs. 1 USG). Die PW werden wegen ihrer Funktion oft als «Vorsorgewert» angesehen. Sie konkretisieren das Vorsorgeprinzip jedoch nicht abschliessend, denn die Vorsorge gilt gemäss Art. 11 Abs. 2 USG unabhängig von der bestehenden Umweltbelastung. Das heisst, vorsorgliche Massnahmen sind auch dann zu treffen, wenn die PW eingehalten sind.

Alarmwerte (AW)

AW dienen primär dazu, die Dringlichkeit der Lärmsanierung von Anlagen zu beurteilen (Art. 19 USG). Der Art. 19 wurde während des Entstehungsprozesses des USG vom Gesetzgeber bewusst als Kann-Vorschrift formuliert. Damit wurde der Entscheid über die Erforderlichkeit von AW für eine bestimmte Lärmart in das Ermessen des Bundesrates gelegt. Die AW gelten jedoch nicht nur als Kriterium für die Beurteilung der Dringlichkeit von Sanierungen, sondern auch als Obergrenze bei gewissen Erleichterungen (Art. 14 LSV). Zudem dienen sie gemäss Art. 20 USG als Schwelle für Schallschutzmassnahmen wie beispielsweise dem Einbau von Schallschutzfenstern bei Gebäuden im Einflussbereich von ortsfesten Anlagen. Es kann daher unter Verweis auf die Botschaft zum USG⁸³ davon ausgegangen werden, dass AW für Strassen, Flughäfen und Eisenbahnen unerlässlich sind.

⁸² Vgl. Urteile des BGer 1C_601/2018, BGE 130 II 32

⁸³ Botschaft zum Umweltschutzgesetz, BBl 1979 III 749

Tabelle 5: Oben: Beurteilungspegel L_r für die PW, IGW und AW beim Strassenlärm (SL), Eisenbahnlärm (EL) und Fluglärm (FL); unten: Differenzen zwischen IGW und PW sowie AW und IGW sowie Differenzen zwischen Tag und Nacht. Alle Angaben sind in dB. Gelb hinterlegt sind diejenigen Differenzen, welche vom 5-dB-Prinzip zwischen PW, IGW und AW resp. dem 10-dB-Prinzip zwischen Tag und Nacht abweichen.

ES	Tag ^a								
	PW			IGW			AW		
	SL	EL	FL	SL	EL	FL	SL	EL	FL
I	50	50	53	55	55	55	65	65	60
II	55	55	57	60	60	60	70	70	65
III	60	60	60	65	65	65	70	70	70
IV	65	65	65	70	70	70	75	75	75

ES	Nacht ^b														
	PW					IGW					AW				
	SL	EL	FL1	FL2	FL3	SL	EL	FL1	FL2	FL3	SL	EL	FL1	FL2	FL3
I	40	40	43	43	43	45	45	45	45	45	60	60	55	55	55
II	45	45	50	47	47	50	50	55	50	50	65	65	65	60	60
III	50	50	50	50	50	55	55	55	55	55	65	65	65	65	65
IV	55	55	55	55	55	60	60	60	60	60	70	70	70	70	70

ES	IGW - PW									AW - IGW								
	Tag ^a			Nacht ^b						Tag ^a			Nacht ^b					
	SL	EL	FL	SL	EL	FL1	FL2	FL3	SL	EL	FL	SL	EL	FL1	FL2	FL3		
I	5	5	2	5	5	2	2	2	10	10	5	15	15	10	10	10		
II	5	5	3	5	5	3	3	3	10	10	5	15	15	10	10	10		
III	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10		
IV	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10		

ES	Tag - Nacht														
	PW					IGW					AW				
	SL	EL	FL1	FL2	FL3	SL	EL	FL1	FL2	FL3	SL	EL	FL1	FL2	FL3
I	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5
II	10	10	7	10	10	10	10	5	10	10	5	5	0	5	5
III	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5
IV	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5

Legende:

^a 06–22 Uhr

^b SL & EL: 22–06 Uhr, FL1: 22–23 Uhr, FL2: 23–00, FL3: 05–06 Uhr

4.6.2 Erwägungen

IGW und PW

IGW und PW müssen von Gesetzes wegen festgelegt und deshalb beibehalten werden. Die PW liegen ausser beim Fluglärm um 5 dB tiefer als die IGW. Dem liegt die Idee zugrunde, dass auch bei einer ggf. späteren Lärmzunahme oder bei der späteren Realisierung weiterer (gleichartiger) Anlagen keine übermässigen Immissionen entstehen können. Eine Differenz von 5 dB soll sicherstellen, dass Immissionen von bis zu zwei weiteren gleichartigen Anlagen in der Höhe der PW noch keine Überschreitung der IGW bewirken. Für Fluglärm wurden die PW aus raumplanerischen Gründen nur 2 dB (ES I) und 3 dB (ES II) unterhalb der IGW festgelegt (vgl. Tabelle 5). Diese geringere Differenz als 5 dB zwischen IGW und PW stellt einen Kompromiss zwischen den Schutzinteressen der Bevölkerung und den Ansprüchen der Siedlungsentwicklung dar.⁸⁴

⁸⁴ Erläuternder Bericht vom 11. April 2001 zur Änderung der LSV

AW

Der primäre Zweck der AW ist heutzutage obsolet, da für Strassen, Eisenbahnen und Flugplätze die Sanierungsfristen abgelaufen sind und die noch ausstehenden Sanierungsarbeiten mit anderen Instrumenten geplant und priorisiert werden. Es verbleiben aber noch die zwei anderen Funktionen (Obergrenze für Erleichterungen bei Sanierungen und Schwelle für Schallschutzmassnahmen), welche auch heute noch ihren Zweck erfüllen. Deshalb sollte am AW festgehalten werden.

Die Differenz zwischen IGW und AW liegt bei den drei Verkehrslärmarten in der LSV zurzeit zwischen 5 und 15 dB und ist abhängig von der Verkehrslärmart, der ES sowie den Belastungsgrenzwerten für den Tag und die Nacht (vgl. dazu Tabelle 5). Eine auf gesundheitlichen Schutzkriterien basierende Begründung für diese unterschiedlichen AW-Festlegungen lässt sich nicht finden.

4.6.3 Schlussfolgerungen

Die IGW sind unerlässlich und müssen beibehalten werden. Im Sinne eines vorausschauenden und nachhaltigen Lärmschutzes sind PW ebenfalls beizubehalten. Obwohl es sich bei Art. 19 USG zur Festlegung von AW um eine Kann-Vorschrift handelt, deren wichtigster Zweck sich mittlerweile erfüllt hat, sind die AW wegen ihrer zusätzlichen Funktionen ebenfalls beizubehalten.

4.7 Grenzwertschema

4.7.1 Bisherige Regelung

Als *Grenzwertschema* wird das Raster für Grenzwerte bezeichnet, welches sich pro Lärmart aus den Differenzierungen nach Zeitperioden, nach ES und nach Grenzwertarten (IGW, PW, AW) ergibt (vgl. Art. 2 Abs. 5 LSV). Im gegenwärtig in der LSV definierten Grenzwertschema greifen die bisher in den Kapiteln 4.4 bis 4.6 diskutierten Lärmbeurteilungsprinzipien ineinander. Die darin aufgeführten Belastungsgrenzwerte werden als Beurteilungspegel L_r angegeben und sind:

- (a) getrennt nach Tag- oder Nachtperiode, mit einem Tag von 06–22 Uhr und einer Nacht von 22–06 Uhr (mit Ausnahmen beim Fluglärm),
- (b) abgestuft nach vier verschiedenen ES (ES I, ES II, ES III, ES IV), und
- (c) unterteilt in AW, IGW und PW.

Die Beurteilung der Lärmbelastung erfolgt anhand des Beurteilungspegels L_r , welcher mit dem massgeblichen Belastungsgrenzwert verglichen wird. Der Beurteilungspegel L_r wird mittels Messung oder Berechnung und der Anwendung von Pegelkorrekturen

K (vgl. Kapitel 4.9) ermittelt. Allen drei Verkehrslärmarten gemeinsam ist ein IGW für die Tagperiode in der ES II von 60 dB als Ankerwert, von welchem aus die anderen Belastungsgrenzwerte festgelegt werden (vgl. Tabelle 5). Begründungen für die um 10 dB niedrigeren Grenzwerte in der Nachtperiode wurden in Kapitel 4.4.1 diskutiert. Der prinzipielle Aufbau des Grenzwertschemas in der LSV ist in Tabelle 6 am Beispiel des Strassenlärms dargestellt (bei anderen Lärmarten weicht das Grenzwertschema nur geringfügig von diesem Aufbau ab).

Tabelle 6: Prinzipieller Aufbau des Grenzwertschemas in der LSV mit Belastungsgrenzwerten als Beurteilungspegel (L_r), am Beispiel Strassenlärm

ES	Tag, 06–22 Uhr			Nacht, 22–06 Uhr		
	PW	IGW	AW	PW	IGW	AW
I	50	55	65	40	45	60
II	55	60	70	45	50	65
III	60	65	70	50	55	65
IV	65	70	75	55	60	70

4.7.2 Erwägungen

Die in der LSV verwendeten Belastungsgrenzwerte, welche bei allen drei Verkehrslärmarten in den meisten Fällen gleich sind, erwecken den Anschein einer identischen Beurteilung (bzw. einer identischen Schallbelastung) obwohl die verschiedenen Lärmarten wegen ihrer unterschiedlichen Charakteristiken bei gleichem L_{Aeq} unterschiedlich stark stören oder belästigen. Die unterschiedlichen Wirkungen werden, wie im Kapitel 4.9.1 ausgeführt wird, mittels Pegelkorrekturen (K) berücksichtigt. Dieses Vorgehen führt dazu, dass das Werturteil über die zu begrenzende Wirkung einer bestimmten Lärmart nicht nur in den Belastungsgrenzwerten direkt, sondern auch in den entsprechenden Pegelkorrekturen zum Ausdruck kommt. Angesichts der mathematischen Ausdrücke, die für viele K-Werte in den Anhängen 3, 4 und 5 der LSV verwendet werden, ist die Lärmbeurteilung damit für Nichtfachleute nicht ohne weiteres nachvollziehbar. Es wäre daher prüfenswert, ob ein System, in welchem für jede Lärmart individuelle, d.h. also unterschiedliche Grenzwerte vorgesehen sind, dem bisherigen Grenzwertschema vorzuziehen wäre. Ein solches System hätte den Vorteil, dass anhand der Höhe der Belastungsgrenzwerte direkt abgelesen werden kann, inwiefern sich die drei Verkehrslärmarten in ihrer Wirkung unterscheiden. Der Nachteil bestünde darin, dass im Vollzugsalltag bei der Lärmbeurteilung jeweils unterschiedliche, von der Lärmart abhängige Belastungsgrenzwerte herangezogen werden müssten.

4.7.3 Schlussfolgerungen

Die Kommission schlägt vor, am bisherigen Konzept weitgehend festzuhalten, d.h. die IGW bei allen Lärmarten auf einem einheitlichen vorgegebenen Wert zu fixieren und den zugehörigen Beurteilungspegel mittels Pegelkorrekturen zu bestimmen. Im resultierenden Grenzwertschema (vgl. nachfolgende Tabelle 7) unterscheiden sich die Belastungsgrenzwerte nach ES und nach Tag- resp. Nachtperiode. Als zentraler Wert fungiert der IGW der ES II mit 60 dB für die Tagperiode und 50 dB für die Nachtperiode. Zwischen Tag und Nacht besteht somit eine (konstante) Differenz von 10 dB. Die IGW für die ES II und ES III werden jedoch gemäss Empfehlung der Kommission gleichgesetzt (vgl. Kapitel 4.5.3). Die Differenzen zwischen ES I und ES II/III sollten in der Regel 5 dB, zwischen ES II/III und ES IV 10 dB betragen. Die IGW sind als Beurteilungspegel L_r zu verstehen. Zur Bildung der Beurteilungspegel sind Pegelkorrekturen K nötig, welche in Kapitel 4.9 erörtert werden.

Tabelle 7 Empfohlenes Grenzwertschema für den Immissionsgrenzwert IGW als Beurteilungspegel $L_{r,Tag}$ und $L_{r,Nacht}$.

ES	$L_{r,Tag}$ (über 15 oder 24 Stunden)	$L_{r,Nacht}$ (über 9 Stunden)
I	55	45
II	60	50
III		
IV	70	60

4.8 Festlegung der Lärmart-bezogenen Grenzwerte

4.8.1 Belastungsmasse für die Tag- und Nachtperiode

Tagperiode

Zur Beurteilung der Tagperiode kann entweder der L_{den} , bei welchem die Tagesstunden von 07–19 Uhr, die Abendstunden von 19–22 Uhr und die Nachtstunden von 22–07 Uhr aufgeteilt und mit den entsprechenden Beaufschlagungen (+0 dB, +5 dB, +10 dB) versehen sind (diese Version des L_{den} wird im Folgenden mit $L_{den,07-19-22-07h}$ bezeichnet), oder ein über die 15 Tagesstunden gemittelter L_{Aeq} (nachfolgend als $L_{day,07-22h}$ bezeichnet) zum Einsatz kommen.

Grundsätzlich würden beide oben dargelegten Beurteilungsvarianten für die Tagperiode den Schutzzweck gleichermassen gut erfüllen. Jede der beiden Varianten hat Vor- und Nachteile. So ist die Variante mit dem $L_{den,07-19-22-07h}$ als Belastungsmass (Variante 1) im Vollzug unbekannt und würde bei den Vollzugsstellen einen nicht unerheblichen Initialaufwand bei der Belastungsermittlung generieren, wohingegen die Variante mit dem $L_{day,07-22h}$ (Variante 2) heute in der Praxis (mit Ausnahme des abweichenden Zeitbezugs) etabliert ist. Auf der anderen Seite ist Variante 2 bei der in diesem Bericht vorzunehmenden Grenzwertsetzung aber nur mit einer mit gewissen Unsicherheiten behafteten Konversion zwischen dem L_{den} und dem $L_{day,07-22h}$ realisierbar (vgl. Anhang A.3.8). Diese Konversion entfielen bei der Variante 1 mit dem L_{den} weitgehend (aber im Prinzip nicht ganz, s.u.), denn die generischen Grenzwerte für die Tagperiode (vgl. Tabelle 4) beziehen sich ja bereits auf das Belastungsmass L_{den} . Aus wissenschaftlicher Sicht bestehen leichte Vorteile für die Variante 1 mit dem $L_{den,07-19-22-07h}$. Dabei sollte aber berücksichtigt werden, dass die meisten Belastungsmasse hoch miteinander korreliert sind [12] und somit der allenfalls geringe Gewinn eines Wechsels auf das Belastungsmass $L_{den,07-19-22-07h}$ in Variante 1 dem zu erwartenden Aufwand (Umstellung eingeschliffener Praktiken, Anpassung von Regularien, Neuberechnung der Lärmbelastung etc.) gegenübergestellt werden muss.

Nachtperiode

Zur Beurteilung der Nachtperiode ist der L_{Aeq} über die empfohlene Beurteilungszeit von 22–07 Uhr (vgl. Kapitel 4.4.3) geeignet. Beim Strassen- und Eisenbahnlärm sind dies die 9 Stunden von 22–07 Uhr ($L_{night,22-07h}$). Beim Fluglärm wird empfohlen, die bisherige Einzelstundenbetrachtung in der Nacht beizubehalten und eine zusätzliche Beurteilung in Form einer weiteren Einzelstunde von 06–07 Uhr vorzusehen (siehe Kapitel 4.8.3).

4.8.2 Grenzwerte in den Belastungsmassen $L_{den,07-19-22-07h}$, $L_{day,07-22h}$ und $L_{night,22-07h}$

Im vorhergehenden Kapitel werden verschiedene Belastungsmasse zur Implementierung in ein Grenzwertschema vorgeschlagen ($L_{den,07-19-22-07h}$, $L_{day,07-22h}$ und $L_{night,22-07h}$). Diese Belastungsmasse weichen mehr oder weniger von den Belastungsmassen der generischen Grenzwerte in Tabelle 4 ab: Während die generischen Grenzwerte im Belastungsmass L_{den} (mit den in den zur Ermittlung des generischen L_{den} -Grenzwerts beigezogenen Grundlagenstudien mehrheitlich angewendeten Zeitfenstern 07–19, 19–23, und 23–07 Uhr) ausgewiesen sind, empfiehlt die Kommission die Verwendung einer leicht abgeänderten Version des L_{den} , in welcher der Abendzeitraum nur 3 Stunden dauert, der Nachtzeitraum aber 9, bzw. einen L_{day} , der zwischen 07 und 22 Uhr, also über 15 Stunden ermittelt wird. Für die Nachtperiode wird ein L_{night} über 9 Stunden

von 22–07 Uhr vorgeschlagen, statt über den den meisten Studien zu Nachtlärmwirkungen zugrunde liegenden Zeitraum 23–07 Uhr. Um also approximativ vom generischen Grenzwert als L_{den} auf einen Grenzwert in $L_{den,07-19-22-07h}$ bzw. $L_{day,07-22h}$, und vom generischen Grenzwert als L_{night} auf den entsprechenden Grenzwert im Belastungsmass $L_{night,22-07h}$ schliessen zu können, muss bestimmt werden, inwiefern diese unterschiedlichen Masse voneinander im Mittel (und für die Schweiz repräsentativ) abweichen. Entsprechend berechnete Konversionsterme sind im Anhang in Tabelle A.T.6 basierend auf Belastungsdaten des Stichprobenrahmens der SiRENE-Befragung aufgelistet. Diese Terme wurden benutzt, um die massgeblichen Lärmart-bezogenen Grenzwerte in den untenstehenden Tabellen 8 und 9 zu berechnen. Die Konversions-Ergebnisse wurden jeweils mathematisch auf 1 dB gerundet.

Tabelle 8 Lärmart-bezogene Grenzwerte der Tagperiode (IGW ES II/III), in den Belastungsmassen L_{den} , $L_{den,07-19-22-07h}$ und $L_{day,07-22h}$ in dB(A)

Lärmart:	L_{den}^*	$L_{den,07-19-22-07h}$	$L_{day,07-22h}$
Strassenlärm	62	62	60
Eisenbahnlärm	65	65	59
Fluglärm	55	55	54

* generischer Grenzwert gemäss Tabelle 4

Tabelle 9 Lärmart-bezogene Grenzwerte der Nachtperiode (IGW ES II/III), in den Belastungsmassen L_{night} und $L_{night,22-07h}$ in dB(A)

Lärmart:	L_{night}^*	$L_{night,22-07h}$
Strassenlärm	52	52
Eisenbahnlärm	56	56
Fluglärm	43	45

* generischer Grenzwert gemäss Tabelle 4

4.8.3 Einzelstunden-Grenzwerte für Fluglärm in der Nacht

Die nachfolgend vorgeschlagene Beurteilung des Fluglärms während der Nachtperiode weicht von der Art und Weise der Beurteilung des Strassen- und Eisenbahnlärms ab. Grund dafür ist nebst dem Ziel, Aufwachreaktionen zu begrenzen (vgl. Kapitel 4.4.1) das landesweite Nachtflugverbot (Art. 39 VIL). Da in der Kernnacht (00–05 Uhr) in der Schweiz Starts und Landungen untersagt sind, ergibt es keinen Sinn, für diesen Zeitraum einen Fluglärm-Grenzwert zu erlassen. Deshalb wird eine Beurteilung mit einzelnen 1-Stunden-Grenzwerten in den Randstunden der Nacht empfohlen. Da die

Nachtperiode neu jedoch 9 Stunden dauern soll, resultieren *vier* anstatt der heute gebräuchlichen drei Einzelstundengrenzwerte, nämlich Grenzwerte für die Stunden von 22–23, 23–00, 05–06 und 06–07 Uhr.

Als Ausgangsgrösse für die Bemessung der Höhe dieser vier Einzelstundengrenzwerte diente der Lärmart-bezogene Nachtgrenzwert über 9 Stunden von 45 dB gemäss Tabelle 9. Wenn man die Schallenergie des $L_{\text{night},22-07\text{h}}$ (also 45 dB über 9 Stunden) auf die vier Stunden mit möglichem Flugbetrieb (22–23, 23–00, 05–06, 06–07 Uhr) konzentriert, so ergibt sich für diese 4 Stunden ein Mittelungspegel von 48.5 dB. Diesen Pegel gälte es in diesen 4 Stunden eigentlich einzuhalten, um den Lärmart-bezogenen Grenzwert nicht zu überschreiten. Da jedoch durch den langen lärmfreien Zeitraum von (mindestens) 5 Stunden⁸⁵ in der Kernnacht eine Möglichkeit der Kompensation von Lärmstörungen⁸⁶ besteht, die beim Strassen- oder Eisenbahnlärm nicht bzw. nicht in demselben Ausmass gegeben ist, ist es vertretbar, dass der Wert von 48.5 dB (im Mittel über die vier Einzelstunden) auch überschritten werden kann. Allerdings darf diese Kompensation nicht allzu gross ausfallen, denn es kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass die für die Ermittlung des Lärmart-bezogenen Grenzwerts von 45 dB herangezogenen empirischen Studien und Meta-Analysen [14, 24, 30, 66] mehrheitlich auf Fluglärmbelastungen basieren, bei denen in den Kernstunden der Nacht die Belastung ebenfalls erheblich niedriger gewesen sein dürfte als während der Nachtrandstunden, und somit der beschriebene Kompensationseffekt im generischen und im Lärmart-bezogenen Grenzwert zumindest teilweise schon berücksichtigt ist. Der Kompensationseffekt dürfte deshalb höchstens wenige Dezibel oberhalb der Marke von 48.5 dB (Mittelwert über 4 Stunden) ausgeschöpft sein. Da es nicht möglich ist, anhand empirischer Daten diesen Kompensationseffekt exakt zu beziffern, war die Kommission gezwungen, eine Setzung vorzunehmen: Sie beschloss, den Kompensationseffekt mit max. 2.5 dB zu bewerten, was (vereinfacht ausgedrückt) darin resultiert, dass der Mittelungspegel über die 4 Stunden mit Fluglärm den Wert von 51 dB nicht überschreiten sollte.

In der Folge war zu klären, wie die Grenzwerte in den vier zu beurteilenden Stunden (22–23, 23–24, 05–06, 06–07 Uhr) im Einzelnen festgelegt werden können, sodass sie zum einen das oben genannte Kriterium von 51 dB als Mittelwert über 4 Nachtstunden mit Flugbetrieb energetisch einhalten und zum anderen die Unterschiede der Empfindlichkeit gegenüber Fluglärm in diesen vier Einzelstunden angemessen reflektieren. Dazu wurden folgende Überlegungen gemacht:

⁸⁵ Die zurzeit gemäss den Betriebsreglementen der Flughäfen Zürich und Genf tatsächlich fluglärmfreien Zeitfenster sind länger als das durch die VIL vorgegebene Minimum von 5 Stunden (Genf: 00:00–06:00 Uhr, Zürich: 23:30–06:00 Uhr)

⁸⁶ Argumentation der vom UVEK eingesetzten Arbeitsgruppe «Fluglärm-Belastungsgrenzwerte und raumplanerische Flexibilisierung» [81]

- Es ist sinnvoll, für die zweite (23–00 Uhr) und dritte (05–06 Uhr) Nachtstunde einen tieferen Grenzwert anzusetzen als für die an die Tagperiode angrenzenden Stunden (22–23 und 06–07 Uhr). Dies, weil in der Nacht grundsätzlich der Schlaf geschützt werden soll und in der ersten und letzten Nachtstunde die Schlafdichte der Bevölkerung bereits reduziert ist (vgl. Abbildung A.A.2 im Anhang A.3.1).
- Dass die erste (22–23 Uhr) und letzte (06–07 Uhr) Nachtstunde praktisch identische tageszeitabhängige Lärmempfindlichkeitswerte gemäss Abbildung A.A.5 (siehe Anhang A.3.2) aufweisen, ist so zu interpretieren, dass für diese beiden Stunden gleich hohe Grenzwerte eingesetzt werden können.
- Aufgrund der Tatsache, dass der schlafende Anteil der Bevölkerung von allen vier in Diskussion stehenden Stunden in der Stunde zwischen 05 und 06 Uhr am höchsten ist und lärminduzierte Aufwachreaktionen in den frühen Morgenstunden aus Gesundheitssicht so weit wie möglich vermieden werden sollten [82], wird die Stunde zwischen 05 und 06 Uhr mit einem niedrigeren Grenzwert belegt als die erste und letzte Nachtstunde.
- Um die Einschlafperiode möglichst wenig mit Fluglärm zu belasten, ist es ebenfalls zweckmässig, die zweite Nachtstunde (23–24 Uhr) mit demselben Grenzwert zu belegen wie die dritte Nachtstunde (05–06 Uhr).

Aufgrund obiger Überlegungen werden die in Tabelle 10 aufgeführten Einzelstunden-Immissionsgrenzwerte für Fluglärm (ES II und ES III) empfohlen.

Tabelle 10 **Empfohlene IGW (ES II/III) für Fluglärm in der Nachtperiode, in dB(A)**

$L_{Aeq,22-23h}$	$L_{Aeq,23-24h}$	$L_{Aeq,05-06h}$	$L_{Aeq,06-07h}$
52	49	49	52

Die Werte gemäss Tabelle 10 ergeben einen energetischen Mittelwert von 50.8 dB. Über eine Zeitperiode von 9 Stunden, von denen in 5 Stunden der Kernnacht von 00–05 Uhr ein Verbot für gewerbsmässige Flüge besteht, ergeben die Werte einen mittleren L_{Aeq} von 47.2 dB. Dieser Wert liegt um 2.2 dB höher als der Lärmart-bezogene $L_{night,22-07h}$ -Grenzwert von 45 dB. Die vorgeschlagenen Werte halten damit das per Setzung eingeführte Kriterium eines maximalen Kompensations-Effekts von 2.5 dB ein.

4.9 Beurteilungspegel und Pegelkorrekturen

4.9.1 Bisherige Regelung

Bei der Ermittlung der massgeblichen Verkehrslärmbelastung gemäss LSV dienen variable Pegelkorrekturen dazu, den Mittelungspegel L_{Aeq} zu einem Beurteilungspegel L_r zu ergänzen, sodass spezielle Charakteristika des Lärms bzw. der beurteilten Lärmart «störungsgerechter» resp. «wirkungsgerechter» abgebildet werden können. Es gibt in der LSV im Bereich der Beurteilung von Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm zurzeit drei Arten von Pegelkorrekturen:⁸⁷

Die erste Art von Pegelkorrektur betrifft die Lärmart selbst (Strassen-, Eisenbahn- oder Fluglärm). Sie berücksichtigt den Umstand, dass unterschiedliche Lärmarten bei demselben Mittelungspegel unterschiedlich stark ausgeprägte Wirkungen zeigen. Solche Pegelkorrekturen, in diesem speziellen Fall auch «Normierungskorrekturen» genannt, dienen dem Zweck, den Beurteilungspegel einer bestimmten Lärmart so zu justieren, dass bei allen Lärmarten gleich hohe Belastungsgrenzwerte verwendet werden können (siehe dazu auch Kapitel 4.7).

Die zweite Art von Pegelkorrektur berücksichtigt die Wirkung von unterschiedlichen Verkehrsmengen (Anzahl Fahr-/Flugzeuge oder Züge pro Stunde). Die derzeitige Regelung in der LSV sieht solche von der Verkehrsmenge abhängigen Pegelkorrekturen beim Strassen-, Eisenbahn- und beim Fluglärm der Kleinaviatik vor.

Die dritte Art von Pegelkorrektur berücksichtigt besonders stark störende Geräusch-Eigenschaften, die im L_{Aeq} nicht wirkungsgerecht abgebildet werden können. Beispiele dafür sind die Pegelkorrekturen beim Eisenbahn- bzw. Strassenlärm, welche die spezielle Störwirkung von Rangierlärm bei Eisenbahnen oder von Kurvenkreischen beim Schienenlärm auf Strassen berücksichtigen.

Die vorgängig aufgeführten Pegelkorrekturen sind in den LSV-Anhängen 3 für Strassenverkehrslärm, 4 für Eisenbahnlärm und 5 für den Lärm ziviler Flugplätze wie folgt umgesetzt:

Strassenlärm

Die seinerzeitige Kommission legte fest, dass die durch den IGW in der ES II tags zu begrenzende Wirkung für alle Lärmarten bei demjenigen Mittelungspegel (L_{Aeq}) zu fixieren sei, wo sich 25% der Wohnbevölkerung stark belästigt fühlten. Beim Strassenlärm während der Tagperiode entsprach dies einem L_{Aeq} von 60 dB. Dieser Wert wurde zum einheitlichen Grenzwert für den IGW in der ES II. Konsequenterweise gibt es

⁸⁷ Bei anderen Lärmarten in der LSV kommen weitere Pegelkorrekturen zum Tragen, die aber in diesem Bericht nicht behandelt werden. (Um Missverständnissen vorzubeugen: Die Pegelkorrekturen K1, K2, und K3 in der LSV entsprechen *nicht* der ersten, zweiten, und dritten Art von Pegelkorrektur)

deshalb für Strassenlärm keine Normierungskorrektur (Pegelkorrektur erster Art) in der LSV, und der Beurteilungspegel L_r für Strassenlärm entspricht im Wesentlichen dem L_{Aeq} für die entsprechende Zeitperiode (Tag oder Nacht). Bei weniger als durchschnittlich 100 Fahrzeugen pro Stunde bzw. unterhalb von 1600 Fahrzeugen am Tag resp. 800 in der Nacht gilt jedoch eine von der Verkehrsmenge abhängige Pegelkorrektur zweiter Art, die zwischen -5 und 0 dB beträgt (vgl. dazu Anhang 3 Ziff. 35 LSV). Der Ursprung bzw. die seinerzeitige empirische Begründung dieser Korrektur konnte von der Kommission nicht eruiert werden. Daneben gibt es eine weitere Pegelkorrektur (dritter Art), welche das Kurvenkreischen bei Schienenfahrzeugen auf Strassen⁸⁸ berücksichtigt (vgl. Anhang 3 Ziff. 35 Abs. 2 LSV).

Eisenbahnlärm

Die Belastungsgrenzwerte für Eisenbahnlärm wurden in 1970er- und 1980er-Jahren praktisch gleichzeitig mit denjenigen des Strassenlärms entwickelt. Dabei ergab sich zwischen diesen zwei Lärmarten eine Differenz beim Prozentsatz der stark Belästigten, die einer Pegeldifferenz von ca. 5 dB entsprach, mit weniger Belästigten beim Eisenbahnlärm (d.h. Eisenbahnlärm war beim selben Pegel weniger belästigend als Strassenlärm). Die Mittelungspegel (L_{Aeq}) für Eisenbahnlärm werden in der LSV deshalb ausnahmslos mit einer minimalen Pegelkorrektur von -5 dB⁸⁹ korrigiert (Pegelkorrektur erster Art).⁹⁰ Diese Korrektur basiert hauptsächlich auf der Lärmart und wurde bis anhin durch die Vorhersehbarkeit der Ereignisse (wegen des zumeist fixen Fahrplans der Züge), durch die teilweise langen Pausen zwischen den Ereignissen und durch die zeitliche Begrenztheit des Auftretens des Lärms begründet [83]. Die Beurteilungspegel für den Tag- und Nachtzeitraum werden zudem in Abhängigkeit der Anzahl Zugvorbeifahrten im jeweiligen Zeitraum weiter vermindert. Weil in der LSV die Nachtperiode nur 8 Stunden umfasst, die Tagperiode aber 16, ist die Pegelkorrektur nachts bei gleicher Zugfrequenz (durchschnittliche Anzahl Züge pro Stunde) noch ausgeprägter als am Tag (d.h. sie fällt «negativer» aus; die Beurteilung ist in der Nacht weniger streng). Eine Begründung dafür gibt es nicht. Diese Pegelkorrektur (zweiter Art) wird schliesslich mit der ersten kombiniert, indem sie bei -5 dB beginnt und bis maximal -15 dB betragen kann (vgl. Anhang 4 Ziff. 33 Abs. 1 LSV). Zudem gibt es eine Pegelkorrektur dritter Art, diesmal jedoch mit positivem Vorzeichen (d.h. die Beurteilung wird strenger), welche die spezielle Störwirkung von Rangierlärm (vgl. Anhang 4 Ziff. 33 Abs. 2 LSV) berücksichtigt.

⁸⁸ Lärm von Schienenfahrzeugen auf Strassen (z.B. Trams) wird in der LSV dem Strassenlärm zugerechnet

⁸⁹ Die Pegelkorrektur von -5 dB bedeutet, dass vom tatsächlich gemessenen oder berechneten Mittelungspegel (L_{Aeq}) 5 dB abgezogen werden

⁹⁰ Diese Pegelkorrektur wird oft auch als «Schienenbonus» bezeichnet.

Fluglärm

Die LSV enthält Belastungsgrenzwerte für den Lärm des Verkehrs von Kleinluftfahrzeugen, für den Lärm des Gesamtverkehrs von Kleinluftfahr- und Grossflugzeugen und für den Lärm des Verkehrs von zivilen Flugplätzen, auf denen ausschliesslich Helikopter verkehren (Helikopterflugplätze). Mit Ausnahme der Helikopterflugplätze, wo als Beurteilungsgrösse der mittlere A-bewertete Maximalpegel zur Anwendung kommt, gilt als Belastungsmass der L_{Aeq} . Eine Pegelkorrektur erster Art kommt nicht zur Anwendung. Vorgesehen ist dagegen eine Pegelkorrektur zweiter Art bei der Ermittlung des Lärms von Kleinluftfahrzeugen, welche auf eine Studie zur Belästigungswirkung des Lärms solcher Kleinluftfahrzeuge zurückgeht [84]. Die Korrektur hängt von der jährlichen Anzahl Bewegungen ab und wird zum L_{Aeq} hinzuaddiert, d.h. je höher die Bewegungszahl, umso höher wird die Korrektur. Bei weniger als 15 000 Bewegungen pro Jahr entfällt die Korrektur.

Beim zivilen Fluglärm von Flughäfen mit Grossflugzeugen entspricht der Beurteilungspegel im Wesentlichen dem A-bewerteten Mittelungspegel (L_{Aeq}) des Betriebs von Grossflugzeugen sowie Kleinluftfahrzeugen, beaufschlagt mit der oben beschriebenen verkehrsmengenabhängigen Pegelkorrektur, welche nur beim Teilbeurteilungspegel der Kleinluftfahrzeuge zur Anwendung kommt und bei den drei Schweizer Landesflughäfen wegen der Dominanz der Grossflugzeuge vernachlässigbar ist.

4.9.2 Erwägungen

Pegelkorrekturen zweiter und dritter Art dienen dazu, spezifische nicht-energetische Charakteristika einer Lärmart im Beurteilungspegel zu berücksichtigen. Ob und welche Korrekturen notwendig sind, sollte deshalb anhand von gezielten Untersuchungen zur Belästigungs- oder Störwirkung geprüft werden. Deren Erkenntnisse werden nachfolgend geschildert.

Strassenlärm

Da der L_{Aeq} allenfalls nicht alle störenden oder belästigenden Charakteristiken des Strassenlärms abbildet, wurde von der Kommission untersucht, in welchen Bereichen Korrekturen des L_{Aeq} angezeigt sind und wie hoch diese Korrekturen ausfallen müssten. Die im Rahmen der SiRENE-Studie durchgeführte Befragung der Schweizer Bevölkerung beispielsweise hat gezeigt, dass kontinuierlicher Strassenlärm bei gleichem Pegel belästigender ist als Strassenlärm mit ausgeprägten Einzelereignissen (d.h. Lärmbelastungssituationen mit hoher Intermitenz) [85]. Dies würde tendenziell eine negative Pegelkorrektur bei geringer Verkehrsdichte rechtfertigen. Beim Endpunkt Herzinfarkt zeigte sich allerdings ein etwas weniger eindeutiges Bild des vom L_{Aeq} unabhängigen Einflusses der Bewegungszahl bzw. der Intermitenz [30], sodass für die Festlegung einer von der Bewegungszahl abhängigen Pegelkorrektur, die sich auf alle

Wirkungen bezieht, noch weitere Abklärungen notwendig wären. Für die Endpunkte Belästigung und Schlafstörung scheint eine solche Korrektur indes angemessen. Gemäss der Auswertung in Anhang A.3.5 könnte der Beurteilungspegel bei geringen Verkehrsdichten (weniger als 32 Fahrzeuge pro Stunde) mit einer Pegelkorrektur zweiter Art von ca. -5 dB versehen werden.

Offen ist zurzeit die Frage, ob für Streckenabschnitte mit geringer Geschwindigkeit (Tempo 30-Zonen) eine (negative) Pegelkorrektur zulässig wäre, etwa weil durch die bei niedriger Geschwindigkeit weniger steilen Pegelflanken auch das Belästigungspotential oder die Wahrscheinlichkeit von Aufwachreaktionen geringer wäre. Entsprechende empirische Untersuchungen liegen zurzeit jedoch noch nicht vor.

Eisenbahnlärm

Aktuelle Schweizer Untersuchungen zur Belästigung [13] und zu selbstberichteten lärminduzierten Schlafstörungen [14] durch Eisenbahnlärm zeigen, dass die in der LSV implementierte stark negative Pegelkorrektur beim Eisenbahnlärm, zumindest was die genannten Wirkungen betrifft, nicht gerechtfertigt ist. Dies legen die Auswertungen im Anhang A.3.5 bzw. Abbildung A.A.11 nahe. Es kann vermutet werden, dass dafür betrieblich-akustische Veränderungen im Schienenverkehr verantwortlich sind, namentlich die Zunahme der Verkehrsdichte und die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeiten. Erhöhen sich die Fahrgeschwindigkeiten, lässt dies bei Zugvorbeifahrten die Pegel rascher ansteigen und wieder abklingen. Die Flanken im Pegel-Zeit-Verlauf werden dadurch steiler. Feld- und Laborstudien zeigen nun, dass gerade beim Eisenbahnlärm die steileren Pegelflanken in Zusammenhang mit der Störung des Schlafes gebracht werden können, welche sich in einer erhöhten Aufwach- bzw. Reaktionswahrscheinlichkeit auf Zuggeräusche äussert [86-89]. Die gesonderten Auswertungen im Anhang A.3.5 zeigen keinen nennenswerten modifizierenden Einfluss der Anzahl Zugereignisse auf die Expositions-Wirkungsbeziehungen hinsichtlich Belästigung oder selbstberichteter Schlafstörung für Eisenbahnlärm. Es lässt sich vorsichtig folgern, dass zumindest, was die Endpunkte «Belästigung» und «Schlafstörung» betrifft, die Bewegungszahl-abhängige Pegelkorrektur der aktuellen LSV nicht gerechtfertigt ist.

Fluglärm

Eine von der Kommission vor einigen Jahren initiierte Studie zur Untersuchung der Ursachen des Trends zunehmender Belästigung bei gleichem Pegel beim Fluglärm von Grossflugzeugen («Projekt $L_{eq}+X$ », [90]) zeigte einen Effekt der Bewegungszahl auf die Belästigung, der über den rein energetisch erklärbaren Effekt hinausging, wobei der grösste Anteil der Varianz der Belästigung nach wie vor durch den L_{Aeq} erklärt wurde. Die Resultate dieser Studie sind jedoch eher schwierig interpretierbar bzw. zu uneinheitlich, um daraus eine von der Bewegungszahl abhängige Pegelkorrektur für Fluglärm von Grossflugzeugen schlüssig ableiten zu können.

4.9.3 Schlussfolgerungen

In Kapitel 4.7.3 wurde empfohlen, den IGW in den Zonen der ES II und ES III während des Tages auf 60 dB und während der Nacht auf 50 dB einheitlich zu fixieren. Wird für alle Verkehrslärmarten ein einheitlicher IGW festgelegt, so müssen für alle Lärmarten separate Lärmart-bezogene Normierungskorrekturen (d.h. Pegelkorrekturen erster Art) eingeführt werden, welche die unterschiedlich starke Wirkung der jeweiligen Lärmart auf Höhe des vereinheitlichten IGW berücksichtigen. Bei einer Setzung des IGW bei 60 dB tags und 50 dB nachts ergeben sich zwecks Normierung der in Tabellen 8 und 9 dargestellten Lärmart-bezogenen Grenzwerte die in Tabelle 11 dargestellten Normierungskorrekturen K.

Tabelle 11: Normierungskorrekturen K [in dB] für die empfohlenen Belastungsmasse

Lärmart	Normierungskorrekturen K [dB]		
	$L_{den,07-19-22-07h}$	$L_{day,07-22h}$	$L_{night,22-07h}$
Strassenlärm	-2	0	-2
Eisenbahnlärm	-5	+1	-6
Fluglärm	+5	+6	(+5)*

* Da beim Fluglärm gemäss Empfehlung der Kommission vier Einzelstunden beurteilt werden, nicht aber die Nachtperiode als Ganzes, ist die Normierungskorrektur von +5 ein theoretischer Wert, der nicht angewendet wird. Er wurde deshalb in Klammern gesetzt.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile wird empfohlen, auf Pegelkorrekturen zweiter Art (d.h. von der Verkehrsmenge abhängige Korrekturen) bei allen Verkehrslärmarten zu verzichten. Das hat verschiedene Gründe:

Die Kommission sieht aufgrund der Auswertungen der SiRENE-Befragung (vgl. Anhang A.3.5) beim Strassenlärm zwar Hinweise auf einen belästigungsmindernden Effekt geringer Verkehrsmengen während der Tagesstunden, was eine Pegelkorrektur zweiter Art bis etwa -5 dB für wenig befahrene Strassen rechtfertigen würde. Sie erkennt aber gleichzeitig, dass der generische Grenzwert für die Tagperiode beim Strassenlärm aufgrund somatisch-medizinischer Wirkungen zustandekommt (vgl. Tabelle A.T.4.1 im Anhang). Diese Effekte legen einen bereits um 5 dB niedrigeren Grenzwert nahe, als es die Expositions-Wirkungsbeziehung für den Endpunkt %HA tun würde. Eine auf Belästigung bezogene Pegelkorrektur bei geringen Verkehrsmengen ist deshalb nicht gerechtfertigt.

Von der Bewegungszahl abhängige Pegelkorrekturen zweiter Art von 0 bis -10 dB (bzw. zwischen -5 und -15 dB wenn die Pegelkorrektur erster Art miteingerechnet wird) lassen sich auch beim Eisenbahnlärm gemäss den vorliegenden Untersuchungen nicht aufrechterhalten.

Beim Fluglärm von Grossflugzeugen zeigen zwar speziell durchgeführte Untersuchungen [90] Hinweise für eine von der Bewegungszahl abhängige Pegelkorrektur, wobei sich diese ebenfalls nur auf den Endpunkt %HA beziehen würde. Eine solche Pegelkorrektur exakt zu beziffern, ist aufgrund des zurzeit lückenhaften Stands des Wissens nicht möglich.

Pegelkorrekturen dritter Art, welche spezielle Geräuschcharakteristiken berücksichtigen (z.B. die Pegelkorrektur K2 beim Eisenbahnlärm), wurden in diesem Bericht nicht untersucht. Deshalb können diesbezüglich auch keine Anpassungen empfohlen werden. Da aber auch keine Hinweise vorliegen, dass die entsprechenden Korrekturen nicht gerechtfertigt wären, wird empfohlen, sie in der momentanen Form beizubehalten.

Die Kommission erachtet es darüber hinaus als sinnvoll, die Einführung einer Pegelkorrektur für Strassenlärm bei geringer Fahrgeschwindigkeit zu prüfen, falls – im besten Fall in Form einer Längsschnittstudie – sich zeigen sollte, dass tiefere Fahrgeschwindigkeiten (z.B. in Tempo 30-Zonen) Lärmwirkungen über den Effekt der reinen Pegelabnahme hinaus vermindern können.

4.10 Offene Punkte und Forschungsbedarf

4.10.1 Schutz einzelner Nachtstunden mit Einzelstundengrenzwerten

In Kapitel 4.4.3 wird vorgeschlagen, Einzelstunden-Grenzwerte während der Nacht auch für andere Lärmarten als Fluglärm zu prüfen. Damit könnte die Wohnbevölkerung auch dann vor Aufwachreaktionen besser geschützt werden, wenn aufgrund des Betriebs der entsprechenden Anlage (Strassen oder Eisenbahnen) in einzelnen Stunden in einer ansonsten ruhigen Nacht besonders hohe Immissionen erzeugt würden (z.B. bei Güterzügen oder während frühen Morgenstunden mit intensivem Lastwagenverkehr aufgrund gesteigerten Warenumschlags etc.). Eine entsprechende Regelung könnte z.B. verlangen, dass die lauteste Stunde innerhalb des Nachtzeitraums (also zwischen 22 und 07 Uhr) um maximal einen bestimmten dB-Betrag höher liegen darf als der Durchschnittspegel der gesamten Nachtperiode. Mit den zurzeit vorliegenden Grundlagen war es jedoch nicht möglich, hierfür eine konkrete (Evidenz-basierte) Empfehlung zu unterbreiten.

4.10.2 Berücksichtigung speziell empfindlicher Personengruppen

Der Gesetzgeber verlangt, dass bei der Festlegung der IGW Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit, wie «Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere» (speziell) zu berücksichtigen sind (Art. 13 USG). Er geht also davon aus, dass Kinder, Kranke,

Betagte und Schwangere empfindlicher sind als der Durchschnitt der Bevölkerung und daher eines besonderen Schutzes bedürfen. Aus Sicht der Kommission können solche Personengruppen dann als berücksichtigt gelten, wenn sie in den entsprechenden Grenzwert-relevanten Grundlagenstudien Teil der in die statistischen Modelle eingehenden Stichprobe oder ggf. Grundgesamtheit (bei Bevölkerungs-basierten Studien, z.B. der SNC) waren. Dazu ist Folgendes anzumerken:

- Was Kinder betrifft, so berücksichtigen etwa Todesursachenstatistiken, die in epidemiologischen Studien mit Lärmbelastungsdaten verknüpft werden [z.B. 30], auch Kinder, obwohl deren Mortalitätsrisiko aufgrund von Lärmbelastungen mangels einer ausreichend lang andauernden Exposition sicher vernachlässigbar ist. Kinder sind jedoch in epidemiologischen Kohortenstudien (z.B. der SAPALDIA-Studie) potenziell untervertreten, da solche Studien in der Regel auf bestimmte Alterssegmente begrenzt sind, die nur in seltenen Fällen Kinder miteinschliessen. Schliesslich fehlen Kinder fast gänzlich in Bevölkerungsbefragungen zur Belästigung, da solche meist ein Mindestalter der Teilnahme (oft ≥ 18 Jahre) voraussetzen. Ob Kinder jedoch besonders empfindlich auf Lärm reagieren, ist wissenschaftlich nicht eindeutig belegt.
- Was Kranke betrifft, so sind diese mit Ausnahme von Untersuchungen von explizit «gesunden Erwachsenen» in den meisten Grenzwert-relevanten Grundlagenstudien zumindest nicht ausgeschlossen. Auch bei Bevölkerungsbefragungen ist das nicht Krank-sein meist keine Bedingung für eine Teilnahme. Allerdings erreichen Aufrufe zu einer Studienteilnahme Schwerkranke wahrscheinlich weniger gut, sodass nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese Bevölkerungsgruppe in gewissen Befragungen unterrepräsentiert ist.
- Was Betagte betrifft, so gibt es keine Hinweise, dass diese in epidemiologischen Studien unterrepräsentiert wären, mit Ausnahme von Studien, die eine obere Altersgrenze vorsehen. In Belästigungsbefragungen sind sie tendenziell sogar übervertreten, zeigen ältere Personen doch eine an der Gesamtbevölkerung gemessen höhere Bereitschaft, an Befragungen teilzunehmen [13].
- Was Schwangere betrifft, gibt es keinerlei Hinweise, dass diese systematisch in Grundlagenstudien unter- oder übervertreten wären.

Hinzu kommt, dass bei der Grenzwertfestlegung mittels Expositions-Wirkungsbeziehungen für den Endpunkt %HA auf den Prozentsatz besonders stark belästigter Personen und damit implizit bereits auf «besonders empfindliche» Personen abgestellt wird. Insofern werden gerade auch bei geringeren Pegelwerten besonders empfindliche Personen, die sich stark belästigt fühlen, in einem Expositions-Wirkungszusammenhang erfasst und fliessen somit in die Grenzwertsetzung ein.

Die Kommission kommt abschliessend zum Schluss, dass das Gebot der besonderen Berücksichtigung spezieller Personengruppen bei der Festlegung von Grenzwerten

nicht in unzulässiger Weise verletzt wurde. Es wird jedoch angeregt, im Forschungsbereich «vulnerable Personen» weitere Abklärungen zu machen, deren Ergebnisse ggf. in künftige Grenzwert-Überprüfungen resp. -Anpassungen einfließen können.

4.10.3 Beurteilung von Gesamt-Lärmwirkungen verschiedener Quellen («Kombinationswirkungen»)

Gemäss der bisherigen Praxis werden Belastungsgrenzwerte für verschiedene Lärmarten in separaten Anhängen der LSV festgelegt. Sie werden für sich allein ohne Berücksichtigung anderer Lärmarten angewendet, obwohl das Ganzheitlichkeitsprinzip (Art. 8 USG) verlangt, dass Einwirkungen «sowohl einzeln als auch gesamthaft» zu beurteilen sind. Als Begründung für eine nach Lärmarten getrennte Beurteilung wird oft angeführt, dass auf diesem Weg Konflikte mit dem Verursacherprinzip bzw. dem Sanierungsprinzip vermieden werden sollen, da nur durch eine klare Trennung von Quellen eine Grenzwertüberschreitung eindeutig einem Verursacher oder einer Verursacherin zugeordnet und diese/r in der Folge zur Sanierung verpflichtet werden kann. Entscheidend für die Umsetzung des Gesetzesartikels ist, dass sich in Bezug auf die Lärmwirkung aus wissenschaftlichen Studien generalisierbare Aussagen zu Mehrfachbelastungen ableiten lassen. Die entsprechende bisherige wissenschaftliche Literatur zeichnet sich indes vor allem durch unklare, z.T. sich widersprechende Resultate und die Feststellung aus, dass das Zusammenwirken verschiedener Quellen offenbar noch nicht richtig verstanden wird [4].

Mit dem Beurteilungspegel L_r als Lärmbeurteilungsmass wird zwar der Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Lärmarten ermöglicht. Es läge daher nahe, für die Beurteilung der Gesamtlärmbelastung die Beurteilungspegel aller einwirkenden Lärmarten energetisch zu addieren und mit einem Gesamtlärmbelastungsgrenzwert zu vergleichen. Bei einem derartigen Vorgehen stellen sich jedoch verschiedene Fragen und Probleme. Einerseits gilt es zu klären, wie hoch ein solcher Gesamtlärmbelastungsgrenzwert überhaupt sein sollte, damit die Schutzkriterien des USG erfüllt sind, und ob seine Höhe davon abhängt, welche Lärmarten und wie viele davon auf einen Immissionsort einwirken. Wie oben und auch weiter unten ausgeführt wird, fehlen Studien mit entsprechend eindeutigen Ergebnissen.

Andererseits sind Zweifel angebracht, ob die energetische Addition der Pegelwerte von zeitlich sehr unterschiedlich einwirkenden Lärmarten (z.B. Schiessanlagen- und Strassenverkehrslärm) eine sinnvoll interpretierbare Grösse ergeben [91].

Grundsätzlich stellt sich aber auch die Frage nach der Relevanz und der Dringlichkeit einer integralen Beurteilung von Mehrfachbelastungen. Im Falle zweier gleich lauter Lärmquellen erhöht sich der mittlere Pegel um lediglich 3 dB⁹¹. Zudem muss eine

⁹¹ Bei unkorrelierten Signalen, mit denen man es in der Umweltakustik normalerweise zu tun hat.

Summation der Belastung nicht zwingend eine höhere Störung oder Belästigung mit sich bringen. Im Rahmen der SiRENE-Befragung wurde etwa herausgefunden, dass die Belästigung durch Fluglärm umso geringer ausfiel, je mehr Eisenbahn- und Strassenlärm eine befragte Person bei sich zu Hause ausgesetzt war [13].

Aufgrund des nach wie vor momentan nicht ausreichenden bzw. nicht generalisierbaren Kenntnisstandes und einer voraussehbar schwierigen regulatorischen Implementierung und Verkomplizierung der Grenzwertsystematik wird empfohlen, auf eine wirkungsbezogene Beurteilung von Mehrfach- resp. Kombinationsbelastungen mittels Summation der Lärmart-spezifischen Beurteilungspegel zu verzichten. Dies mit dem Vorbehalt und Hinweis, dass das Zusammenwirken von mehreren Lärmquellen an einem Ort unter Umständen derart ausgeprägt sein kann, dass daraus eine übermäßige, im Sinne des USG erhebliche Störung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens resultiert, auch wenn die IGW der einzelnen Quellen für sich betrachtet jeweils nicht überschritten sind.

Bis zur Lösung des oben geschilderten Beurteilungsproblems sollte das Zusammenwirken verschiedener Lärmarten im Rahmen der Rechtsanwendung also ohne Rückgriff auf einen Gesamtlärmbelastungsgrenzwert beurteilt werden.

Es ist denkbar, den Aspekt von Mehrfachbelastungen im Zusammenhang mit Erleichterungen und der Dringlichkeit von Sanierungen als zusätzliches Kriterium einfließen zu lassen, indem verschärfte Vorschriften gelten, wenn es zu Mehrfachüberschreitungen der Belastungsgrenzwerte kommt. Die Verschärfungen sollten sich dabei nach der Höhe der IGW-Überschreitungen richten. Mehrfachüberschreitungen von AW sollten jedoch unter allen Umständen vermieden werden.

5 Empfehlungen

In diesem Kapitel werden die Ausführungen von Kapitel 3 und 4 in Form von konkreten Empfehlungen für Anpassungen der LSV zusammengefasst. Für die detaillierten Herleitungen und Begründungen sei auf die entsprechenden Unterkapitel bzw. auf Auswertungen im Anhang verwiesen. In Kapitel 5.4 wird ein Grenzwertschema skizziert, in welchem die Überlegungen der Kommission zusammenfliessen. In Kapitel 5.5 werden die Empfehlungen in den internationalen und (bisherigen) nationalen Kontext gesetzt. Tabelle 12 zeigt die wichtigsten neuen Empfehlungen im Überblick.

Tabelle 12: Die wichtigsten Empfehlungen der Kommission im Überblick

Regelungsaspekt:	Empfehlung:
Geltungsbereich der Grenzwerte	Die Grenzwerte sollen wie bisher für alle lärmempfindlichen Räume gelten, allerdings sollen die Regelungen für Räume, die nicht einem langfristigen Wohnzweck dienen, flexibler ausgelegt werden.
Ermittlungsort	Ermittlungsort soll neu der lauteste Punkt auf der Gebäudehülle der zu beurteilenden Wohn- bzw. Nutzungseinheit sein (anstelle der Mitte des offenen Fensters lärmempfindlicher Räume).
Belastungs- und Beurteilungsmasse	Als Belastungsmass soll der L_{Aeq} für die Tag- und Nachtperiode oder für die Tagperiode alternativ zum L_{Aeq} der L_{den} verwendet werden. Die Beurteilung der Lärmimmissionen soll wie bisher mittels eines Beurteilungspegels L_r , zusammengesetzt aus Belastungsmass und Pegelkorrekturen, erfolgen.
Beurteilungszeiten	Die Nachtperiode soll neu auf 9 Stunden (22–07 Uhr) ausgedehnt werden; die Tagperiode reduziert sich auf 15 Stunden (07–22 Uhr). Für Fluglärm wird für die Stunde zwischen 06 und 07 Uhr neu ein zusätzlicher Einzelstundengrenzwert empfohlen.
Empfindlichkeitsstufen	Empfindlichkeitsstufen (ES) sollen beibehalten werden. Neu sollen die Grenzwerte in der ES II und III gleichgesetzt werden.
Grenzwertschema	Das bisherige Grenzwertschema mit einheitlichen IGW für alle Verkehrslärmarten soll im Wesentlichen beibehalten werden. In der ES II und ES III sollen die IGW bei 60 dB für die Tagperiode und 50 dB für die Nachtperiode festgelegt werden. Lärmart-spezifische Unterschiede sollen wie bisher durch Pegelkorrekturen im Beurteilungspegel L_r abgebildet werden.
Grenzwerte	Die Grenzwerte sollen gemäss dem aktuellen Stand des Wissens angepasst werden. Daraus resultieren je nach Lärmart, Beurteilungsperiode und ES Verschärfungen des IGW um typischerweise 0 bis 11 dB.

5.1 Geltungsbereich und Ermittlungsort

Die LSV ist in erster Linie ein Regelungsinstrument, welches dem Schutz des Wohnens vor Lärm dient. Es wird daher empfohlen, Räume die primär anderen Zwecken als dem (dauerhaften) Wohnen dienen in Bezug auf die Geltung der Grenzwerte und die Massnahmen zum Schutz vor Lärm flexibler zu behandeln als Wohnungen, bzw. eine solche Flexibilisierung zu prüfen.

Die Ermittlung der Lärmbelastung soll neu am lautesten Punkt auf der Gebäudehülle der zu beurteilenden Wohn- bzw. Nutzungseinheit erfolgen⁹². Unmittelbar vor diesem Punkt befestigte auskragende Anbauten wie Balkone, Brüstungen, Blenden und andere vorgehängte Bauteile etc. sind messtechnisch oder rechnerisch so zu behandeln, als wären sie nicht da. Die Lärmbelastung am lautesten Punkt auf der Gebäudehülle soll anzeigen, ob grundsätzlich ein Lärmproblem besteht und ob die lärmverursachende Anlage saniert werden muss oder nicht.

5.2 Beurteilungsmass und Beurteilungszeiten

Als Beurteilungsmass für die Lärmbelastung soll weiterhin ein Beurteilungspegel L_r verwendet werden. Dieser setzt sich zusammen aus dem akustischen Basismass über den massgeblichen Beurteilungszeitraum plus Normierungskorrektur(en) K (siehe Kapitel 5.4.2 und 5.4.3), welche die charakteristischen Eigenschaften einer bestimmten Lärmart bzw. die Unterschiede zwischen den Lärmarten berücksichtigt. Für die Beurteilung der Tagperiode sind zwei gleichwertige Varianten möglich, deren Vor- und Nachteile in Kapitel 4.8.1. diskutiert wurden:

- Variante 1 mit einer Beurteilungszeit über die 24 Stunden eines Kalendertages und dem $L_{den,07-19-22-07h}$ als Basismass. Dabei dauert die Beurteilungszeit für die Tagperiode 12 Stunden, deckt den Zeitraum von 07–19 Uhr ab und wird mit 0 dB beaufschlagt. Die Beurteilungszeit des Abends dauert 3 Stunden, deckt den Zeitraum von 19–22 Uhr ab und wird mit +5 dB beaufschlagt, und die Beurteilungszeit der Nachtperiode dauert 9 Stunden, deckt den Zeitraum von 22–07 Uhr ab und wird mit +10 dB beaufschlagt.
- Variante 2 mit einer Beurteilungszeit für die Tagperiode von 15 Stunden für den Zeitraum von 07–22 Uhr bzw. dem $L_{day,07-22h}$ als Basismass.

Die Beurteilungszeit für die Nachtperiode beträgt beim Strassen- und Eisenbahnlärm 9 Stunden und deckt den Zeitraum von 22–07 Uhr ab. Beim Fluglärm ist die bisherige

⁹² Falls es sich um Mehrfamilienhäuser, Blockrandgebäude, Reihenhäuser oder Doppelhäuser handelt, ist der lauteste Punkt auf demjenigen Teil der Gebäudehülle zu definieren, dessen Aussenwände (inkl. Dächer und Fenster) die Wohn- bzw. Nutzungseinheit begrenzen, die beurteilt werden soll.

Beurteilung der einzelnen Nachtstunden von 22–23, 23–24 und 05–06 Uhr beizubehalten. Um die verlängerte Nachtperiode zu berücksichtigen, ist jedoch eine weitere gesonderte Beurteilung der Einzelstunde von 06–07 Uhr vorzusehen.

5.3 Empfindlichkeitsstufen (ES)

Um einen einheitlichen Schutz des Wohnens vor Lärm zu gewährleisten, sind die Belastungsgrenzwerte in den ES II und III gleichzusetzen. Ein höherer bzw. niedrigerer Schutz vor Lärm rechtfertigt sich dagegen in der ES I resp. ES IV.

Diese Empfehlung betrifft nur die Lärmarten Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm.

5.4 Belastungsgrenzwerte und Grenzwertschema

5.4.1 Arten von Grenzwerten

Es wird empfohlen, an allen drei bisherigen Arten von Grenzwerten (IGW, PW, AW) festzuhalten. Da Pegel-Differenzen zwischen IGW, PW und AW nicht aufgrund von gesundheitlichen Kriterien begründbar sind, werden an dieser Stelle keine Vorschläge für entsprechende Abstufungen gemacht.

5.4.2 Grenzwertschema und Normierungskorrekturen

Für Zonen der ES II (und III) wird ein für alle Verkehrslärmarten einheitlicher IGW (als L_r) bei 60 dB für die Tagperiode (in Variante 1 über 24 Stunden [$L_{r,Tag24h}$], in Variante 2 über 15 Stunden [$L_{r,Tag15h}$]) resp. bei 50 dB für die Nachtperiode (über 9 Stunden [$L_{r,Nacht}$]) empfohlen. Für Zonen der ES I ist wegen des erhöhten Schutzbedürfnisses ein um 5 dB strengerer IGW sinnvoll. Für Industriezonen (Zonen der ES IV), die für Wohnnutzungen grundsätzlich ungeeignet sind, ist aus Sicht der Kommission ein um 10 dB höherer IGW geeignet und zumutbar.

Aufgrund der bisherigen Erläuterungen ergeben sich die in den Tabellen 13.1 (Variante 1) bzw. 13.2 (Variante 2) sowie in Tabelle 13.3 für Fluglärm in den Nachtstunden dargestellten Immissionsgrenzwerte IGW (als L_r), mit Normierungskorrekturen K. Pegelkorrekturen zweiter und dritter Art sind in diesen Tabellen nicht berücksichtigt, Empfehlungen zu solchen werden aber in Kapitel 5.4.3 abgegeben.

Tabelle 13.1 Empfohlene IGW für $L_{r,Tag24h}$ und $L_{r,Nacht}$ und Normierungskorrekturen K in den ES I-IV für Variante 1 des Grenzwertschemas (d.h. mit den Belastungsmassen $L_{den,07-19-22-07h}$ und $L_{night,22-07h}$)

ES	IGW [dB]		Normierungskorrekturen K [dB]				
	$L_{r,Tag24h}^*$	$L_{r,Nacht}^{**}$	K_{Tag24h}			K_{Nacht}	
			Strasse	Eisenbahn	Flug	Strasse	Eisenbahn
I	55	45					
II	60	50	-2	-5	+5	-2	-6
III							
IV	70	60					

* $L_{r,Tag24h} = L_{den,07-19-22-07h} + K_{Tag24h}$

** $L_{r,Nacht} = L_{night,22-07h} + K_{Nacht}$

Tabelle 13.2 Empfohlene IGW für den $L_{r,Tag15h}$ und den $L_{r,Nacht}$ und Normierungskorrekturen K in den ES I-IV für Variante 2 des Grenzwertschemas (d.h. mit den Belastungsmassen $L_{day,07-22h}$ und $L_{night,22-07h}$)

ES	IGW [dB]		Normierungskorrekturen K [dB]				
	$L_{r,Tag15h}^*$	$L_{r,Nacht}^{**}$	K_{Tag15h}			K_{Nacht}	
			Strasse	Eisenbahn	Flug	Strasse	Eisenbahn
I	55	45					
II	60	50	0	+1	+6	-2	-6
III							
IV	70	60					

* $L_{r,Tag15h} = L_{day,07-22h} + K_{Tag15h}$

** $L_{r,Nacht} = L_{night,22-07h} + K_{Nacht}$

Tabelle 13.3 **Empfohlene IGW für Fluglärm in vier einzelnen Nachtstunden und Korrekturterme K (K_{N1} , K_{N2} , K_{N3} , K_{N4})**

ES	IGW [dB]	Korrekturterme K [dB]			
	L_r^*	K_{N1}^{**}	K_{N2}^{**}	K_{N3}^{**}	K_{N4}^{**}
I	45	-2	+1	+1	-2
II	50				
III					
IV	60				

* $L_r = L_{Aeq,1h} + K$

** N1=22-23 h; N2=23-00 h; N3=05-06 h; N4=06-07 h

5.4.3 Pegelkorrekturen zweiter und dritter Art

Pegelkorrekturen zur Berücksichtigung geringer Verkehrsmengen (Pegelkorrekturen zweiter Art) sind aus der LSV zu streichen. Die Pegelkorrekturen hingegen, welche spezielle Geräuschcharakteristiken wie beispielsweise Rangierlärm und Schienenkreiseln berücksichtigen (Pegelkorrekturen dritter Art), sind beizubehalten, da keine Hinweise vorliegen, dass diese nicht störungs- bzw. wirkungsgerecht wären.

Es wird empfohlen, die Einführung einer Pegelkorrektur für Streckenabschnitte mit geringer Fahrgeschwindigkeit zu prüfen, falls empirisch erhärtet werden sollte, dass tiefere Fahrgeschwindigkeiten (z.B. in Tempo 30-Zonen) Lärmwirkungen zusätzlich zum Effekt der Schallpegelreduktion vermindern können.

5.5 Einordnung der Empfehlungen in den nationalen und internationalen Kontext

5.5.1 Vergleich mit der aktuellen Regelung der LSV

Aufgrund der neuen Empfehlungen gelten je nach Lärmart und Zeitperiode inskünftig Grenzwerte welche, betreffend des Schutzniveaus, typischerweise zwischen 0 dB und etwa 11 dB strenger sind als bisher. Die wesentlichen Auslöser für diese Verschärfungen sind:

- **Aktualisierte Expositions-Wirkungsfunktionen:** Aufgrund der seit einigen Jahrzehnten beobachtbaren Tendenz zu steigender Belästigung durch Fluglärm [92-95] ergeben sich für diese Lärmart niedrigere Grenzwerte als bisher. Auch Eisenbahnlärm wird neu strenger beurteilt, v.a. aufgrund der Tendenz,

dass die Belastungs-Wirkungsbeziehung für Belästigung durch Eisenbahnlärm (tags) sich immer mehr derjenigen des Strassenlärms angleicht (bzw. diese sogar übertrifft, vgl. Abbildung A.A.11 im Anhang) und somit für den Endpunkt HA kein «Schienenbonus» mehr feststellbar ist.

- **Angleichung der Grenzwerte der ES III auf das Niveau der ES II:** Die Empfehlung, den IGW für die ES II und ES III gleichzusetzen, hat zur Folge, dass in der ES III für alle Lärmarten (hier: Strassen-, Eisenbahn- und Fluglärm) mindestens 5 dB strengere Grenzwerte gelten als bisher.
- **Wegfall der Bewegungszahl-abhängigen Pegelkorrekturen (Pegelkorrekturen zweiter Art):** Aufgrund der Empfehlung, künftig auf Bewegungszahl-abhängige Pegelkorrekturen zu verzichten, entfallen die bisherigen «Boni» bei geringen Verkehrsfrequenzen. Dies wirkt sich vor allem nachts und vor allem beim Eisenbahnlärm aus.
- **Neuer Ermittlungsort:** Die Möglichkeit, durch lediglich bauliche Massnahmen vor der Fassade, z.B. einen Balkon, den Beurteilungspegel am bisher offiziellen Ermittlungsort um einige dB zu reduzieren (jedoch ohne damit die Lärmbelastung des unmittelbaren Aussenraums ebenfalls zu senken), soll künftig entfallen. Dies kann je nach Situation bzw. vor allem für künftige Neubauten eine Verschärfung bedeuten. Diese exakt zu beziffern, ist allerdings ohne weitgehende Auswirkungsanalysen der neuen Empfehlungen nicht möglich.

Tabellen 14.1 (für die Tagperiode) und 14.2 (für die Nachtperiode) zeigen auf, wie sich die IGW gemäss neuer Empfehlung von den IGW in der LSV im Mittel unterscheiden. Die tabellierten dB-Differenzen zwischen dem Status quo und den neuen Empfehlungen beziehen sich auf Variante 2 des Grenzwertschemas (die Unterschiede zwischen Status quo und Variante 1 bewegen sich im ähnlichen Rahmen). Die ermittelten Differenzen sind lediglich als Approximation zu verstehen da ein 1:1 Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Zeitbezüge der zugrundeliegenden Belastungsmasse und aufgrund des künftigen Verzichts auf Bewegungszahl-abhängige Pegelkorrekturen (vgl. Kapitel 5.4.3) nicht möglich ist. Um dennoch abschätzen zu können, um wie viele dB strenger oder weniger streng die empfohlenen Grenzwerte gegenüber den aktuellen in der LSV sind, wurde zunächst der $L_{\text{day},06-22\text{h}}$ von 60 dB(A) bzw. der $L_{\text{night},22-06\text{h}}$ von 50 dB(A) (Zeitperioden gemäss LSV) mittels der Konversionsterme aus Tabelle A.T.6 in die neu empfohlenen Belastungsmasse $L_{\text{day},07-22\text{h}}$ bzw. $L_{\text{night},22-07\text{h}}$ konvertiert (in diesen Belastungsmassen sind auch die Lärmart-bezogenen Grenzwerte definiert). Danach wurde für die Pegelkorrektur K1 (Spalte K1 in Tabelle 14.1 bzw. 14.2) beim Strassen- und Eisenbahnlärm ein mittlerer K1-Wert über alle Personen in Gebäuden mit $L_{\text{day},06-22\text{h}} \geq 60$ dB bzw. mit $L_{\text{night},22-06\text{h}} \geq 50$ dB errechnet (siehe Anhang A.3.9). Schliesslich wurde der vorgängig eruierte $L_{\text{day},07-22\text{h}}$ bzw. $L_{\text{night},22-07\text{h}}$ um den entsprechenden K1-Wert korrigiert. Somit lagen jeweils zwei dB-Werte vor (die beiden Spalten mit der

Bezeichnung « $L_{\text{day},07-22\text{h}}$ » in Tabelle 14.1 bzw. « $L_{\text{night},22-07\text{h}}$ » in Tabelle 14.2), die sich direkt miteinander vergleichen lassen.

Tabelle 14.1: Vergleich der IGW für die Tagperiode in der ES II / ES III zwischen LSV (Status quo) und der neuen Empfehlung (gemäss Variante 2). Normierungskorrekturen (K_1 in der LSV bzw. K_{Tag} gemäss Empfehlung) sind berücksichtigt, nicht aber weitere Pegelkorrekturen.

Tagperiode									
Lärmart	ES	IGW gemäss LSV			IGW gem. Empfehlung			Δ	Empfehlung ist im Mittel...
		$L_{r,\text{Tag}}$	K_1	$L_{\text{day},07-22\text{h}}^{\text{a}}$	$L_{r,\text{Tag}}$	K_{Tag}	$L_{\text{day},07-22\text{h}}$		
Strasse	II	60	-0.2 ^b	≈ 60	60	0	60	0	≈ gleich streng
	III	65	-0.2 ^b	≈ 65	60	0	60	-5	≈ 5 dB strenger
Eisenbahn	II	60	-5.2 ^c	≈ 65	60	+1	59	-6	≈ 6 dB strenger
	III	65	-5.2 ^c	≈ 70	60	+1	59	-11	≈ 11 dB strenger
Flug	II	60	0 ^d	≈ 60	60	+6	54	-6	≈ 6 dB strenger
	III	65	0 ^d	≈ 65	60	+6	54	-11	≈ 11 dB strenger

K1 Mittlere Bewegungszahlkorrektur K_1 [in dB] nach LSV Anh. 3 Ziff. 35 (Strasse), bzw. LSV Anh. 4 Ziff. 33 (Eisenbahn), bzw. LSV Anh. 5 Ziff. 34 (Flug) bei Personen mit $L_{\text{day},06-22\text{h}} \geq 60$ dB, auf 0.1 dB mathematisch gerundet.

Δ Mittlere Differenz zwischen Empfehlung und LSV; negatives Vorzeichen bedeutet, dass die Empfehlung um den entsprechenden Wert strenger ist.

^a Geschätzt anhand der Konversionsterme aus Tabelle A.T.6 und der angenommenen mittleren Bewegungszahlkorrektur K_1 , dann auf 1 dB mathematisch gerundet.

^b Die Pegelkorrekturen K_1 sind gerundete Mittelwerte über alle Bewohner/innen in Gebäuden mit $L_{\text{day},06-22\text{h}} \geq 60$ dB(A) in der entsprechenden ES (vgl. Anhang A.3.9). Man beachte: Der Wertebereich von K_1 kann gemäss LSV Anh. 3 Ziff. 35 zwischen -5 und 0 dB betragen.

^c Die Pegelkorrekturen K_1 sind Mittelwerte über alle Bewohner/innen in Gebäuden mit $L_{\text{day},06-22\text{h}} \geq 60$ dB(A) in der entsprechenden ES (vgl. Anhang A.3.9). Man beachte: Der Wertebereich von K_1 kann gemäss LSV Anh. 4 Ziff. 33 zwischen -15 und -5 dB betragen.

^d Der Verkehr von Kleinluftfahrzeugen ist hier nicht berücksichtigt, deshalb spielt die Pegelkorrektur K_1 keine Rolle.

Tabelle 14.2: Vergleich der IGW für die Nachtperiode in der ES II / ES III zwischen LSV (Status quo) und der neuen Empfehlung (gemäss Variante 2). Normierungskorrekturen (K1 in der LSV bzw. K_{Nacht} gemäss Empfehlung) sind berücksichtigt, nicht aber weitere Pegelkorrekturen.

Nachtperiode									
Lärmart	ES	IGW gemäss LSV			IGW gem. Empfehlung			Δ	Empfehlung ist im Mittel...
		$L_{r,\text{Nacht}}$	K1	$L_{\text{night},22-07\text{h}}^{\text{a}}$ bzw. $L_{\text{Aeq},1\text{h}}$	$L_{r,\text{Nacht}}$	K_{Nacht}	$L_{\text{night},22-07\text{h}}$ bzw. $L_{\text{Aeq},1\text{h}}$		
Strasse	II	50	-2.9 ^b	≈ 55	50	-2	52	-3	≈ 3 dB strenger
	III	55	-2.8 ^b	≈ 60	50	-2	52	-8	≈ 8 dB strenger
Eisenbahn	II	50	-8.2 ^c	≈ 58	50	-6	56	-2	≈ 2 dB strenger
	III	55	-8.1 ^c	≈ 63	50	-6	56	-7	≈ 7 dB strenger
Flug 22-23h	II	55	0 ^d	55	50	-2	52	-3	3 dB strenger
	III	55	0 ^d	55	50	-2	52	-3	3 dB strenger
Flug 23-00h	II	50	0 ^d	50	50	+1	49	-1	1 dB strenger
	III	55	0 ^d	55	50	+1	49	-6	6 dB strenger
Flug 05-06h	II	50	0 ^d	50	50	+1	49	-1	1 dB strenger
	III	55	0 ^d	55	50	+1	49	-6	6 dB strenger
Flug 06-07h	II	-	-	-	50	-2	52	-	-
	III	-	-	-	50	-2	52	-	-

K1 Mittlere Bewegungszahlkorrektur K1 [in dB] nach LSV Anh. 3 Ziff. 35 (Strasse), bzw. LSV Anh. 4 Ziff. 33 (Eisenbahn), bzw. LSV Anh. 5 Ziff. 34 (Flug) bei Personen mit $L_{\text{night},22-06\text{h}} \geq 50$ dB, auf 0.1 dB mathematisch gerundet.

Δ Mittlere Differenz zwischen Empfehlung und LSV; negatives Vorzeichen bedeutet, dass die Empfehlung um den entsprechenden Wert strenger ist.

^a Geschätzt anhand der Konversionsterme aus Tabelle A.T.6. und der angenommenen mittleren Bewegungszahlkorrektur K1, dann auf 1 dB mathematisch gerundet.

^b Die Pegelkorrekturen K1 sind Mittelwerte über alle Bewohner/innen in Gebäuden mit $L_{\text{night},22-06\text{h}} \geq 50$ dB(A) in der entsprechenden ES (vgl. Anhang A.3.9). Man beachte: Der Wertebereich von K1 kann gemäss LSV Anh. 3 Ziff. 35 zwischen -5 und 0 dB betragen.

^c Die Pegelkorrekturen K1 sind Mittelwerte über alle Bewohner/innen in Gebäuden mit $L_{\text{night},22-06\text{h}} \geq 50$ dB(A) in der entsprechenden ES (vgl. Anhang A.3.9). Man beachte: Der Wertebereich von K1 kann gemäss LSV Anh. 4 Ziff. 33 zwischen -15 und -5 dB betragen.

^d Der Verkehr von Kleinluftfahrzeugen ist hier nicht berücksichtigt, deshalb spielt die Pegelkorrektur K1 keine Rolle.

5.5.2 Vergleich mit den Empfehlungen der WHO

Die von der WHO für den Schutz der Gesundheit empfohlenen Grenzwerte der Environmental Noise Guidelines [10] sind deutlich strenger, als dies die Empfehlungen der EKL B vorsehen. Dieser Umstand lässt sich anhand der unterschiedlichen Zielsetzungen erklären, nach denen sich die jeweiligen Empfehlungen richten. Ziel der WHO Environmental Noise Guidelines ist es, die Menschen *umfassend* vor den negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Umweltlärm zu schützen und zu diesem Zweck Entscheidungsträgern gesundheitsbezogene Empfehlungen für die politische Praxis zur Verfügung zu stellen. Die WHO-Empfehlungen legen die Schwelle fest, ab welcher gesichert gesundheitliche Effekte auftreten, markieren aber nicht notwendigerweise die Schwelle, bei welcher solche Effekte als «erheblich» oder «inakzeptabel» zu bezeichnen sind. Die WHO-Grenzwerte können somit als generelle Empfehlungen («recommendations») für eher langfristige Policy-Ziele betrachtet werden, ähnlich der «Vision Zero» im Bereich der Prävention von Strassenverkehrstoten, wo das erklärte Ziel ist, gar keine Verkehrstoten mehr in Kauf zu nehmen. Demgegenüber steht das Ziel von USG und LSV, dass Grenzwerte vor «erheblichen» Störungen des Wohlbefindens schützen sollen. Sie können daher höher angesetzt werden als die von der WHO vorgeschlagenen Grenzwerte.

5.5.3 Vergleich mit Regelungen anderer Länder

Ein Vergleich des von der EKL B vorgeschlagenen Grenzwertschemas bzw. der empfohlenen Grenzwerte mit den aktuellen Regelungen in anderen Ländern ist schwierig, da Beurteilungsmasse, Zeitbezüge und v.a. die an eine Überschreitung von Grenzwerten gekoppelten Rechtsfolgen in verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich sind. Zurzeit werden in den meisten Ländern der EU, aber auch ausserhalb, z.B. in Grossbritannien, die Lärmschutzregelungen aufgrund der kürzlich publizierten WHO Environmental Noise Guidelines [10] überprüft, was voraussichtlich mittelfristig zu Anpassungen führen wird. Ein Vergleich mit den Lärmschutzregelungen der EU als Ganzes erübrigt sich, da die Grenzwertsetzung im Lärmbereich den einzelnen EU-Mitgliedstaaten überlassen ist. Die Kommission verzichtet aus den dargelegten Gründen auf einen Vergleich mit ausländischen Regelungen, weist jedoch für speziell Interessierte auf die Übersicht der Interest Group on Noise Abatement (IGNA) des EPA Networks hin [96], in welcher zurzeit gültige Lärmschutzvorschriften und Grenzwerte in Europa einander gegenübergestellt werden.

5.6 Umsetzung der Empfehlungen

Die Empfehlungen der Kommission sollen zur Erreichung des verfassungsmässig vorgegebenen Ziels zum Schutz der Bevölkerung vor Lärm beitragen. Angesichts der bereits heute sehr hohen Zahl von Menschen, die schädlichem oder lästigem Lärm ausgesetzt sind, legt die Kommission grössten Wert darauf, dass die laufenden Anstrengungen zur Begrenzung des Lärms weitergeführt und wo möglich verstärkt werden. Die Arbeiten zur Umsetzung der Empfehlungen sollen diese Anstrengungen nicht behindern.

Die Kommission ist sich bewusst, dass die Umsetzung der in diesem Bericht gemachten Vorschläge und Empfehlungen zum Teil erhebliche Auswirkungen insbesondere auf die Verkehrsinfrastrukturen und die Siedungsentwicklung haben kann. Diese Auswirkungen sind im Weiteren detailliert zu untersuchen und im Zuge der Umsetzung zu berücksichtigen.

Anhang

Anhang

A.1 Tabellen

Tabelle A.T.1: Auswahl verfügbarer Literatur über Disability Weights (DWs), die im Bereich der Lärm-Epidemiologie von Bedeutung sind

Quelle	Starke Belästigung (HA)	Starke Schlafstörung (HSD)	Kardiovaskuläre Endpunkte	Metabolische Endpunkte	Kommunikation / Kognition	Hörminderung / Tinnitus	Andere
Mathers (1999) [97]	keine Angabe	keine Angabe	Hypertensive episodes in pregnancy: 0.117	Uncomplicated diabetes case: 0.05	keine Angabe	keine Angabe	Moderate depression: 0.3
Mathers (2003) [62]	keine Angabe	keine Angabe	Acute MI: 0.437 Angina pectoris: 0.137 Congestive heart failure: 0.234 Hypertensive heart disease: 0.243	Diabetes (cases): 0.015	Cognitive impairment: 0.024	Hearing loss, adult onset: 0.159	Unipolar depressive disorders: 0.398
Müller-Wenk (2003) [98]	keine Angabe	HSD: 0.055	Keine Angabe	keine Angabe	Communication disturbance: 0.033	keine Angabe	keine Angabe
WHO (2004) [99]	Keine Angabe	Primary insomnia: 0.100	Acute MI: 0.439 Angina pectoris: 0.124 Hypertensive heart disease: 0.246	Diabetes (cases): 0.015	Keine Angabe	Hearing loss, mild: 0.00 moderate, treated: 0.04	Mild depressive episode: 0.140
WHO (2011) [65]	HA: 0.02	HSD: 0.07	Acute MI: 0.405 Angina pectoris: 0.108 Hypertensive heart disease: 0.201	keine Angabe	Contemporaneous cognitive deficit: 0.006	Tinnitus: 0.120 Hearing loss: 0.003-0.334	keine Angabe
Salomon (2015) [63]	keine Angabe	keine Angabe	Acute MI: 0.074-0.432 Stroke (long term consequences): 0.019-0.316 Angina pectoris: 0.108 Heart failure: 0.041-0.179	keine Angabe	Keine Angabe	Hearing loss, mild: 0.010	Mild depressive episode: 0.145
Haagsma (2015) [100]	Keine Angabe	Sleep apnoea: 0.036	Acute MI day 3-8: 0.098 Stroke (long term consequences): 0.075-0.58 Angina pectoris moderate: 0.103 Heart failure: 0.052-0.173	Keine Angabe	Keine Angabe	Hearing loss, mild: 0.011	Major depressive disorder, mild episode: 0.129
GBD Collaborative Network [61, 101]	Keine Angabe	Keine Angabe	Acute MI day 0-2: 0.432 Stroke, moderate: 0.07 Angina pectoris, moderate: 0.08 Heart failure, moderate: 0.072	Uncomplicated diabetes mellitus: 0.049	Motor plus cognitive impairment, mild: 0.031	Hearing loss, mild: 0.01 Hearing loss, moderate: 0.027	Keine Angabe
Van Kamp (2018) [102]	HA: 0.01	HSD: 0.0175	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
WHO (2018) [10]	HA: 0.02	HSD: 0.07	IHD as group: 0.405 Hypertension: 0.117	keine Angabe	Impaired reading and oral comprehension: 0.006	Permanent hearing impairment (mild severity): 0.015	Keine Angabe

Tabelle A.T.2: Von der Kommission gesichtete, bewertete und (z.T.) für die Ermittlung generischer Grenzwerte benutzte wissenschaftliche Literatur

Wirkung/Lärmart	Belastungs- masse	Erstautor/in, Jahr und Referenz	Jahr oder Zeitraum	Bemerkungen
Belästigung (%HA)				
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{den} L _{day,06-22h} L _{day,07-23h} L _{dn} L _{Aeq24}	Brink, 2019 [13]	Erhebungen: 2014, 2015	Schweiz-repräsentative und aktuelle Expositions- Wirkungsbeziehungen für Belästigung (%HA) aus der SiRENE-Studie
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{den}	Guski, 2017 [23]	Meta-Analyse: 2000–2014	Aktuellste Meta-Analyse zum Forschungs-gegen- stand
Kardiovaskuläre Mortalität				
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{den}	Héritier, 2017 [30] Vienneau, 2020 [31]	Kohorte: 2000– 2008 bzw. 2015	Studien zu kardiovaskulä- rer Sterblichkeit aufgrund von Lärm in der Schweiz
Ischämische Herzkrankheit (Inzidenz)				
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{den}	van Kempen, 2018 [27] Vienneau, 2019 [66]	Meta-Analyse: Li- teratur 2000– 2014 bzw. 2019	IHD-Inzidenz aus der WHO-Meta-Analyse (+Ak- tualisierungen)
Diabetes (Inzidenz)				
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{day} L _{night} L _{den}	Eze, 2017 [33]	Kohorte: 2002– 2011	Für die Schweiz repräsen- tative Studie zur Diabetes- Inzidenz aufgrund von Lärm (SAPALDIA/SiRENE)
Strassenlärm	L _{den}	van Kempen, 2018 [27] Vienneau, 2019 [66]	Meta-Analyse: Li- teratur 2000– 2014 bzw. 2019	Diabetes-Inzidenz aus der WHO-Meta-Analyse (+Ak- tualisierungen)
Lärminduzierte Schlafstörungen (%HSD)				
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{den} L _{night,22-06h} L _{night,23-07h} L _{night,22-07h}	Brink, 2019 [14]	Erhebungen: 2014, 2015	Wichtiger Artikel zu Exposi- tions-Wirkungsbeziehun- gen für starke Schlafstö- rung (%HSD) aus der Si- RENE-Studie
Strassenlärm Eisenbahnlärm Fluglärm	L _{night}	Basner, 2018 [24]	Meta-Analyse: Li- teratur 2000– 2014	Aktuellste Meta-Analyse zum Thema Lärminduzierte Schlafstörungen, mit Exposi- tions-Wirkungsbeziehun- gen

Tabelle A.T.3: Massgebliche Expositions-Wirkungsfunktionen (EWF) je Lärmart für verschiedene Endpunkte

Endpunkt	Studientyp	Lärmart	Ref.	EWF
%HA	Querschnitt-Survey (SiRENE)	Strassenlärm	[13]	$\%HA=100 / (1+\exp(-(-8.5901+0.1108 \times L_{den})))$
%HA	Querschnitt-Survey (SiRENE)	Eisenbahnlärm	[13]	$\%HA=100/(1+\exp(-(-9.6426+0.1312 \times L_{den})))$ *
%HA	Querschnitt-Survey (SiRENE)	Fluglärm	[13]	$\%HA=100/(1+\exp(-(-9.6555+0.1496 \times L_{den})))$
%HA	Meta-Analyse	Strassenlärm	[23]	$\%HA=78.9270-3.1162 \times L_{den}+0.0342 \times L_{den}^2$
%HA	Meta-Analyse	Eisenbahnlärm	[23]	$\%HA=38.1596-2.05538 \times L_{den}+0.0285 \times L_{den}^2$
%HA	Meta-Analyse	Fluglärm	[23]	$\%HA=-50.9693+1.0168 \times L_{den}+0.0072 \times L_{den}^2$
%HSD	Querschnitt-Survey (SiRENE)	Strassenlärm	[14]	$\%HSD=100/(1+\exp(-(-7.3122+0.0980 \times L_{night})))$
%HSD	Querschnitt-Survey (SiRENE)	Eisenbahnlärm	[14]	$\%HSD=100/(1+\exp(-(-7.7996+0.1128 \times L_{night})))$
%HSD	Querschnitt-Survey (SiRENE)	Fluglärm	[14]	$\%HSD=100/(1+\exp(-(-6.7649+0.1195 \times L_{night})))$
%HSD	Meta-Analyse	Strassenlärm	[24]	$\%HSD=19.4312 - 0.9336 \times L_{night}+0.0126 \times L_{night}$
%HSD	Meta-Analyse	Eisenbahnlärm	[24]	$\%HSD=67.5406 - 3.2852 \times L_{night}+0.0391 \times L_{night}$
%HSD	Meta-Analyse	Fluglärm	[24]	$\%HSD=16.7885 -0.9293 \times L_{night}+0.0198 \times L_{night}$
Kardiovask. Mortalität	Kohortenstudie (Inzidenz)	Strassenlärm	[31]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.027
Kardiovask. Mortalität	Kohortenstudie (Inzidenz)	Eisenbahnlärm	[31]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.016
Kardiovask. Mortalität	Kohortenstudie (Inzidenz)	Fluglärm	[30]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.027 **
IHD	Meta-Analyse (Inzidenz)	Strassenlärm	[66]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.02
IHD	Meta-Analyse (Inzidenz)	Eisenbahnlärm	[66]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.016 ***
IHD	Meta-Analyse (Inzidenz)	Fluglärm	[66]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.03
Diabetes	Meta-Analyse (Inzidenz)	Strassenlärm	[66]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.11
Diabetes	Meta-Analyse (Inzidenz)	Eisenbahnlärm	[66]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.076 ****
Diabetes	Meta-Analyse (Inzidenz)	Fluglärm	[66]	RR per 10 dB Zunahme des L_{den} : 1.20

* Aktualisierte Expositions-Wirkungsfunktion

** Spezifisch Herzinfarkt-Mortalität; das RR beim Strassenlärm ist rein zufällig gleich hoch

*** Allg. Schätzer über alle Lärmarten (Meta-Analyse: [66]), da mit dem empirischen Schätzer für Eisenbahnlärm (1.01, n.s.) ein unrealistisch hoher Endpunkt-bezogener Schwellenwert resultieren würde. Die Qualität der Evidenz beim Eisenbahnlärm wurde zudem als zu gering eingestuft, um sich allein auf den empirischen Schätzer für Eisenbahnlärm abzustützen.

**** Allg. Schätzer über alle Lärmarten (Meta-Analyse: [66]), da der empirische Schätzer für Diabetes bei Eisenbahnlärm einen protektiven Effekt (RR=0.99, n.s.) bedeutet hätte, was als unplausibel verworfen wurde.

Tabelle A.T.4.1: Zahlenwerte, die für die Bestimmung der generischen Grenzwerte für das Belastungsmass L_{den} benutzt werden. Pro Lärmart ist der jeweils resultierende generische Grenzwert fett und unterstrichen hervorgehoben. Alle Zahlenwerte, die direkt in die Berechnung des generischen Grenzwerts eingehen, sind **rot kursiv dargestellt. Pegelwerte in dB(A).**

Endpunkt:	%HA (Si-RENE)	%HA (WHO Evidence Review)	Kardiovask. Mortalität (Si-RENE)	IHD (WHO Evidence Review + Aktual.)	Diabetes (WHO Evidence Review + Aktual.)
DW:	0.020	0.020	1.000	0.405	0.049
Akzeptierbares Zusatzrisiko:	<i>0.250</i>	<i>0.250</i>	<i>0.025</i>	<i>0.050</i>	<i>0.200</i>
Strassenlärm:					
RR per 10 dB:	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	<i>1.027</i>	<i>1.02</i>	<i>1.11</i>
Referenzpegel:	nicht anwendbar	nicht anwendbar	<i>45</i>	<i>45</i>	<i>45</i>
Endpunkt-bezogener Schwellenwert:	<i>67.58</i>	<i>67.89</i>	<i>54.26</i>	<i>70.00</i>	<i>63.18</i>
Mittelwert (gen. GW fett):	67		<u>62</u>		
Eisenbahnlärm:					
RR per 10 dB:	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	<i>1.016</i>	<i>1.016 *</i>	<i>1.076 *</i>
Referenzpegel:	nicht anwendbar	nicht anwendbar	<i>40 **</i>	<i>40 **</i>	<i>45</i>
Endpunkt-bezogener Schwellenwert:	<i>65.12</i>	<i>65.01</i>	<i>56.63</i>	<i>71.25</i>	<i>71.32</i>
Mittelwert (gen. GW fett):	<u>65</u>		66		
Fluglärm:					
RR per 10 dB:	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	<i>1.027</i>	<i>1.03</i>	<i>1.2</i>
Referenzpegel:	nicht anwendbar	nicht anwendbar	<i>45</i>	<i>45</i>	<i>45</i>
Endpunkt-bezogener Schwellenwert:	<i>57.21</i>	<i>54.03</i>	<i>54.26</i>	<i>61.67</i>	<i>55.00</i>
Mittelwert (gen. GW fett):	<u>55</u>		56		

* Allg. Schätzer über alle Lärmarten (Meta-Analyse: [66]),

** Referenzpegel von 40 dB(A) empirisch nachgewiesen [30]

Tabelle A.T.4.2: Zahlenwerte, die für die Bestimmung der generischen Grenzwerte für das Belastungsmass L_{night} benutzt werden. Pro Lärmart ist der jeweils resultierende generische Grenzwert fett und unterstrichen hervorgehoben. Alle Zahlenwerte, die direkt in die Berechnung des generischen Grenzwerts eingehen, sind **rot kursiv dargestellt. Pegelwerte in dB(A).**

Endpunkt:	%HSD (Si-RENE)	%HSD (WHO Evidence Review)	Kardiovask. Mortalität (Si-RENE)	IHD (WHO Evidence Review + Aktual.)	Diabetes (WHO Evidence Review + Aktual.)
DW:	0.070	0.070	1.000	0.405	0.049
Akzeptierbares Zusatzrisiko:	<i>0.150</i>	<i>0.150</i>	<i>0.025</i>	<i>0.050</i>	<i>0.200</i>
Strassenlärm:					
RR per 10 dB:	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	<i>1.027</i>	<i>1.02</i>	<i>1.11</i>
Referenzpegel	nicht anwendbar	nicht anwendbar	<i>35</i>	<i>35</i>	<i>35</i>
Endpunkt-bezogener Schwellenwert:	<i>56.88</i>	<i>68.99</i>	<i>44.26</i>	<i>60.00</i>	<i>53.18</i>
Mittelwert (gen. GW fett):	62		<u>52</u>		
Eisenbahnlärm:					
RR per 10 dB:	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	<i>1.016</i>	<i>1.016 *</i>	<i>1.076 *</i>
Referenzpegel	nicht anwendbar	nicht anwendbar	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>35</i>
Endpunkt-bezogener Schwellenwert:	<i>53.74</i>	<i>58.48</i>	<i>45.63</i>	<i>61.25</i>	<i>61.32</i>
Mittelwert (gen. GW fett):	<u>56</u>		<u>56</u>		
Fluglärm:					
RR per 10 dB:	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	kein RR, aber <i>EFW aus Tabelle A.T.3</i>	<i>1.027</i>	<i>1.03</i>	<i>1.2</i>
Referenzpegel	nicht anwendbar	nicht anwendbar	<i>35</i>	<i>35</i>	<i>35</i>
Endpunkt-bezogener Schwellenwert:	<i>42.07</i>	<i>44.92</i>	<i>44.26</i>	<i>51.67</i>	<i>45.00</i>
Mittelwert (gen. GW fett):	<u>43</u>		46		

* Allg. Schätzer über alle Lärmarten (Meta-Analyse: [66]),

A.2 Im Zusammenhang mit der Grenzwertsetzung relevante rechtliche Normen im Originalwortlaut (mit Hervorhebungen wichtiger Begriffe)

Art. 74 Abs. 1 und 2 BV

Art. 74 Umweltschutz

¹ Der Bund erlässt Vorschriften über den Schutz des Menschen und seiner natürlichen Umwelt vor **schädlichen oder lästigen** Einwirkungen.

² Er sorgt dafür, dass solche Einwirkungen vermieden werden. Die Kosten der Vermeidung und Beseitigung tragen die Verursacher.

Art. 1 Abs. 1 und 2 USG

Art. 1 Zweck

¹ Dieses Gesetz soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen **schädliche oder lästige** Einwirkungen schützen sowie die natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens, dauerhaft erhalten.

² Im Sinne der Vorsorge sind Einwirkungen, die **schädlich oder lästig** werden könnten, frühzeitig zu begrenzen.

Art. 8 USG

Art. 8 Beurteilung von Einwirkungen

Einwirkungen werden sowohl einzeln als auch gesamthaft und nach ihrem Zusammenwirken beurteilt.

Art. 13 USG

Art. 13 Immissionsgrenzwerte

¹ Für die Beurteilung der **schädlichen oder lästigen** Einwirkungen legt der Bundesrat durch Verordnung Immissionsgrenzwerte fest.

² Er berücksichtigt dabei auch die Wirkungen der Immissionen auf Personengruppen mit **erhöhter Empfindlichkeit**, wie Kinder, Kranke, Betagte und Schwangere.

Art. 15 USG

Art. 15 Immissionsgrenzwerte für Lärm und Erschütterungen

Die Immissionsgrenzwerte für Lärm und Erschütterungen sind so festzulegen, dass nach dem Stand der **Wissenschaft** oder der **Erfahrung** Immissionen unterhalb dieser Werte die **Bevölkerung** in ihrem **Wohlbefinden nicht erheblich stören**.

A.3 Für spezifische Fragestellungen erstellte gesonderte Auswertungen

Nicht direkt in der (peer-reviewten) publizierten Literatur behandelte Fragestellungen, die aber dennoch relevant für die Grenzwertfestlegung in der Schweiz sind, z.B. was die Zeitnutzung der Schweizer Bevölkerung betrifft, wurden im Auftrag der EKLK anhand von Daten der SiRENE-Befragung, ergänzt mit weiteren Schweizer Daten im Rahmen zusätzlicher Auswertungen, speziell für diesen Bericht erörtert. Die entsprechenden Auswertungen sind nachfolgend dokumentiert.

A.3.1 Zur Positionierung des Tages- und Nachtzeitraums

Anwesenheit zu Hause und Zeitperiode, die fürs Schlafen benutzt wird

Die Lärmgrenzwerte in der LSV beziehen sich im häufigsten Anwendungsfall auf das *Wohnen* (vgl. Kapitel 4.1). Um eine möglichst sinnvolle Aufteilung der Grenzwerte in eine Tages- und Nachtperiode zu erreichen, ist es angebracht zu untersuchen, wann sich die Bevölkerung überhaupt im eigenen Haus bzw. der eigenen Wohnung aufhält. Abbildung A.A.1 gibt hierzu eine Auswertung mit Daten aus der SiRENE-Studie (bzw. der Stichprobe der SiRENE-Befragung, vgl. [13]) wieder. Die Abbildung wird ergänzt durch eine Dichteverteilung, welche den geschätzten Anteil der Bevölkerung innerhalb der Schlafperiode wiedergibt (siehe hierzu auch das folgende Kapitel).

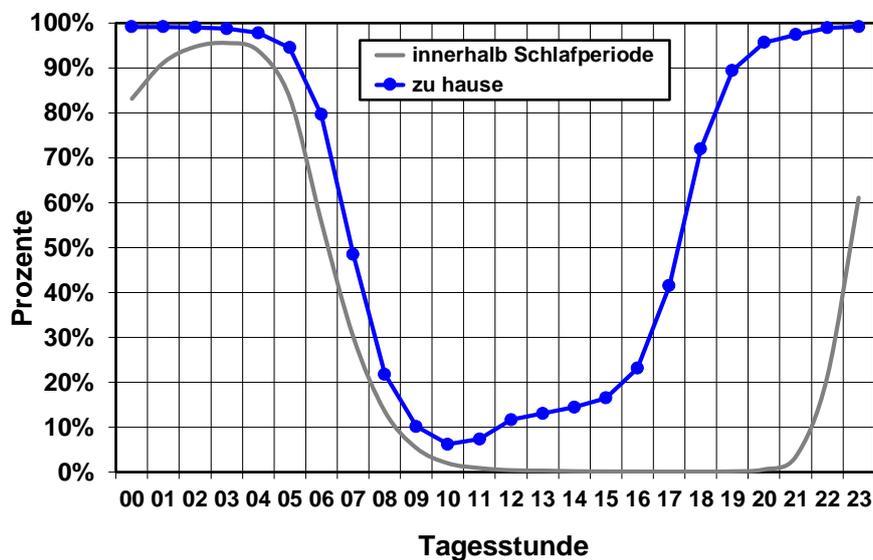


Abbildung A.A.1: Dichteverteilungen: Anwesenheit zu Hause (blau) und geschätzter Prozentsatz der Bevölkerung innerhalb der Schlafperiode (grau) als Funktion der Tagesstunde. Datengrundlage: SiRENE-Befragung (N = 5161 Befragte in der ganzen Schweiz).

Die Abbildung macht deutlich, dass im Tagesverlauf die Anwesenheit zu Hause auf den Zeitraum zwischen ca. 18 Uhr abends und 07 Uhr morgens konzentriert ist. Im Wachzustand erlebte Lärmbelastungen finden mehrheitlich zwischen ca. 18 und 22 Uhr statt. In diesem Zeitraum ist ein vergleichsweise hoher Anteil der erwachsenen Bevölkerung zu Hause, aber noch nicht am Schlafen.

Wann schläft die Schweizer Bevölkerung?

Der Zeitraum innerhalb des 24-Stunden-Tages, in welchem die Menschen schlafen, ist von Person zu Person unterschiedlich, wobei fast alle Menschen in der Nacht und nicht am Tag schlafen wollen (sofern sie können). Ausschlaggebend für die getrennte Beurteilung der Tages- und Nachtperiode (und damit einhergehend unterschiedliche Tages- und Nachtgrenzwerte) sollten deshalb grundsätzlich diejenigen Gewohnheiten der Bevölkerung sein, die im Wesentlichen bestimmen, welcher Zeitabschnitt für das Schlafen genutzt wird.

Seit dem Jahr 2000 sind in insgesamt vier Befragungsstudien [103-106] Daten über die Bettgeh- und Aufstehzeiten von insgesamt über 10 000 zufällig bestimmten Personen aus der Schweizer Bevölkerung gesammelt worden. Aus den individuellen Antworten (erfragter Einschlaf- und Aufwachzeitpunkt bzw. Bettgeh- und Aufstehzeitpunkt) dieses Datenpools wurden für den Zweck des vorliegenden Berichts sog. Schlafdichteprofile erstellt (Abbildung A.A.2). Solche Profile zeigen für diskrete Zeitintervalle (z.B. minuten- oder stundenweise) den prozentualen Anteil der innerhalb der Schlafperiode sich befindenden Personen in der jeweiligen Stichprobe (die im besten Fall für die Schweiz repräsentativ ist). Eine solche Darstellung hat den Vorteil, dass die tatsächliche Verteilung des von der ganzen (bzw. hier nur der Erwachsenen, da Kinder nicht befragt wurden) Bevölkerung (bzw. Stichprobe) *insgesamt* in der Schlafperiode verbrachten Zeitraums wiedergegeben wird. Es wird hierbei explizit in Kauf genommen, dass Personen mit langen Schlafdauern mit grösserem Gewicht eingehen (weil sie länger schlafen) als etwa Kurzschläfer mit geringerem Schlafbedürfnis. Dies entspricht mitunter der Forderung im Gesetz, auch Personengruppen mit erhöhter Empfindlichkeit (Art. 13 USG), bzw. hier übertragen «erhöhtem Schlafbedürfnis», bei der Grenzwertsetzung zu berücksichtigen. Auch Schlafperioden z.B. von Schichtarbeitern oder Personen mit sehr frühem («Lerchen») oder sehr spätem («Eulen») Chronotyp sind entsprechend ihrem Schlafverhalten 1:1 vertreten. Für die Berechnung in Abbildung A.A.2 wurde angenommen, dass das Einschlafen 15 Minuten nach dem Ins-Bett-Gehen und das finale Aufwachen 10 Minuten vor dem Aufstehen erfolgt. Um einen wöchentlichen Durchschnittswert zu erhalten wurden die Angaben zum Schlafverhalten unter der Woche mit 5/7 und am Wochenende mit 2/7 gewichtet. In Abbildung A.A.2 ist, nebst Profilen der Originalstudien [103-106], das mit der jeweiligen Stichprobengrösse gewichtete Durchschnittsprofil dargestellt und mit «Mittelwert» bezeichnet. Dieser Mittelwert dürfte die Schlafgewohnheiten von Schweizerinnen und Schweizern ziemlich gut repräsentieren.

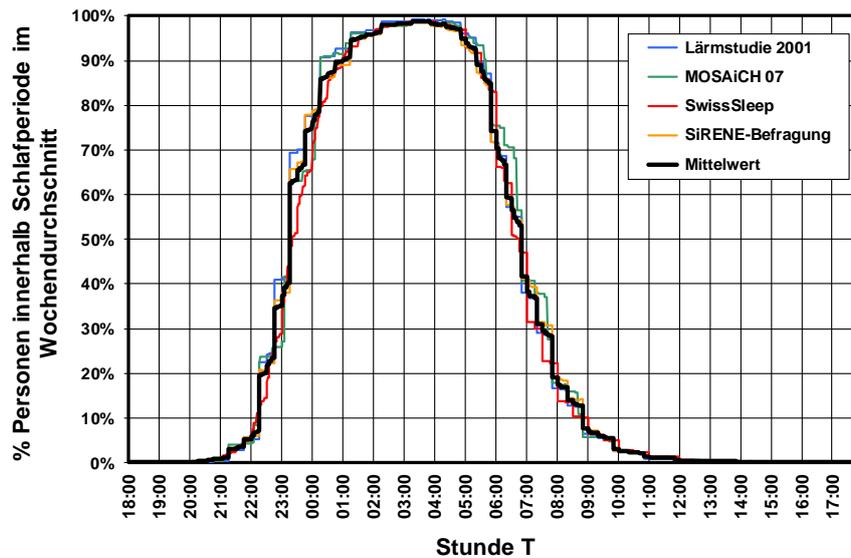


Abbildung A.A.2: Geschätzte Anteile der Schweizer Bevölkerung innerhalb der Schlafperiode in jeder Tagesstunde T zwischen 18 Uhr abends am Vortag und 18 Uhr abends am Folgetag an einem Durchschnittstag, minutlich aufgelöst. Dargestellt ist das Profil aus den vier Einzelstudien (Lärmstudie 2000 (Befragung 2001) [105]; MOSAiCH (Befragung 2007) [104]; BAFU-SwissSleep (Befragung 2011) [103]; SiRENE-Studie (Befragungen 2014 und 2015) [13, 14]) sowie der mit der jeweiligen Stichprobengrösse gewichtete Mittelwert aus allen vier Studien.

Aus Abbildung A.A.2 wird deutlich, dass mit dem Beginn der Nacht gemäss LSV (22:00 Uhr) lediglich ca. 5 % der erwachsenen Bevölkerung bereits innerhalb der Schlafenszeit sind, während am Ende der Nacht gemäss LSV (06:00 Uhr) noch ca. 70 % nicht final erwacht sind. Im Zeitraum zwischen 22 und 06 Uhr findet ca. 85 % des Gesamtschlafs statt. Damit werden etwa 15 % des Schlafs durch eine von 22–06 Uhr definierte Nachtperiode nicht erfasst.

Das Schlafverhalten der erwachsenen Bevölkerung ist an Arbeitstagen und Wochenenden unterschiedlich. An Wochenenden schläft die Bevölkerung im Durchschnitt später ein, wacht später auf, und die Schlafdauer ist insgesamt knapp eine Stunde länger. Abbildung A.A.3 zeigt die Schlafperiodendichte aus der SiRENE-Befragung getrennt nach Nächten vor bzw. nach Arbeitstagen (Sonntagabend bis Freitagmorgen) und Wochenendnächten (Freitagabend bis Sonntagmorgen).

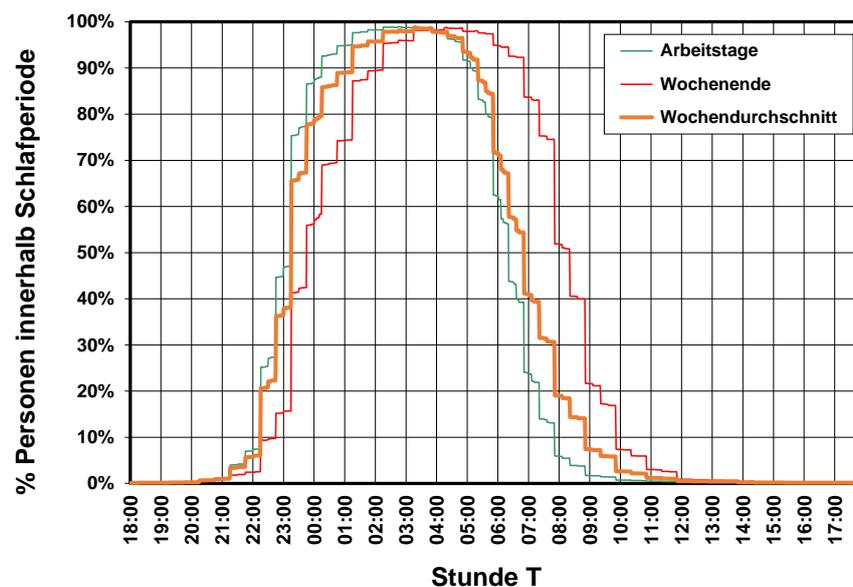


Abbildung A.A.3: Anteil der Stichprobe in der SiRENE-Befragung (2014 und 2015) [13, 14] innerhalb der Schlafperiode als Funktion der Tagesstunde T, zwischen 18 Uhr abends am Vortag und 18 Uhr abends am Folgetag, minütlich aufgelöst.

Zusammenfassen lassen sich die wichtigsten Erkenntnisse zum Schlafverhalten in der Schweiz folgendermassen:

- Es gibt keinen Zeitpunkt im 24-stündigen Tagesverlauf der erwachsenen Schweizer Bevölkerung, während dessen alle Menschen schlafen oder alle wach sind.
- Das Schlafverhalten der Bevölkerung ist an Arbeitstagen und Wochenenden unterschiedlich. An Wochenenden schläft die Bevölkerung gemäss selbstberichteter Angaben im Durchschnitt später ein, wacht später auf, und die Schlafdauer ist insgesamt knapp eine Stunde länger.
- Eine Verschiebung des zurzeit in der LSV definierten Nachtzeitraums (22–06 Uhr) um mindestens eine Stunde nach hinten, (d.h. auf 23–07 Uhr) würde die tatsächlichen Schlafgewohnheiten der Bevölkerung wesentlich besser widerspiegeln.

Einschränkend ist zu berücksichtigen, dass die genannten Untersuchungen nur die Schlafgewohnheiten der erwachsenen Bevölkerung erfasst haben. Kinder und Jugendliche schlafen erfahrungsgemäss länger bzw. gehen früher ins Bett als Erwachsene. Darüber hinaus machen diese Untersuchungen keine Aussagen darüber, ob und wann der Schlaf von bestimmten vulnerablen Gruppen (Kinder, Jugendliche, Alte, Kranke etc.) besonders geschützt werden sollte. Zu beachten ist auch, dass das empirisch beobachtete Schlafverhalten ggf. bereits aufgrund von lärmbelasteten Wohnsituationen als Ergebnis einer Bewältigungsstrategie angepasst wurde.

Wie lange und von wann bis wann sollte die «regulatorische Nacht» dauern?

Gemäss einer konsensuellen Erklärung der American Academy of Sleep Medicine und der Sleep Research Society sollte für die Erhaltung der Gesundheit bei Erwachsenen die Dauer (ungestörten) Schlafs sieben Stunden nicht unterschreiten [55]. Die für die Erholungsfunktion benötigte Schlafdauer ist darüber hinaus individuell gegeben und kann nicht durch Gewöhnung oder Training verkürzt werden. Daraus ergibt sich, dass der regulatorische Nachtzeitraum mindestens sieben Stunden umfassen sollte und im besten Fall derart festgelegt wird, dass der schlafende Anteil der Bevölkerung in diesem Zeitraum möglichst hoch ist. Grundsätzlich erscheint es als wünschenswert, den Schlaf der gesamten Bevölkerung möglichst vollständig vor Lärm zu schützen. Angesichts der Breite der Verteilung des Bevölkerungsanteils innerhalb der Schlafperiode (siehe Abbildung A.A.2) ist dies jedoch in der Praxis nicht zu erreichen. Aus präventiver Sicht wäre es hingegen wünschenswert, dass durch den die «Nacht» definierenden Zeitraum ein möglichst grosser Anteil der schlafenden Bevölkerung vor Lärm geschützt wird. Je nach gewähltem Anteil der berücksichtigten Fläche unter der Verteilung lässt sich ein «optimales», d.h. den Schutz maximierendes Zeitfenster angeben. Eine so definierte Zeitperiode kann als «Kernruhezeit» bezeichnet werden. In Abbildung A.A.4 wurden zwecks Ableitung einer solchen Kernruhezeit Daten aus der repräsentativen BAFU-Befragung zum Schlafverhalten in der Schweiz von 2011 [103] analysiert. Dadurch lassen sich für verschiedene Anteile des Gesamtschlafs der Schweizer Bevölkerung die Lage der Kernruhezeiten einerseits für Arbeitstage unter der Woche und andererseits für freie Tage bestimmen.⁹³ Der Gesamtschlaf wurde hier definiert als die Menge aller innerhalb der Schlafperiode befindlichen Minuten aller Personen in der Stichprobe (N = 2009), wobei diese Minuten auf der Zeitachse sich annähernd normal verteilen. Für einen beliebig vorgegebenen Anteil des Gesamtschlafs lässt sich ein Beginn und ein Ende der Schutzzeit ableiten, wenn an beiden Enden der Verteilung gleich viele «Schlafminuten» übrig bleiben. Als Ergebnis erhält man die kürzestmögliche Zeitperiode, in welcher der grösstmögliche (vorher festgelegte) Anteil des Gesamtschlafs stattfindet. Sollen z.B. mindestens 90 % des gesamten Schlafs der Bevölkerung sowohl an Arbeitstagen als auch an freien Tagen bzw. Wochenenden geschützt werden, dann müsste diese Ruhezeit von 23:07 bis 08:29 Uhr dauern (vgl. Abbildung A.A.4).

⁹³ Für die Auswertung wurde gezielt auf Originaldaten aus [103] zurückgegriffen (und nicht etwa auf die SiRENE-Studie), da nur in dieser Befragung präzise Einschlaf- und Aufwachzeitpunkte erfragt wurden.

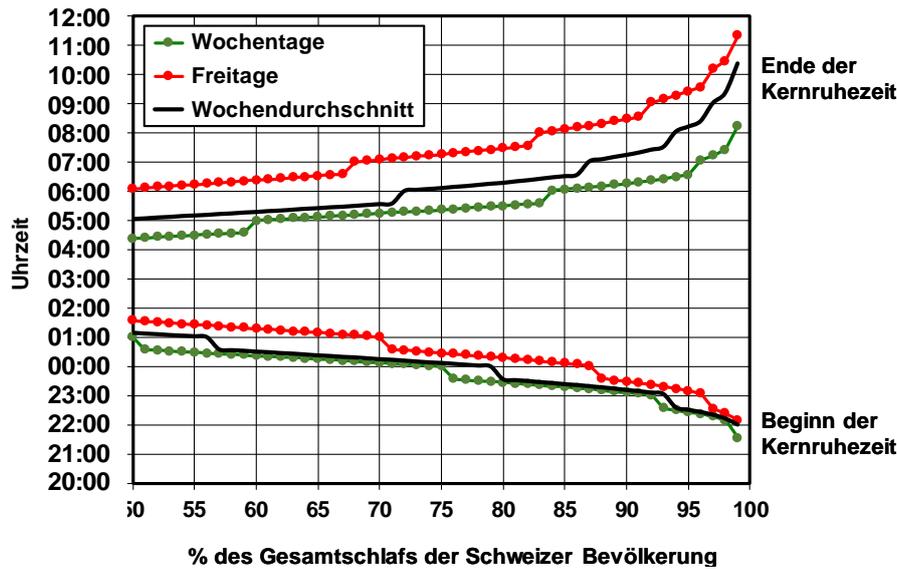


Abbildung A.A.4: Beginn und Ende der Kernruhezeit als Funktion des prozentualen Anteils des Gesamtschlafs der Schweizer Bevölkerung, jeweils für Wochentage (grün) und freie Tage bzw. Wochenenden (rot) sowie für den Wochendurchschnitt (schwarz), wobei bei Letzterem die Wochenenden mit 2/7 und die Tage unter der Woche mit 5/7 gewichtet werden. Ermittelt anhand der Daten der repräsentativen BAFU-Umfrage 2011 [103].

Die mittlere Schlafdauer alleine begründet allerdings noch keinen umfassenden Schutz, denn zumindest diejenige Zeitdauer, die für das Einschlafen und ganz allgemein das Entspannen vor dem Schlafengehen benötigt wird, müsste durch den Schutzzeitraum ebenfalls abgedeckt werden.

A.3.2 Tageszeitabhängige Lärmempfindlichkeit (bezogen auf Belästigung)

Neben der oben diskutierten grundsätzlichen Tag-Nacht-Unterscheidung sind weitere zeitliche Differenzierungen möglich, welche die tageszeitabhängig unterschiedliche Belästigung durch Lärm feinteiliger (also z.B. stundenweise) abbilden. Im Rahmen der Beurteilung unterschiedlicher Zeitperioden wäre es wünschenswert, den Wirkungsunterschied zwischen Zeitperioden bzw. Einzelstunden mit eher geringer Empfindlichkeit gegenüber solchen mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Lärmbelastungen auf der Dezibel-Skala ausdrücken zu können. Zu diesem Zweck wurden aus den Antworten der SiRENE-Befragung [13] zu «Zeiten besonders starker Störung/Belästigung» für jede Lärmart mit verfügbaren Daten und jede Person für jede der täglich 24 Stunden ermittelt, ob sich die Person (in dieser Tagesstunde) durch die entsprechende Lärmart stark gestört oder belästigt fühlte (Code = 1) oder nicht (Code = 0). Dies ergab eine Datenmatrix, die mit dem jeweiligen 1-h- L_{eq} -Wert am lautesten Fassadenpunkt für jede der 24 Stunden (bzw. 17 Stunden beim Fluglärm, da in der Kernnacht in der Schweiz

nicht geflogen wird) ergänzt wurde. Mittels hierarchischer logistischer Regression, bei welcher die Wahrscheinlichkeit, in einer bestimmten Tagesstunde stark gestört oder belästigt zu werden, auf die Tagesstunde (als Faktor) und den entsprechenden 1-h- L_{eq} in dieser Stunde (als Kovariate) regressiert wurde, konnten dann stündliche Lärmempfindlichkeitswerte in dB berechnet werden, welche die Variabilität der Belästigung im Tagesverlauf abbilden können. Minus-Werte geben dabei an, dass Personen in dieser Stunde weniger belästigt sind als im Tagesdurchschnitt, Plus-Werte zeigen eine höhere Belästigung als im Tagesdurchschnitt an. Die Berechnungsmethode hierfür ist in [107] im Detail dokumentiert. Das statistische Modell wurde mit der Statistiksoftware R (Version 3.5.1) mittels der Prozedur «lme4 glmer» erstellt und wurde adjustiert für Geschlecht, Alter, Befragungsmodus und Sprachversion des Fragebogens. Das resultierende Profil ist in Abbildung A.A.5 dargestellt. Die ermittelten, in dB ausgedrückten Werte auf der y-Achse («Tageszeitabhängige Lärmempfindlichkeit») geben an, wie stark die Belästigung in einer bestimmten Tagesstunde von der Belästigung im Tagesmittel, in dB ausgedrückt, abweicht. Dem Verfahren entsprechend summieren sich die 24 Werte für Strassen- und Eisenbahnlärm bzw. die 17 Werte für Fluglärm jeweils auf 0 dB.

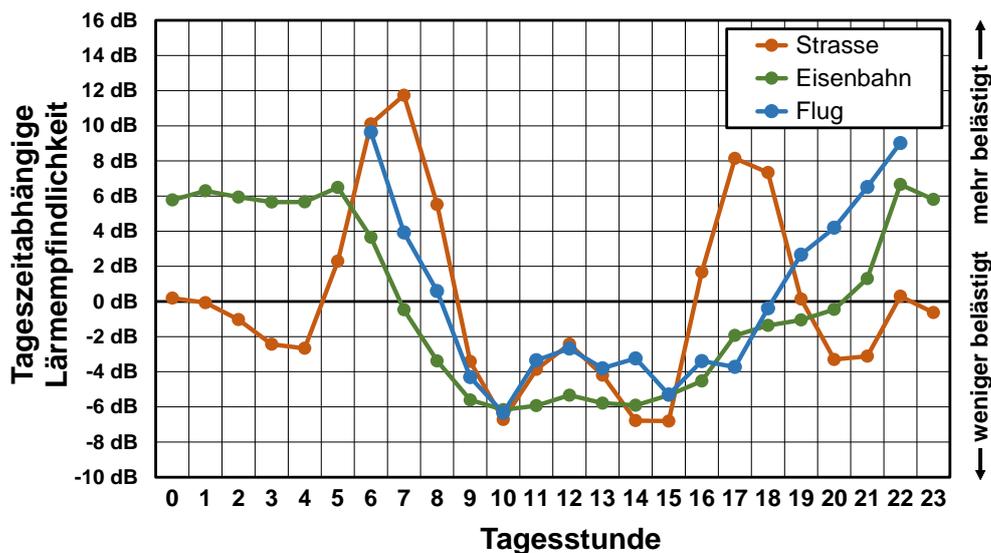


Abbildung A.A.5: Tageszeitabhängige Lärmempfindlichkeit, ermittelt anhand der Daten aus der SiRENE-Befragung. Zur besseren Lesbarkeit wurde auf das Einzeichnen von Konfidenzintervallen verzichtet. In die Auswertung eingehende Anzahl 1-h-Urteile: Strassenlärm N = 123'749; Bahnlärm N = 87'019; Fluglärm N = 56'463.

Die in der obigen Abbildung dargestellten Profile deuten darauf hin, dass in der von der Kommission empfohlenen Nachtperiode (zwischen 22 und 07 Uhr) die stündlichen Belästigungswerte um bis zu +10 dB für Flug- und Strassenlärm und um bis zu +6 dB für Eisenbahnlärm höher sind als im Tagesdurchschnitt. Auffallend sind die starken

Belästigungs-Spitzen während der Stosszeiten (06–08 Uhr, 17–19 Uhr) beim Strassenlärm. Notabene: Die in Abbildung A.A.5 dargestellten Dezibelwerte sind bereits um den Einfluss des jeweiligen 1-h- L_{eq} (der zu Stosszeiten höher ist als im 24-h-Mittel) korrigiert, d.h. die beobachteten Abweichungen vom Mittelwert (bei 0 dB) sind lediglich der Tagesstunde an sich, nicht aber der Lärmbelastung in der jeweiligen Tagesstunde zuzurechnen.

A.3.3 Zusammenhang zwischen 1-h-Exposition und Störung/Belästigung in einzelnen Nachtstunden

Die Kommission erörterte die Möglichkeit, für einzelne Stunden während der Nacht gesonderte 1-Stunden-Grenzwerte zu empfehlen (vgl. Kapitel 4.4). Es bedurfte daher einer Abschätzung des Expositions-Wirkungszusammenhangs innerhalb jeder einzelnen (Nacht-)Stunde. Derart zeitlich fein aufgelöste Informationen über Lärmwirkungen existieren bei epidemiologischen Studien zu z.B. kardiometabolischen Auswirkungen kaum, allerdings bot die Befragung der SiRENE-Studie [13, 14] eine Möglichkeit, stundenspezifische Expositions-Wirkungsfunktionen für starke Störung/Belästigung zu modellieren. In der SiRENE-Befragung hatten die antwortenden Personen die Möglichkeit, für jede Lärmart speziell störende oder belästigende Zeiträume im Tagesverlauf anzugeben. Für jede Tagesstunde wurde dann festgehalten, ob sich die Person in dieser Tagesstunde (durch eine bestimmte Lärmquelle) stark gestört oder belästigt fühlte (Code = 1) oder nicht (Code = 0). Dies ergab eine Datenmatrix mit 24 Fällen pro Person und Lärmquelle, die mit dem jeweiligen 1-h- L_{eq} -Wert der entsprechenden Lärmquelle ergänzt wurde. Somit lagen pro Person bis zu $3 \times 24 = 72$ Einzelstunden-Belästigungsurteile vor. In einem hierarchischen Mehrebenen-Modell wurde der Einfluss von Lärmart und Tagesstunde, als «fixed effects», auf die Wahrscheinlichkeit, in dieser Stunde besonders gestört oder belästigt zu werden, ermittelt. Im Modell wurde die antwortende Person als «random intercept effect» definiert und der jeweilige Lärmart-bezogene 1-h- L_{eq} -Wert als Kovariate eingesetzt, um eine Pegel-unabhängige Schätzung des Einflusses der Tagesstunde (bzw. Nacht-Stunde) zu erhalten. Ins Modell gingen nur die Stunden zwischen 22 Uhr abends und 07 Uhr morgens ein. Das Modell wurde adjustiert für Geschlecht, Alter, Sprachversion des Fragebogens und Befragungsmodus. Es wurde sowohl ein Modell mit dem Interaktionsterm 1-h- $L_{eq} \times$ Tagesstunde berechnet (um nicht-parallele Expositions-Wirkungskurven modellieren zu können), als auch eines ohne diese Interaktion. Der zwecks Modellgütevergleich durchgeführte Loglikelihood Ratio Test ergab, dass das Modell mit Interaktionsterm vorzuziehen war. Dessen Ergebnisse sind schliesslich in Abbildung A.A.6 dargestellt: Diese zeigt auf dem 1-h- L_{eq} basierende Expositions-Wirkungsbeziehungen für jeweils die einzelnen Nachtstunden zwischen 22 Uhr abends und 07 Uhr morgens (bzw. für die Stunden 22–23, 23–24, 05–06, 06–07 Uhr beim Fluglärm). Die Auswertung erfolgte mit R Version 3.5.1 mittels der Prozedur «lme4 glmer».

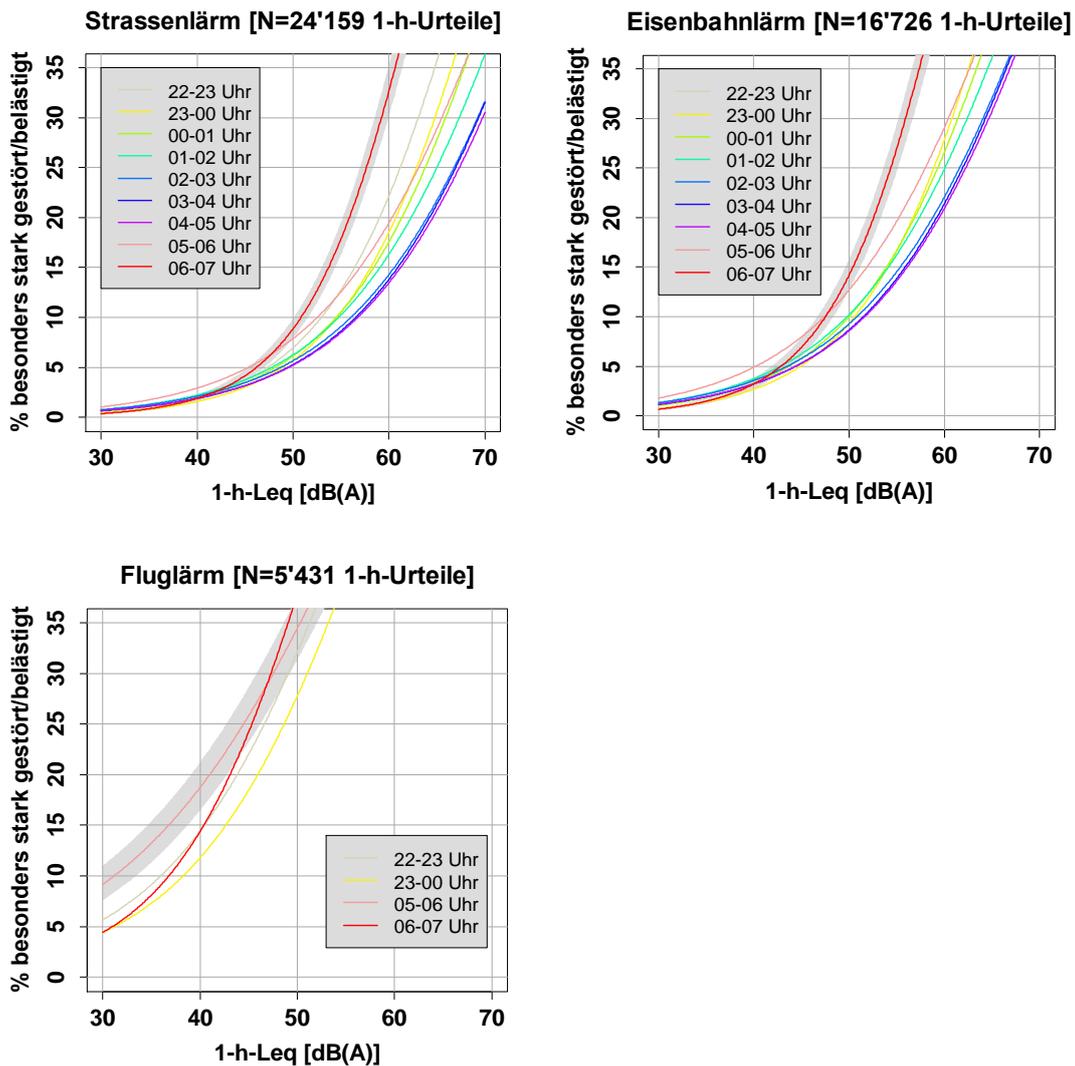


Abbildung A.A.6: Prozentsatz der in einer bestimmten Nachtstunde stark Gestörten/Belästigten als Funktion des 1-h- L_{eq} in dieser Nachtstunde für die drei Verkehrslärmquellen Strassenlärm (links oben), Eisenbahnlärm (rechts oben), Fluglärm (unten). Die Kurven wurden anhand eines adjustierten Mehrebenen-Modells mit Daten der SiRENE-Befragung berechnet und sind für zentrierte Kovariaten dargestellt. Konfidenzintervalle sind beim Strassen- und Eisenbahnlärm für die Stunde von 06–07 Uhr dargestellt, beim Fluglärm für die Stunde von 05–06 Uhr.

A.3.4 Auswertungen zur Frage, ob Personen je nach Empfindlichkeitsstufe (ES) des Wohnorts unterschiedlich lärmempfindlich sind

In der SiRENE-Befragung [13, 14] wurden die teilnehmenden Personen zu ihrer «generellen» und zu ihrer «Schlaf-bezogenen» Lärmempfindlichkeit befragt. Dazu wurde die NoiSeQ-R-Itembatterie [108] bzw. deren Kurzform mit 13 Items [109] eingesetzt. Da bei jeder Person die zugewiesene Empfindlichkeitsstufe (ES) der Wohnadresse bekannt war, liess sich ermitteln, ob zwischen zugewiesener ES und individueller Lärmempfindlichkeit ein Zusammenhang besteht. Getestet wurde dies einerseits für den Zusammenhang zwischen genereller Lärmempfindlichkeit und L_{den} sowie für den Zusammenhang zwischen Schlaf-bezogener Lärmempfindlichkeit und L_{night} . Dazu wurde für jede Lärmart (Strassen-, Eisenbahn-, Fluglärm) ein lineares Regressionsmodell für den NoiSeQ-R-Score berechnet, welches für folgende Prädiktor-Variablen (nebst ES) und potenziellen Confounder adjustiert war: L_{den} bzw. L_{night} am lautesten Fassadenpunkt, Alter, Geschlecht, Befragungsmodus, Sprachversion des Fragebogens, Hauseigentümerschaft. Das Modell beinhaltete zudem den Interaktionsterm $ES \times L_{den}$ bzw. $ES \times L_{night}$.

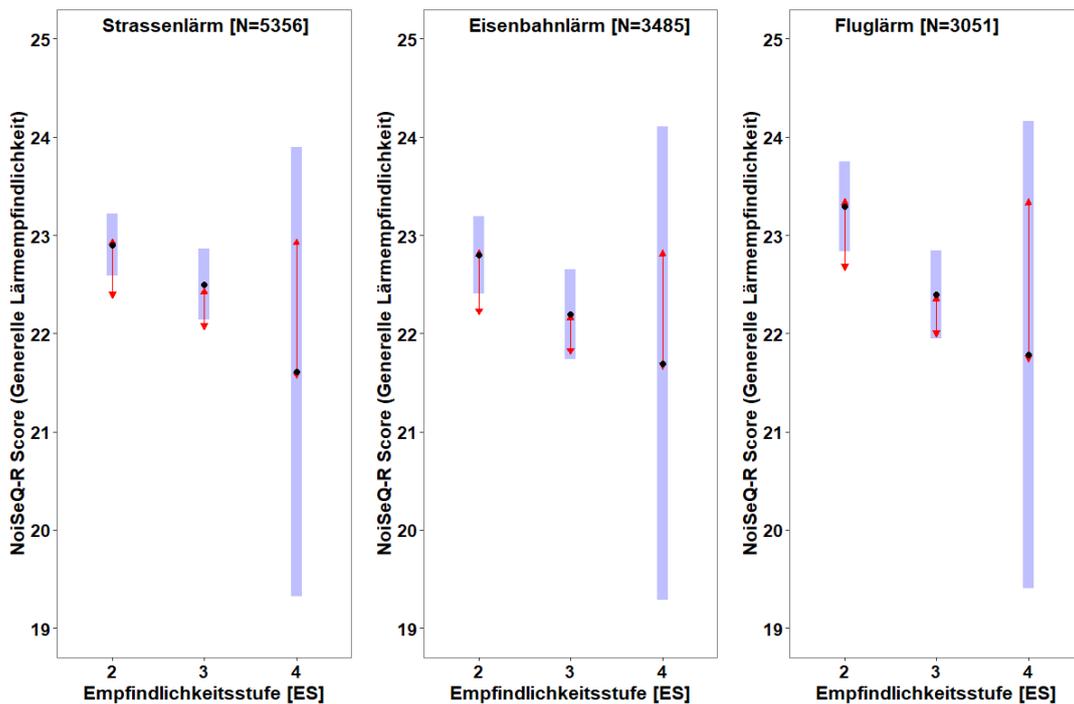


Abbildung A.A.7: Geschätzte Randmittelwerte (schwarze Punkte) des in der SiRENE-Befragung erhobenen NoiSeQ-R-Score für die generelle Lärmempfindlichkeit bei Anwohner/innen den ES II, III, und IV inkl. 95%-Konfidenzintervall (hellblaue Balken). Der rote Doppelpfeil zeigt an, ob zwischen zwei ES ein paarweiser signifikanter Unterschied besteht oder nicht. Überlappen sich die Pfeile zwischen zwei ES nicht, besteht zwischen diesen ein **signifikanter Unterschied** in der generellen Lärmempfindlichkeit.

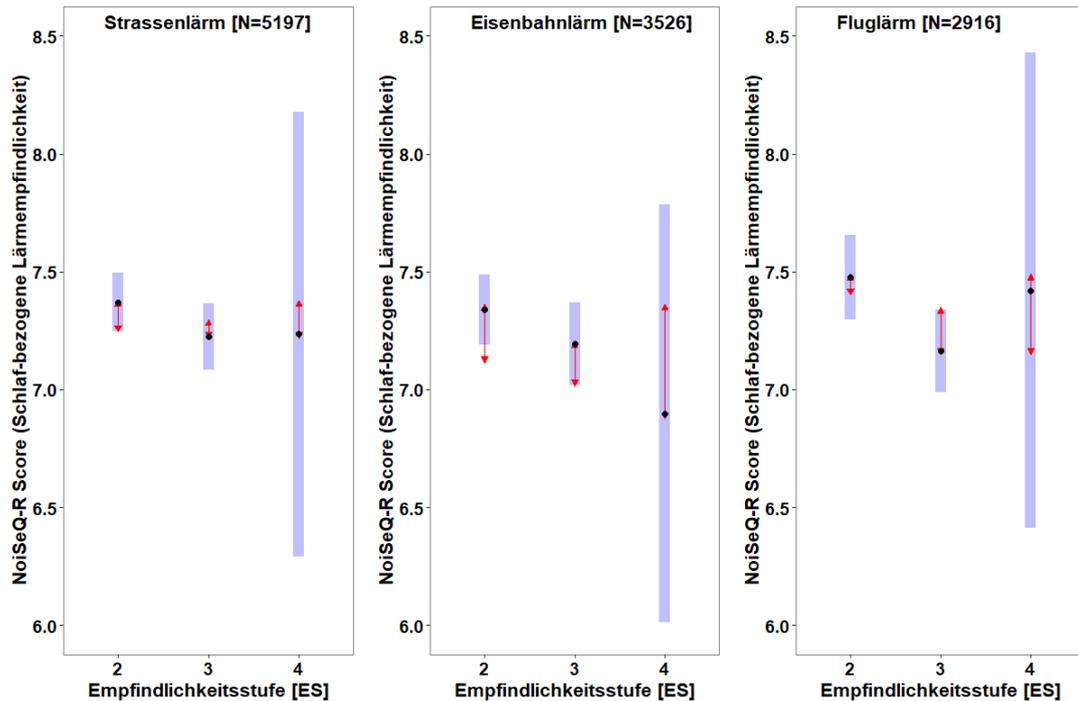


Abbildung A.A.8: Geschätzte Randmittelwerte (Estimated marginal means) (schwarze Punkte) des in der SiRENE-Befragung erhobenen NoiSeQ-R-Score für die Schlaf-bezogene Lärmempfindlichkeit bei Anwohner/innen in den ES II, III, und IV inkl. 95%-Konfidenzintervall (hellblaue Balken). Der rote Doppelpfeil zeigt an, ob zwischen zwei ES ein paarweiser signifikanter Unterschied besteht oder nicht. Überlappen sich die Pfeile zwischen zwei ES **nicht**, besteht zwischen diesen ein **signifikanter Unterschied** in der Schlaf-bezogenen Lärmempfindlichkeit.

Die Resultate sind in den Abbildungen A.A.7 (allgemeine Lärmempfindlichkeit) und A.A.8 (Schlaf-bezogene Lärmempfindlichkeit) in Form von geschätzten Randmittelwerten (estimated marginal means) für die ES II, ES III und ES IV (in der ES I wurde niemand befragt) mit 95%-Konfidenzintervallen wiedergeben. Die Auswertung erfolgte mit R Version 3.5.1 mit den Funktionen «lm» und «emmeans». Für Mehrfachvergleiche wurde mittels Tukey HSD-Test adjustiert. Das Signifikanzniveau wurde auf 0.05 festgelegt.

Aus den Abbildungen A.A.7 und A.A.8 ergibt sich, dass die Bewohner und Bewohnerinnen der ES II etwas lärmempfindlicher sind als diejenigen der ES III. Der Effekt der ES ist aber in den jeweiligen statistischen Modellen als Haupteffekt nicht signifikant und ist eher gering angesichts der Interquartilweite (IQW) des NoiSeQ-R-Lärmempfindlichkeitsscores (generelle Lärmempfindlichkeit IQW=10; Schlaf-bezogene Lärmempfindlichkeit IQW=4). Es finden sich allerdings signifikante Post-hoc-Kontraste zwischen Bewohner/innen der ES II und ES III beim Fluglärm, und zwar sowohl für die generelle als auch für die Schlaf-bezogene Lärmempfindlichkeit. Das heisst, dass im Fluglärm-Modell Bewohner/innen der ES II signifikant lärmempfindlicher sind als sol-

che in der ES III (notabene: unabhängig von der tatsächlichen Lärmbelastung). Möglicherweise sind hierfür Selbstselektionseffekte massgebend (z.B. mehr ältere Eigenheimbesitzer/innen in der ES II bzw. in ländlichen Gegenden).

Nebst dem oben geprüften Zusammenhang zwischen ES und Lärmempfindlichkeit besteht möglicherweise ein Zusammenhang zwischen ES und Belästigung (%HA) bzw. selbstberichteter Schlafstörung (%HSD), die unabhängig ist von der tatsächlichen Belastung. Um den modifizierenden Effekt der ES in Expositions-Wirkungsmodellen für Belästigung und Schlafstörung zu ermitteln, wurde abermals auf die SiRENE-Befragungsdaten zurückgegriffen und Expositions-Wirkungsfunktionen für Belästigung (%HA) und Schlafstörung (%HSD) in Abhängigkeit der ES mittels logistischer Regression berechnet. Dazu wurde ein adjustiertes Modell spezifiziert (adjustiert für die Kovariaten Alter, Geschlecht, Befragungsmodus, Sprachversion des Fragebogens). Nebst der ES als Prädiktor beinhaltete das Modell zudem den Interaktionsterm $ES \times L_{den}$ bzw. $ES \times L_{night}$ (um nicht-parallele Expositions-Wirkungskurven modellieren zu können).

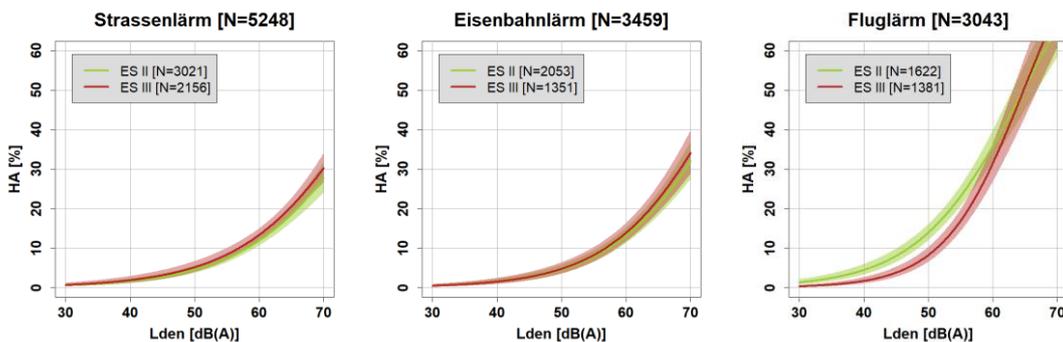


Abbildung A.A.9: Expositions-Wirkungskurven (inkl. 95%-Konfidenzintervall) für %HA als Funktion des L_{den} bei Anwohner/innen der ES II und ES III. Die Kurven wurden anhand eines adjustierten Modells mit Daten der SiRENE-Befragung berechnet und sind für zentrierte Kovariaten dargestellt.

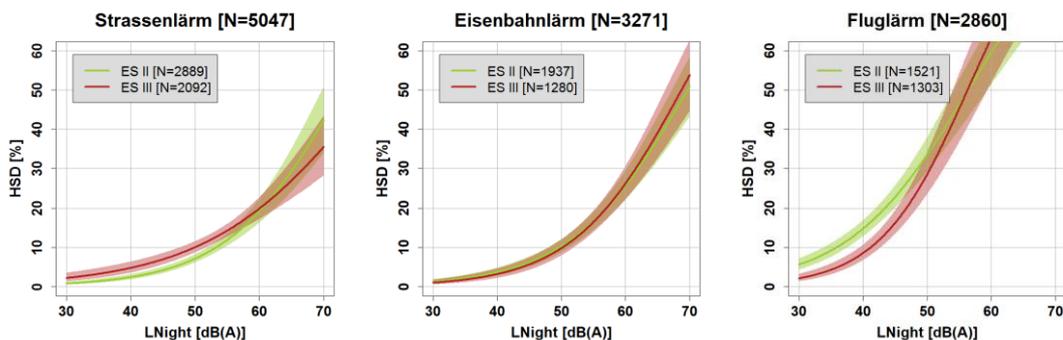


Abbildung A.A.10: Expositions-Wirkungskurven (inkl. 95%-Konfidenzintervall) für %HSD als Funktion des L_{night} bei Anwohner/innen der ES II und ES III. Die Kurven wurden anhand eines adjustierten Modells mit Daten der SiRENE-Befragung berechnet und sind für zentrierte Kovariaten dargestellt.

Die resultierenden Kurven (getrennt für ES II und ES III) sind in den Abbildungen A.A.9 (%HA) und A.A.10 (%HSD) wiedergegeben (auf eine Darstellung der Kurven für die ES I und IV wird verzichtet, da es für diese ES kaum Fälle gibt). Die Auswertung erfolgte mit R Version 3.5.1 mittels der Funktion «glm». Das Signifikanzniveau wurde auf 0.05 festgelegt.

Wiederum zeigen sich vor allem bei der Lärmart Fluglärm modifizierende Effekte der ES auf Belästigung und Schlafstörungen. In der ES II sind Befragte sowohl etwas belästigter (Tukey HSD $p=0.0002$) als auch geringfügig häufiger in ihrem Schlaf gestört (Tukey HSD $p=0.0002$) als in der ES III. Der Unterschied beträgt auf der Dezibel-Skala einige wenige dB (sichtbar anhand der Verschiebung der Kurven gegeneinander auf der x-Achse). Möglicherweise ist ein Maskierungs-Effekt hierfür ausschlaggebend, insofern als in reinen Wohnzonen der ES II tendenziell der Umgebungslärmpegel (z.B. durch Strassenlärm) geringer ist als in der ES III und dadurch Fluggeräusche in Zonen der ES II besser wahrnehmbar sind.

A.3.5 Auswertungen zum Ausmass möglicher Pegelkorrekturen

Belästigungs-Unterschiede zwischen Quellen (Pegelkorrekturen erster Art)

Abbildung A.A.11 zeigt Expositions-Wirkungsbeziehungen für %HA, bezogen auf den 15h-Tagesmittelungspegel $L_{\text{day},07-22\text{h}}$ (links), und für %HSD, bezogen auf den 9h-Nachtmittelungspegel $L_{\text{night},22-07\text{h}}$ (rechts), aus Daten der SiRENE-Befragung [13, 14]. In beiden Plots sind die Kurven basierend auf den Prädiktoren eines jeweils adjustierten Modells (adjustiert für die Kovariaten Geschlecht, Alter, Befragungsmodus, Sprache des Fragebogens) und mit 95%-Konfidenzbereich (schattierte Flächen) berechnet worden und für zentrierte Kovariaten dargestellt.

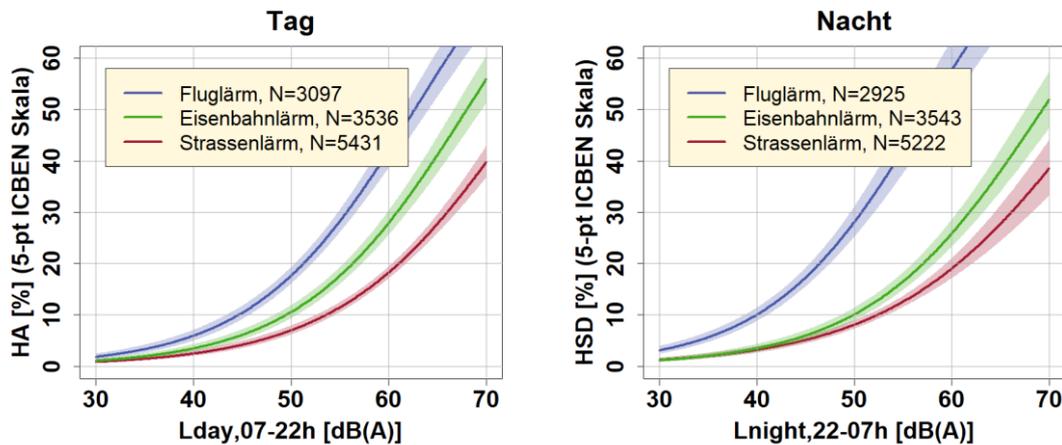


Abbildung A.A.11: Expositions-Wirkungskurven für drei verschiedene Lärmarten und zwei Beurteilungszeiträume aus der SiRENE-Studie. Links: Zusammenhang zwischen $L_{\text{Day},07-22h}$ (tags) und %HA (ermittelt anhand ICBEN-5-Punkte-Skala); rechts: Zusammenhang zwischen $L_{\text{Night},22-07h}$ (nachts) und %HSD (ermittelt mit einer 5-Punkte-Skala ähnlich der ICBEN-Skala).

Es wird beim Endpunkt %HA deutlich, dass eine klare Abstufung vorliegt mit Fluglärm, welcher bei gleichem Pegel am meisten belästigt, gefolgt von Eisenbahnlärm und Strassenlärm. Die Verschiebungen der einzelnen Expositions-Wirkungsbeziehungen zueinander betragen auf der x-Achse jeweils ca. 5 dB. Man kann dies so interpretieren, dass Fluglärm gleichen Pegels ca. 5 dB belästigender empfunden wird als Bahnlärm, und ca. 10 dB belästigender als Strassenlärm. Würden Grenzwerte für die Tagperiode ausschliesslich aufgrund des Endpunkts Belästigung festgelegt, so müssten sich die Grenzwerte für Strassen, Schienen- und Fluglärm um jeweils 5 dB unterscheiden. Ein «Schienenbonus» scheint nicht gerechtfertigt. Ein sehr ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Schlafstörungen (Abbildung A.A.10 rechts), wobei auch hier Eisenbahnlärm als um ca. 2–3 dB störender empfunden wird als Strassenlärm.

Einfluss der Verkehrsmengen auf Belästigung und starke Schlafstörung (Pegelkorrekturen zweiter Art)

Strassenlärm: Abbildung A.A.12 zeigt Expositions-Wirkungsbeziehungen für %HA (ermittelt anhand 5-Punkt-Skala), bezogen auf den 16h-Tagesmittelungspegel (links), und für %HSD (ermittelt anhand einer 5-Punkt-Skala ähnlich der ICBEN Skala), bezogen auf den 8h-Nachtmittelungspegel (rechts), für drei unterschiedliche Kategorien von Verkehrsmengen (gemäss LSV Anhang 3: $N > 100$ Fzg./h, $N \leq 100$ Fzg./h, $N < 32$ Fzg./h) aus der SiRENE-Befragung [13, 14]. In beiden Plots sind die Kurven basie-

rend auf den Prädiktoren eines adjustierten Modells (Geschlecht, Alter, Befragungsmodus, Sprachversion des Fragebogens) und mit 95%-Konfidenzbereich (schattierte Flächen) berechnet worden und für zentrierte Kovariaten dargestellt.⁹⁴

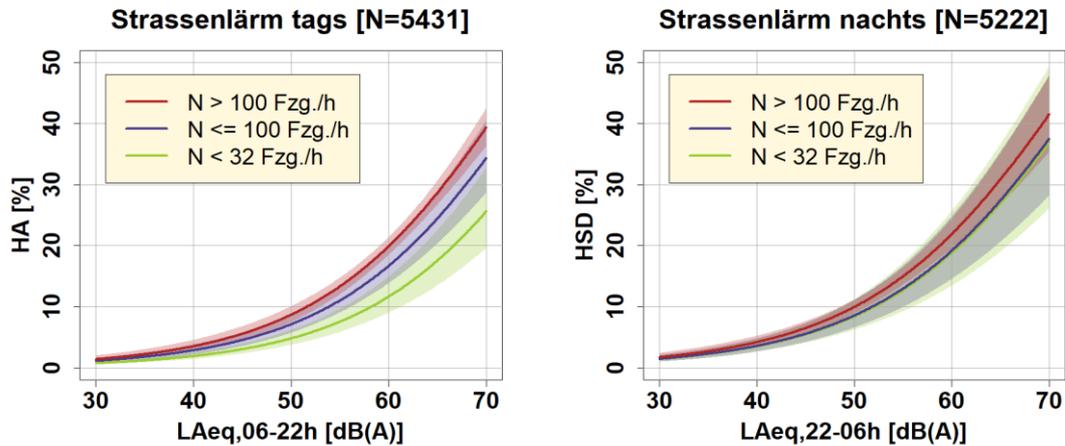


Abbildung A.A.12: Expositions-Wirkungskurven für Strassenlärm für drei verschiedene Verkehrsmengen-Kategorien aus der SiRENE-Studie. Links: Zusammenhang zwischen $L_{Aeq,06-22h}$ (tags) und %HA; rechts: Zusammenhang zwischen $L_{Aeq,22-06h}$ (nachts) und %HSD.

Aus Abbildung A.A.12 links wird ersichtlich, dass wenig befahrene Strassen ($N < 32$ Fzg./h) bei gleichem Mittelungspegel tagsüber (d.h. zwischen 06 und 22 Uhr) etwas weniger stören oder belästigen, was eine Verkehrsmengen-Korrektur von ca. 4–5 dB für wenig befahrene Strassen für die Tagperiode rechtfertigen würde. Dieser Effekt ist im Modell signifikant. Während der Nachtzeit (Abbildung A.A.12 rechts) zeigt sich kein signifikanter modifizierender Effekt.

Eisenbahnlärm: Abbildung A.A.13 zeigt Expositions-Wirkungsbeziehungen für %HA, bezogen auf den 16h-Tagesmittelungspegel (links), und für %HSD, bezogen auf den 8h-Nachtmittelungspegel (rechts), für drei verschiedene Kategorien von Anzahl Zugs vorbeifahrten⁹⁵ innerhalb der jeweiligen Beurteilungsperiode (Kategorisierung gemäss LSV Anhang 4: $N > 79$ Züge, $N \leq 79$ Züge, $N < 7.9$ Züge) aus der SiRENE-Befragung [13, 14]. In beiden Plots sind die Kurven basierend auf den Prädiktoren des adjustierten Modells (Geschlecht, Alter, Befragungsmodus, Sprachversion des Fragebogens)

⁹⁴ Die statistischen Modelle zur Berechnung der Kurven beinhalteten zunächst als zusätzlichen Prädiktor den Interaktionsterm zwischen Pegel und Verkehrsmenge. War der Interaktionsterm im Modell nicht signifikant, wurde er wieder entfernt, und es wurde ohne Interaktionsterm modelliert.

⁹⁵ Als «Ereignisse» wurden Zugs vorbeifahrten definiert, welche gemäss Berechnungsmethode zur Ermittlung der Intermittency Ratio (IR) [110] oberhalb des definierten Schwellenwerts liegen, also deutlich aus dem Hintergrundgeräusch hervortreten. Diese Ereignisse sind nicht direkt vergleichbar mit der Anzahl Zugsfahrten N , gemäss LSV Anhang 4, Ziff. 33.

und mit 95%-Konfidenzbereich (schattierte Flächen) berechnet worden und für zentrierte Kovariaten dargestellt.⁹⁶

Die Kurven für die drei verschiedenen Verkehrsmengen-Kategorien in Abbildung A.A.13 links liegen alle nahe beieinander und sind nur wenig gegeneinander verschoben. Daraus lässt sich schliessen, dass verkehrsmengenabhängige Pegelkorrekturen beim Eisenbahnlärm tagsüber nicht gerechtfertigt sind. In Abbildung A.A.13 rechts (d.h. für die Nacht) legt die Expositions-Wirkungsbeziehung für seltene Zugsvorbeifahrten (grün, <7.9 Züge pro Nacht) zwar eine Verkehrsmengen-bezogene Korrektur nahe, der Effekt ist aber nicht signifikant und das Konfidenzintervall gross.

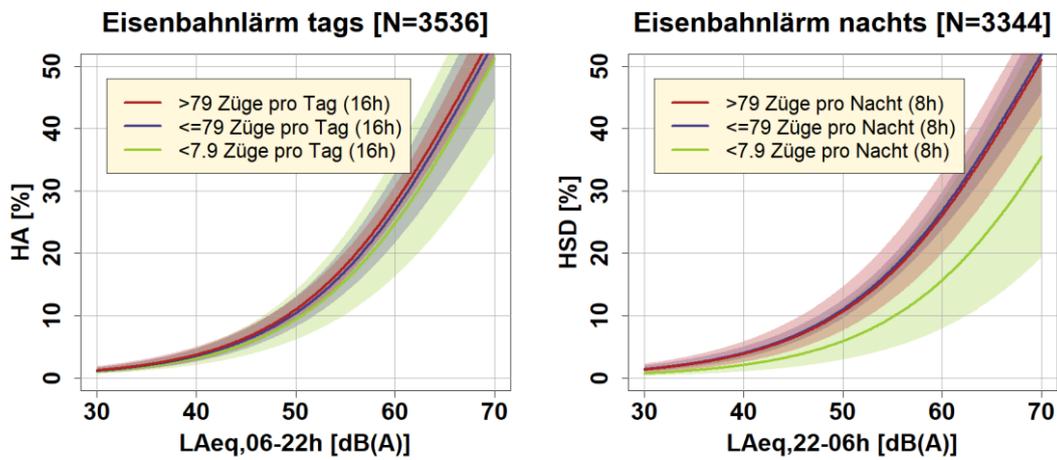


Abbildung A.A.13: Expositions-Wirkungskurven für Eisenbahnlärm für drei verschiedene Verkehrsmengen-Kategorien aus der SiRENE-Studie. Links: Zusammenhang zwischen $L_{Aeq,06-22h}$ (tags) und %HA (ermittelt anhand IC BEN-5-Punkte-Skala); rechts: Zusammenhang zwischen $L_{Aeq,22-06h}$ (nachts) und %HSD (ermittelt mit einer 5-Punkte-Skala ähnlich der IC BEN-Skala). In beiden Modellen ist der Effekt der Verkehrsmenge nicht signifikant.

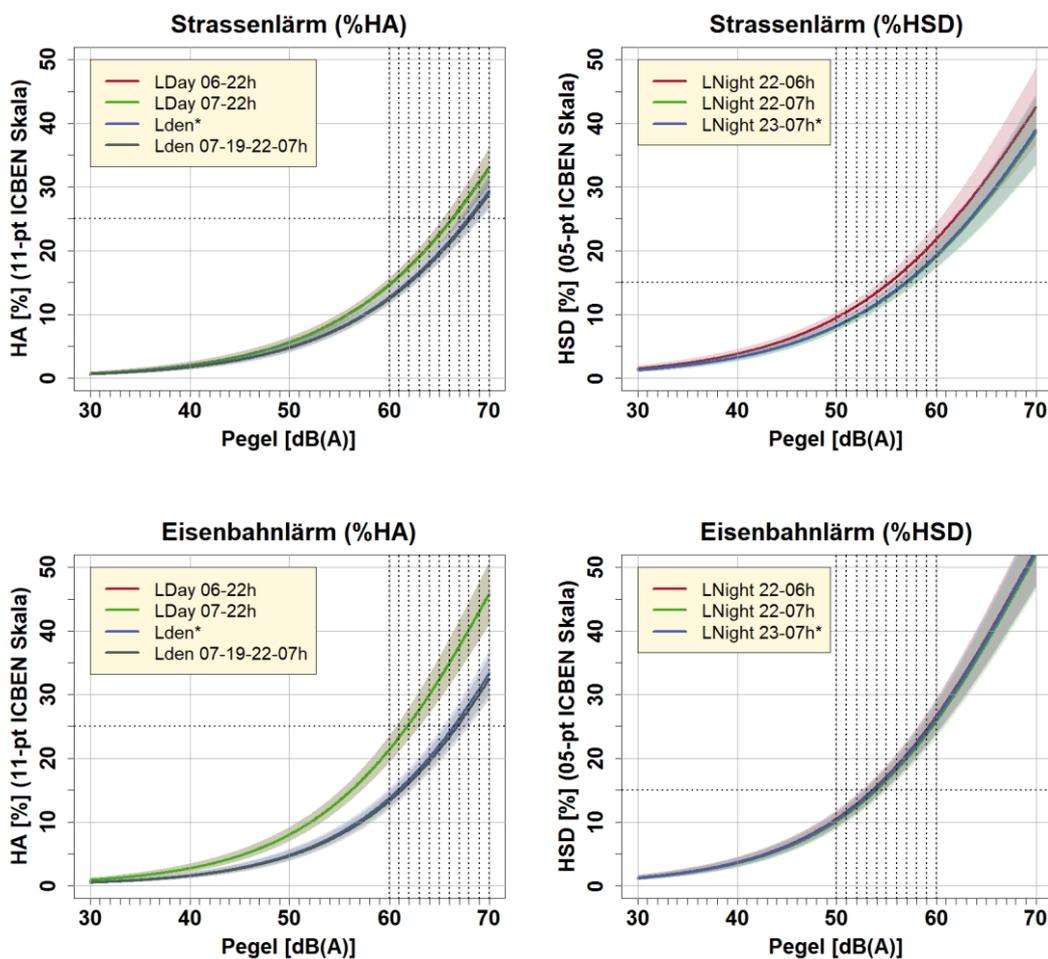
A.3.6 Expositions-Wirkungsmodelle für %HA und %HSD bei verschiedenen zugrunde gelegten Belastungsmassen

Unterschiedliche Belastungsmasse, die als massgebende Expositionsvariable in statistischen Expositions-Wirkungsmodellen zum Zuge kommen, erzeugen naturgemäss auch mit Daten derselben Stichprobe leicht voneinander abweichende Expositions-Wirkungsbeziehungen bzw. -kurven. Solche Unterschiede kommen v.a. durch unterschiedliche Zeitbezüge zustande. So ist z.B. nicht zu erwarten, dass eine Expositions-Wirkungsbeziehung für starke Schlafstörung (%HSD), auf Basis der Belastung in der

⁹⁶ Die statistischen Modelle zur Berechnung der Kurven beinhalteten zunächst als zusätzlichen Prädiktor den Interaktionsterm zwischen Pegel und Verkehrsmenge. War der Interaktionsterm im Modell nicht signifikant, wurde er wieder entfernt, und es wurde ohne Interaktionsterm modelliert.

Nacht zwischen 22 und 06 Uhr, deckungsgleich ist mit der Kurve, die auf der Belastung zwischen 23 und 07 Uhr basiert.

Zwecks Vergleich zwischen den Expositions-Wirkungskurven für verschiedene in diesem Bericht behandelten Belastungsmasse (für %HA: $L_{\text{day},06-22\text{h}}$, $L_{\text{day},07-22\text{h}}$, L_{den} , $L_{\text{den},07-19-22-07\text{h}}$; für %HSD: $L_{\text{night},22-06\text{h}}$, $L_{\text{night},22-07\text{h}}$, $L_{\text{night},23-07\text{h}}$) wurden solche für die Endpunkte %HA und %HSD anhand der Originaldaten der SiRENE-Befragung neu berechnet. Abbildung A.A.14 zeigt jeweils in den Grafiken links die auf der SiRENE-Befragung basierenden Expositions-Wirkungskurven (adjustiert für Alter, Geschlecht, Befragungsmodus und Sprachversion des Fragebogens) für den Endpunkt %HA, regressiert auf die Belastungsmasse $L_{\text{day},07-22\text{h}}$ und $L_{\text{den},07-19-22-07\text{h}}$, im Vergleich zu den Belastungsmassen $L_{\text{day},06-22\text{h}}$ (bisher in der LSV) und L_{den} (generischer Grenzwert). Die Grafiken rechts zeigen die Regressionskurven für den Endpunkt %HSD und die Belastungsmasse $L_{\text{night},22-07\text{h}}$, $L_{\text{night},22-06\text{h}}$ (bisher in der LSV) und $L_{\text{night},23-07\text{h}}$ (generischer Grenzwert).



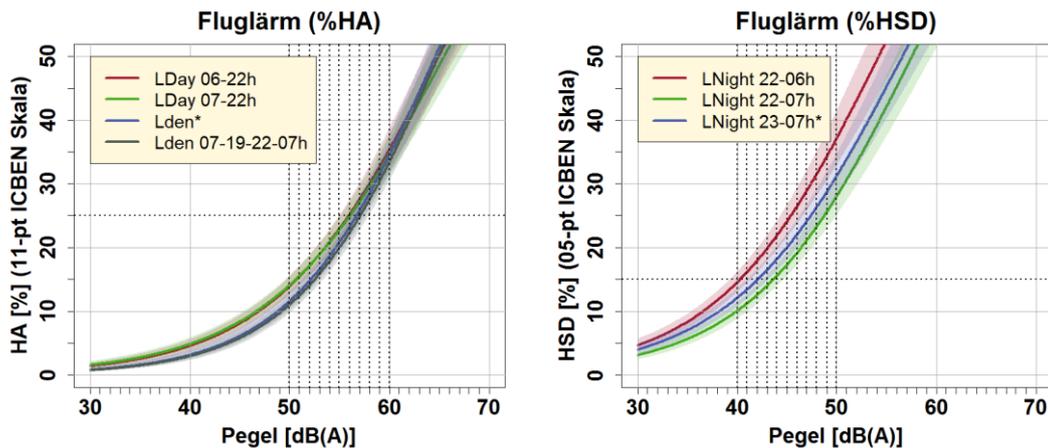


Abbildung A.A.14: Vergleich der Expositions-Wirkungskurven zwischen verschiedenen Belastungsmassen für die Endpunkte %HA (links) und %HSD (rechts). Die Kurven wurden anhand von Daten der SiRENE-Befragung berechnet und sind für Alter, Geschlecht, Befragungsmodus und Sprachversion des Fragebogens adjustiert und für zentrierte Kovariaten dargestellt. Schattierte Flächen zeigen die entsprechenden 95%-Konfidenzintervalle an. Annähernd kongruente Kurven können sich in der Grafik gegenseitig verdecken. Die von der Kommission festgelegten akzeptierbaren Risiken sind als punktierte horizontale Linien bei 25 %HA bzw. 15 %HSD eingezeichnet. Die vertikalen punktierten Linien dienen dem Ablesen des entsprechenden Pegelwerts auf der Expositions-Wirkungskurve. Das jeweils in der Legende mit einem Stern (*) markierte Belastungsmass entspricht dem Belastungsmass des generischen Grenzwerts.

A.3.7 Erklärte Varianz der Lärmwirkung (Belästigung und Schlafstörung) bei verschiedenen Belastungsmassen und Ermittlungsorten in der SiRENE-Studie

Die meisten Lärmwirkungsstudien verwenden als Expositionsmaß rechnerisch bestimmte Pegel auf der Aussenhülle von Gebäuden (ohne Berücksichtigung von z.B. Anbauten, Blenden, Brüstungen, Balkonen etc.). Meistens wird pro Gebäude lediglich der Fassadenpunkt mit der *höchsten* Exposition als Prädiktor in statistischen Expositions-Wirkungsmodellen verwendet. Somit beschränkt sich streng genommen der Geltungsbereich von aus diesen Studien abgeleiteten Expositions-Wirkungsbeziehungen auf eben diesen Punkt mit der höchsten Exposition (lautester Fassadenpunkt). Folglich sind aus denselben Expositions-Wirkungsbeziehungen abgeleitete Grenzwerte im Prinzip nur beim lautesten Fassadenpunkt «gültig». Es wäre aber auch denkbar, dass andere Punkte auf der Gebäudehülle mit Lärmwirkungen besser korrelieren, etwa der leiseste mit selbstberichteten Schlafstörungen. Um dies zu prüfen, wurden für diverse Kombinationen von Belastungsmass und Ermittlungsort Expositions-Wirkungsmodelle der Endpunkte %HA und %HSD (jeweils adjustiert für Alter, Geschlecht, Befragungsmodus und Sprachversion des Fragebogens) im Rahmen der SiRENE-Befragung berechnet und die jeweils resultierenden Pseudo-R²-Masse (McKelvey & Zavoina, [111])

und Nagelkerke, [112]) in Tabelle A.T.5 gelistet. Je höher das Pseudo-R² ist, umso besser ist die Varianzaufklärung der entsprechenden Belastungsmass-Ermittlungsort-Kombination. Die Daten in Tabelle A.T.5 zeigen deutlich, dass Pegel am lautesten Fassadenpunkt besser mit den Endpunkten %HA und %HSD korrespondieren, während zwischen den Belastungsmassen am selben Fassadenpunkt keine nennenswerten Unterschiede bestehen.

Tabelle A.T.5: Pseudo-R²-Masse (M-Z: McKelvey & Zavoina sowie NK: Nagelkerke) und Loglikelihood von adjustierten Expositions-Wirkungsmodellen für %HA (ermittelt anhand einer 11-Punkte-Skala) und %HSD (ermittelt anhand einer 5-Punkte-Skala) bei verschiedenen Belastungsmassen und Ermittlungsorten in der Si-RENE-Befragung. Die Auflistungen sind aufsteigend sortiert nach dem Akaike Information Criterion (AIC) (AIC nicht gezeigt). Für die Zeitbezüge der Belastungsmasse siehe Glossar (Anhang A.4).

Lärmart	Endpunkt	Belastungsmass /Ermittlungsort	M-Z R ²	NK R ²	Loglik.
Strassenlärm	%HA	L _{night} max. Fassade	0.22	0.14	-1838.9
		L _{den} max. Fassade	0.22	0.14	-1839.03
		L _{day} max. Fassade	0.22	0.14	-1839.27
		L _{night} min. Fassade	0.11	0.08	-1925.3
		L _{den} min. Fassade	0.11	0.08	-1925.5
		L _{day} min. Fassade	0.11	0.08	-1925.99
Eisenbahnlärm	%HA	L _{den} max. Fassade	0.39	0.27	-898.87
		L _{night} max. Fassade	0.39	0.27	-899
		L _{day} max. Fassade	0.39	0.27	-901.66
		L _{den} min. Fassade	0.27	0.20	-962.81
		L _{night} min. Fassade	0.27	0.20	-963.08
		L _{day} min. Fassade	0.27	0.20	-965.04
Fluglärm	%HA	L _{den} *	0.37	0.29	-1018.57
		L _{night} *	0.34	0.28	-1027.68
		L _{day} *	0.32	0.25	-1057.99
Strassenlärm	%HSD	L _{night} max. Fassade	0.20	0.11	-1465.26
		L _{den} max. Fassade	0.20	0.11	-1465.29
		L _{day} max. Fassade	0.20	0.11	-1465.32
		L _{den} min. Fassade	0.10	0.07	-1522.97
		L _{day} min. Fassade	0.10	0.07	-1523
		L _{night} min. Fassade	0.10	0.07	-1523.02
Eisenbahnlärm	%HSD	L _{den} max. Fassade	0.41	0.28	-872.28
		L _{night} max. Fassade	0.41	0.28	-873.07
		L _{day} max. Fassade	0.41	0.28	-873.31
		L _{den} min. Fassade	0.30	0.22	-935.49
		L _{day} min. Fassade	0.30	0.21	-935.92
		L _{night} min. Fassade	0.30	0.21	-936.42

Fluglärm	%HSD	L _{night} *	0.32	0.25	-866.21
		L _{den} *	0.31	0.22	-890.02
		L _{day} *	0.26	0.18	-925.96

* bei Fluglärm werden pro Wohneinheit keine unterschiedlichen Fassadenpunkte berechnet.

A.3.8 Konversion zwischen unterschiedlichen Belastungsmassen

Um von einem Grenzwert im Belastungsmass L_{den} auf einen Grenzwert in $L_{den,07-19-22-07h}$ bzw. $L_{day,07-22h}$, und vom generischen Grenzwert als L_{night} auf den entsprechenden Grenzwert im Belastungsmass $L_{night,22-07h}$ schliessen zu können, muss in Erfahrung gebracht werden, inwiefern diese unterschiedlichen Masse voneinander im Mittel (und für die Schweiz repräsentativ) abweichen.

Zu diesem Zweck wurden die im Jahresmittel stündlichen Fassadenpegel der im Stichprobenrahmen der SiRENE-Befragung enthaltenen Wohneinheiten (Strassenlärm: $N = 51'666$ Wohneinheiten; Eisenbahnlärm: $N = 31'066$ Wohneinheiten; Fluglärm: $N = 27'271$ Wohneinheiten) beigezogen und für den jeweils maximalen (d.h. lautesten) Fassadenpunkt pro Wohneinheit alle im Rahmen dieses Berichts relevanten Belastungsmasse sowie alle Differenzen zwischen denselben berechnet. Die jeweils über alle Wohneinheiten gemittelten Differenzen wurden nun verwendet, um die in der Tabelle A.T.6 aufgelisteten Konversionsterme zu bestimmen. Es muss hierbei festgehalten werden, dass eine solche Umrechnung die Differenzen zwischen den Belastungsmassen nur approximativ wiedergeben kann, also mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist (für eine ausführliche Diskussion hierzu siehe [12]).

Tabelle A.T.6 Konversionsterme (mittlere dB-Differenzen) zwischen verschiedenen Belastungsmassen in dB(A), ermittelt anhand Daten des Stichprobenrahmens der SiRENE-Befragung, auf 0.01 dB mathematisch gerundet

Lärmart:	$L_{den} - L_{den,07-19-22-07h}$	$L_{den} - L_{day,07-22h}$	$L_{day,06-22h} - L_{day,07-22h}$	$L_{night} - L_{night,22-07h}$	$L_{night,22-06h} - L_{night,22-07h}$
Strasse	-0.22	+1.52	-0.08	-0.18	-1.78
Bahn	-0.30	+5.91	-0.03	-0.09	-0.06
Flug	-0.40	+1.40	0.03	-1.89	-2.66

A.3.9 Häufigkeitsverteilungen der Pegelkorrekturen K1 in der LSV

Zwecks einer repräsentativen Abschätzung der Unterschiede im Schutzniveau zwischen dem Status quo gemäss LSV und den neuen Empfehlungen (vgl. Kapitel 5.5.1) ist es notwendig, die schweizweite Verteilung der Bewegungszahl-abhängigen Pegelkorrekturen K1, bzw. insbesondere deren Mittelwert in der ES II und ES III zu kennen. Zur Ermittlung dieser K1-Verteilungen wurden Grundlagendaten der sonBASE Datenbank des BAFU für das Berechnungsjahr 2015 beigezogen. Für die berechneten Verteilungen in Abbildungen A.A.15 (Strassenlärm) und A.A.16 (Eisenbahnlärm) wurden alle Personen in allen bewohnten Gebäuden in der Schweiz berücksichtigt, die über dem für die jeweilige Zeitperiode ermittelten $L_{\text{day},06-22\text{h}}$ von 60 dB(A) bzw. $L_{\text{night},22-06\text{h}}$ von 50 dB(A) im Jahr 2015 belastet waren. Die Mittelwerte von K1 ergaben sich aufgrund dieser Rechnung separiert nach ES II und III folgendermassen:

Strassenlärm:	ES II Tag:	-0.17 dB
	ES III Tag:	-0.24 dB
	ES II Nacht:	-2.87 dB
	ES III Nacht:	-2.77 dB
Eisenbahnlärm:	ES II Tag:	-5.16 dB
	ES III Tag:	-5.18 dB
	ES II Nacht:	-8.19 dB
	ES III Nacht:	-8.07 dB

Die Häufigkeitsverteilungen für K1 sind in Abb. A.A.15 (Strassenlärm) bzw. A.A.16 (Eisenbahnlärm) dargestellt.

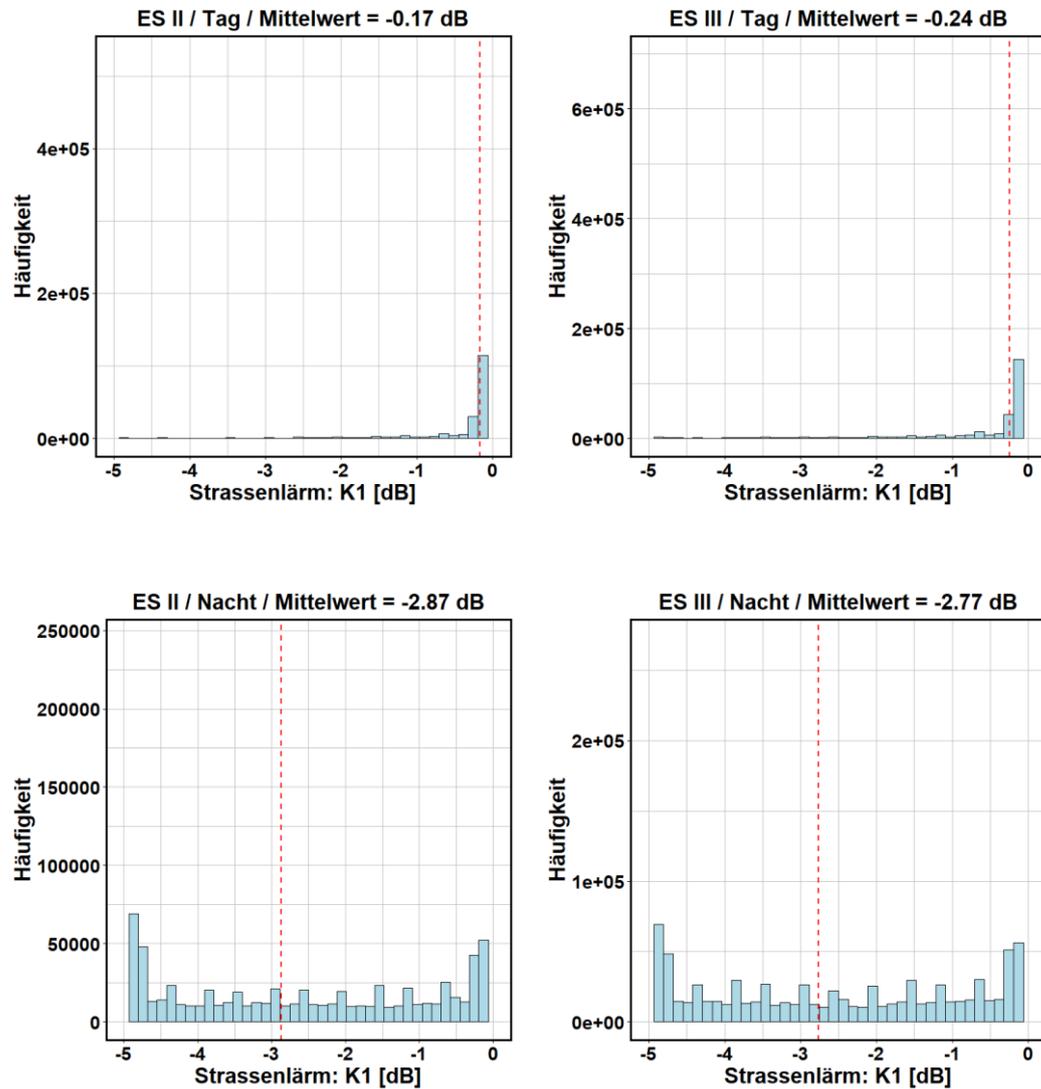


Abbildung A.A.15: Häufigkeitsverteilung der Pegelkorrekturen K_1 des Strassenlärms mit $L_{\text{day},06-22\text{h}} \geq 60$ dB(A) (oben) bzw. $L_{\text{night},22-06\text{h}} \geq 50$ dB(A) (unten) in der ES II (links) und ES III (rechts); Der Mittelwert von K_1 ist als gestrichelte rote Linie eingezeichnet; Datengrundlage: sonBASE 2015; 1'825'673 Personen in 191'328 Gebäuden am Tag und 2'396'694 Personen in 270'409 Gebäuden in der Nacht

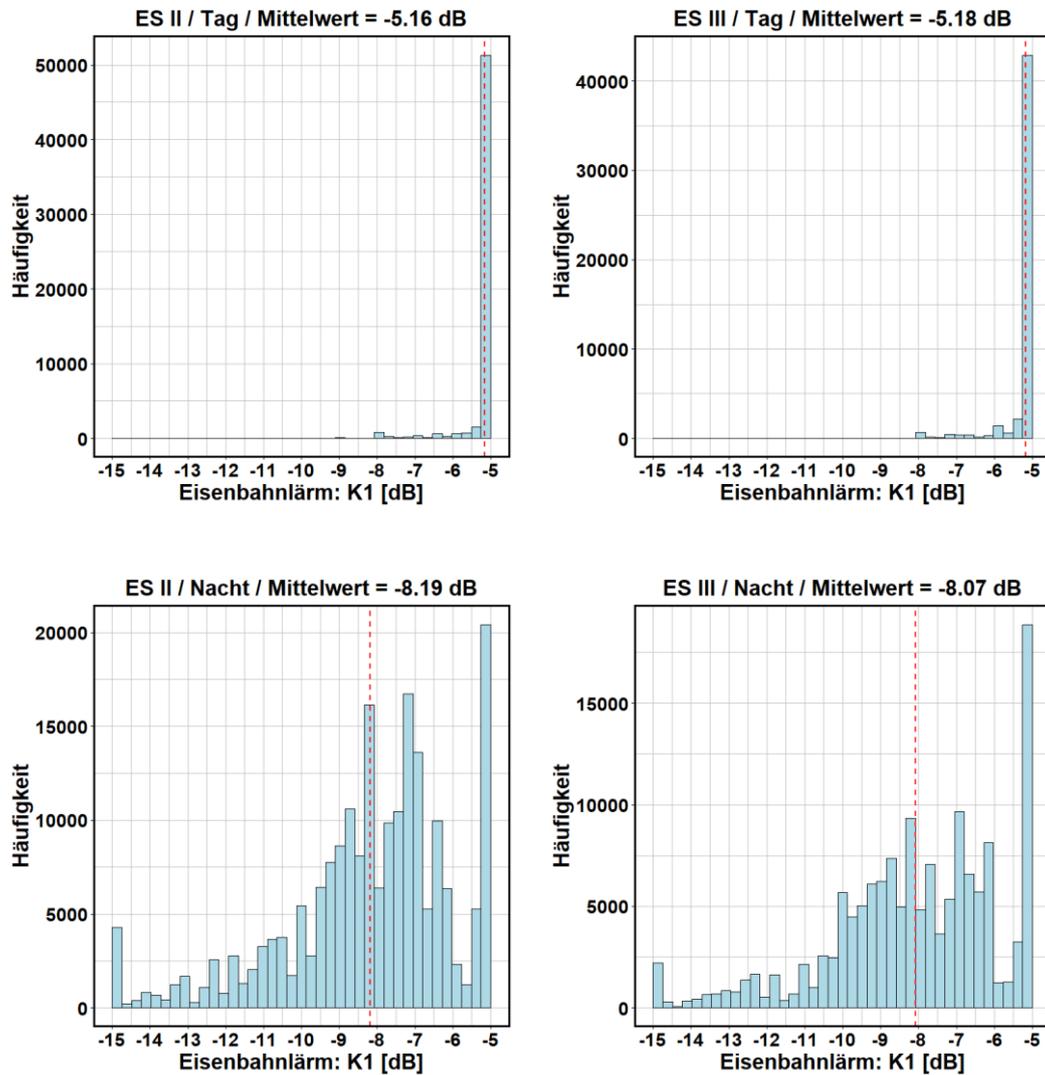


Abbildung A.A.16: Häufigkeitsverteilung der Pegelkorrekturen K1 des Eisenbahnlärms mit $L_{\text{day},06-22\text{h}} \geq 60 \text{ dB(A)}$ (oben) bzw. $L_{\text{night},22-06\text{h}} \geq 50 \text{ dB(A)}$ (unten) in der ES II (links) und ES III (rechts); Der Mittelwert von K1 ist als gestrichelte rote Linie eingezeichnet; Datengrundlage: sonBASE 2015; 121'602 Personen in 9'752 Gebäuden am Tag und 374'289 Personen in 33'503 Gebäuden in der Nacht

A.4 Glossar der Begriffe, Abkürzungen und Symbole

Absolutes Risiko	Hier: Wahrscheinlichkeit, dass unter bestimmten Expositionsbedingungen Auswirkungen des Lärms auf Gesundheit und/oder Wohlbefinden auftreten
A-Filter, A-Frequenzbewertung	Spektrale Pegelkorrektur, welche die Empfindlichkeit des Gehörs für unterschiedliche Frequenzen berücksichtigt. Fast alle dB-Werte, denen man in der Literatur begegnet, verwenden zur gehörgerechten Gewichtung des Schallspektrums den A-Filter, der es ermöglicht, das →Dezibel als einheitliches Mass für alle Frequenzbereiche zu verwenden. Die Einheit des Schalldruckpegels wird dann korrekterweise mit «dB(A)» bezeichnet.
Arousal	Kurzzeitige Aktivierungserhöhung im →EEG
Arterielle Gefässsteifigkeit	Ausmass der relativen Blutvolumen-Änderung bezogen auf die Änderung des Blutdrucks
AW	Alarmwert(e)
BAFU	Bundesamt für Umwelt
Belastungsmass	Hier: Akustisches Pegelmass, mit welchem die Lärmbelastung beschrieben werden kann. Beispiele: L_{day} , L_{night} , L_{den} .
Beurteilungsmass	Hier: Pegelmass bzw. Einheit, in welchem ein Grenzwert angegeben wird. In der Schweiz ist das relevante Beurteilungsmass der →Beurteilungspegel L_r
Beurteilungspegel (L_r)	Mass zur wirkungsbezogenen Beurteilung des auf einen →Immissionsort einwirkenden Lärms. In der Schweiz wird der Beurteilungspegel in der Regel aus dem → L_{eq} plus Pegelkorrekturen berechnet.
BGLE	Bundesgesetz über die Lärmsanierung der Eisenbahnen, SR 742.144
BGW	Belastungsgrenzwert(e)
DALY(s)	Disability Adjusted Life-Years
Dezibel, dB	Einheit zur Kennzeichnung des dekadischen Logarithmus des Verhältnisses zweier gleichartiger Schallenergiegrössen. In der Akustik ist die Referenzgrösse ein Wechselschalldruck von 2 μ Pa (Micropascal), welcher gemäss Norm der Hörschwelle bei 1000 Hz entspricht (an der Hörschwelle entspricht dieser Wechselschalldruck also einem Pegel von 0 dB, an der sog. «Schmerzschwelle» einem Pegel von ca. 120 dB). Eine Zunahme des Pegels von 10 dB wird ungefähr als Verdoppelung der Lautstärke empfunden.

Disability Weight(s), DW(s)	Gewichtungsfaktor(en) für den Schweregrad gesundheitlicher Beeinträchtigungen. Disability Weights werden benötigt zur Quantifizierung von →DALYs (siehe auch →GBD)
EBS	Endpunkt-bezogener Schwellenwert, siehe auch →Endpunkt
EEG	Elektroenzephalografie, Elektroenzephalogramm: Messung der summierten elektrischen Aktivität des Gehirns
EKLB	Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung, in diesem Bericht auch kurz als «Kommission» bezeichnet
Emission	Aussendung von Teilchen, Stoffen, Wellen, Strahlung oder Schall von einer Quelle aus in die Umwelt
Endotheliale Dysfunktion	Eingeschränkte Funktion der Gefäss-Endothelzellen. Spielt bei der Pathogenese der koronaren Herzerkrankung eine zentrale Rolle.
Endpunkt	Empirisch bestimmbare Variable (z.B. Blutdruck, Tod durch Herzinfarkt [bzw. dessen Wahrscheinlichkeit], Belästigung auf einer 11-Punkte-Skala etc.) zur Quantifizierung und Operationalisierung einer bestimmten Lärmwirkung
Energieäquivalenter Dauerschallpegel	→ L_{eq}
EPA Network	Informeller Zusammenschluss der Leiter und Direktoren europäischer Umweltschutzbehörden und ähnlicher Einrichtungen.
Evidenz	Hier: Gesamtmenge der empirisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse zu einem bestimmten Forschungsgegenstand
Exposition	(Lärm-)Belastung
Expositions-Wirkungsbeziehung	Hier: Beschreibung (formalisiert oder grafisch) des Zusammenhangs zwischen Lärmbelastung (→Exposition) und einem →Endpunkt
GBD	Global Burden of Disease, Projekt der →WHO zur Quantifizierung der globalen Krankheitslast, meist mittels →DALYs
GDG	Guideline Development Group der →WHO. Diese von der WHO eingesetzte Expertengruppe definierte die wichtigsten Fragen und Prioritäten bei der Entwicklung der «WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region» [10], bewertete die verfügbare wissenschaftliche Evidenz und formulierte die Empfehlungen.
Generischer Grenzwert	Hier: Allgemeingültiger, für jede Lärmart von der Kommission zum Zweck des Schutzes der Gesundheit empfohlener Grenzwert im Belastungsmass → L_{den} bzw. → L_{night}

Geschätzte Randmittelwerte	Mittels statistischen Modells geschätzte Mittelwerte von abhängigen Variablen auf verschiedenen Stufen(-Kombinationen) von Faktoren (engl. «estimated marginal means»)
GGW	→Generischer Grenzwert
HA, %HA	Highly Annoyed; Anzahl bzw. Prozentsatz der durch Lärm stark belästigten Personen
HPA-Achse (HHN-Achse)	Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (engl. «hypothalamic-pituitary-adrenocortical axis»), steuert die Ausschüttung des Stresshormons Cortisol
HSD, %HSD	Highly Sleep Disturbed; Anzahl bzw. Prozentsatz der durch Lärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen
Hyperglykämie	Erhöhter Blutzuckerspiegel
ICBEN	International Commission on Biological Effects of Noise (http://www.icben.org)
IGW	Immissionsgrenzwert(e)
IHD	Ischämische Herzkrankheit (Ischaemic Heart Disease)
Immissionsort	Empfangsort, -punkt der Lärmbelastung
Intermittenz	Ausmass der «Ereignishaftigkeit» einer bestimmten Lärmbelastungssituation, engl. «Intermittency» bzw. «Intermittency Ratio» [110]
Interquartilweite (IQW)	Streuungsmass in der deskriptiven Statistik. Sortiert man eine Variable ihrem Wert nach, so gibt die Interquartilweite an, wie breit das Intervall (in der Einheit der Variable) ist, in dem die mittleren 50 % der Werte liegen.
Inzidenz	Auftretensrate von Neuerkrankungen in einer Population in einem bestimmten Zeitraum (in Abgrenzung zur →Prävalenz)
ischämisch	Ischämie: Minderdurchblutung oder vollständiger Durchblutungs- ausfall eines Gewebes, eines Körperteils oder Organs
kardiometabolisch	Das Herz und/oder den Kreislauf und/oder den Metabolismus (Stoffwechsel) betreffend
kardiovaskulär	Das Herz und/oder den Kreislauf betreffend
$L_{Aeq,1h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Dauer einer Stunde (z.B. angegeben als $L_{Aeq,22-23h}$)
$L_{Aeq,22-06h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Nachtperiode von 22–06 Uhr (8 Stunden), entspricht dem → $L_{night,22-06h}$

$L_{Aeq,22-07h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Nachtperiode von 22–07 Uhr (9 Stunden), entspricht dem $\rightarrow L_{night,22-07h}$
$L_{Aeq,23-07h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Nachtperiode von 23–07 Uhr (8 Stunden), entspricht dem $\rightarrow L_{night}$
L_{Aeq24}	Gemittelter A-bewerteter Pegel über 24 Stunden von 00–24 Uhr
L_{day}	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Tagperiode von 07–23 Uhr (16 Stunden), entspricht dem $\rightarrow L_{day,07-23h}$
$L_{day,06-22h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Tagperiode von 06–22 Uhr (16 Stunden)
$L_{day,07-22h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Tagperiode von 07–22 Uhr (15 Stunden)
$L_{day,07-23h}$	Gemittelter A-bewerteter Pegel über die Tagperiode von 07–23 Uhr (16 Stunden), entspricht dem $\rightarrow L_{day}$
L_{den}	Tag-Abend-Nacht-Pegel (Day-Evening-Night-Level) mit einer Beaufschlagung für den Tag (über 12 Stunden) von 0 dB, für den Abend (über 4 Stunden) von 5 dB und für die Nacht (über 8 Stunden) von 10 dB. Standardmässig wird der Tag als Zeitraum zwischen 07 und 19 Uhr, der Abend als Zeitraum zwischen 19 und 23 Uhr, und die Nacht als Zeitraum zwischen 23 und 07 Uhr definiert. Abweichungen sind jedoch möglich.
$L_{den,07-19-22-07h}$	Tag-Abend-Nacht-Pegel (Day-Evening-Night-Level) mit einer Beaufschlagung für den Tag (07–19 Uhr) von 0 dB, für den Abend (19–22 Uhr) von 5 dB und für die Nacht (22–07 Uhr) von 10 dB.
L_{dn}	Tag-Nacht-Pegel (Day-Night-Level), auch DNL genannt, mit Beaufschlagung für den Tag (07–22 Uhr) von 0 dB und für die Nacht (22–07 Uhr) von 10 dB.
L_{eq}, L_{Aeq}	Energieäquivalenter (A-bewerteter [\rightarrow A-Filter]) Dauerschallpegel, gemittelt über ein bestimmtes Zeitintervall, ausgedrückt in Dezibel (dB bzw. dB(A)). Erläuterung: Beim L_{eq} werden alle in einem bestimmten Zeitraum auftretenden unterschiedlich lauten Geräusche energetisch aufaddiert und daraus ein auf diesen Zeitraum bezogener Mittelwert gebildet. Der L_{eq} stellt damit eine einheitliche, praktisch handhabbare Kennzahl dar, welche die Gesamtbelastung mit Lärm in einem definierten Zeitraum ausdrückt.
LFG	Bundesgesetz über die Luftfahrt, SR 748.0
$L_{max}, L_{A,max}$	Maximaler (A-bewerteter) Schalldruckpegel innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls, ausgedrückt in Dezibel (dB bzw. dB(A))

L_{night}	Gemittelter Pegel über die Nachtperiode von 23–07 Uhr (8 Stunden)
$L_{\text{night},22-06h}$	Gemittelter Pegel über die Nachtperiode von 22–06 Uhr (8 Stunden)
$L_{\text{night},22-07h}$	Gemittelter Pegel über die Nachtperiode von 22–07 Uhr (9 Stunden)
$L_{\text{night},23-07h}$	Gemittelter Pegel über die Nachtperiode von 23–07 Uhr (8 Stunden), entspricht dem $\rightarrow L_{\text{night}}$
$L_r, L_{r,\text{Tag}}, L_{r,\text{Nacht}}, L_{r,\text{Tag}24h}, L_{r,\text{Tag}15h}$	\rightarrow Beurteilungspegel (rating level); für die Tages- bzw. Nacht-Periode
LSV	Lärmschutz-Verordnung, SR 814.41
Meta-Analyse	Ein statistisches Verfahren, welches die Ergebnisse verschiedener \rightarrow Originalstudien, welche dieselbe Fragestellung verfolgen, quantitativ zusammenfasst
metabolisch	Den Stoffwechsel betreffend
Meta-Schätzer	\rightarrow Schätzer (Effektschätzer) bei Meta-Analysen
Missklassifikations-bias	Verzerrung, die dann auftritt, wenn die einer Person in einer Stichprobe oder Grundgesamtheit zugewiesene Exposition (hier: Lärmbelastung) vom wahren Expositionswert systematisch oder unsystematisch abweicht.
Morbidität	Krankheitshäufigkeit bezogen auf eine bestimmte Bevölkerungsgruppe oder \rightarrow Population
Mortalität	Häufigkeit von Todesfällen bezogen auf eine bestimmte Bevölkerungsgruppe oder \rightarrow Population
NoiSeQ-R-Score	Scorewert gemäss NoiSeQ-R-Lärmempfindlichkeitsfragebogen [109] – je höher der Wert, desto höher die Lärmempfindlichkeit
NORAH-Studie	Grosse Lärmwirkungsstudie aus Deutschland (http://www.laermstudie.de)
Nutzungseinheit	Verbund von einem oder mehreren zusammenhängenden Räumen welcher dem längeren Aufenthalt von Personen dient (z.B. Wohnung, Grossraumbüro, Hotel-Stockwerk in einem Hochhaus, Atelier, Praxis etc.). Ein Gebäude kann grundsätzlich mehrere Nutzungseinheiten umfassen.
Originalstudie	Hier: Einzelne empirische, in sich abgeschlossene Untersuchung über den Effekt einer bestimmten Umwelttoxine (z.B. Lärm) in einer

	gegebenen Stichprobe oder (seltener) einer →Population, in Abgrenzung zu Meta-Studie bzw. →Meta-Analyse
Population	Grundgesamtheit in der Statistik
Prävalenz	Beobachtete Häufigkeit einer Krankheit oder eines Symptoms zu einem bestimmten Zeitpunkt (in Abgrenzung zur →Inzidenz)
PSG	Polysomnografie, ein diagnostisches Verfahren zur Messung physiologischer Funktionen während des Schlafs, v.a. gekennzeichnet durch die Aufzeichnung des →EEG
PW	Planungswert(e)
Regression, Regressionsanalyse	Statistisches Analyseverfahren, um Beziehungen zwischen einer abhängigen (z.B. →%HA) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu modellieren
Relatives Risiko (RR)	Statistischer Parameter, welcher ausdrückt, um welchen Faktor sich ein Risiko in zwei Gruppen (z.B. Exponierte vs. Nicht-Exponierte) unterscheidet. Ein relatives Risiko von 1 bedeutet, dass sich die beiden Gruppen nicht unterscheiden (siehe auch →Zusatzrisiko)
ROR	Rat für Raumordnung, eine ausserparlamentarische Kommission mit Sitz im Bundesamt für Raumentwicklung
SAPALDIA	Swiss Cohort Study on Air Pollution And Lung Diseases in Adults (Schweizer Kohortenstudie)
Schätzer (Effektschätzer)	Mittels statistischer Verfahren (meist →Regressionsanalyse) geschätzter Koeffizient/Parameter, der den Effekt einer abhängigen Variable auf eine Wirkungsvariable beschreibt
Schlafperiode	Zeitintervall zwischen dem Einschlafzeitpunkt und dem finalen Aufwachzeitpunkt
SiRENE-Befragung	Im Rahmen der →SiRENE-Studie als einzelnes Modul durchgeführte schweizweite soziakustische Befragung in vier Wellen in den Jahren 2014 und 2015. Publiziert in: [13, 14]
SiRENE-Studie	Grosse Schweizer Lärmwirkungsstudie, finanziert durch den →SNF und das →BAFU, durchgeführt vom Schweizerischen Tropen- und Public Health-Institut, der Universität Basel, der Empa und dem BAFU (http://www.sirene-studie.ch). Siehe auch →SiRENE-Befragung
SNC	Swiss National Cohort, Schweizerische Nationale Kohortenstudie (https://www.swissnationalcohort.ch)
SNF	Schweizerischer Nationalfonds

somatisch	Das Körperliche betreffend (in Abgrenzung zu: psychisch, geistig, seelisch)
sonBASE	vom →BAFU unterhaltene GIS-basierte Datenbank der Lärmbelastung in der Schweiz (https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/zustand/gis-laermdatenbank-sonbase.html)
Standardunsicherheit	Die Standardunsicherheit $u(y)$ eines Messergebnisses y ist die geschätzte Standardabweichung von y .
Stichprobenrahmen	Ein Stichprobenrahmen definiert die Quelle bzw. Menge der potenziell in eine Stichprobe aufgenommenen Fälle (engl. Begriff: «sampling frame»). Häufig, aber nicht immer, entspricht der Stichprobenrahmen der Grundgesamtheit. Es gilt: Grundgesamtheit \geq Stichprobenrahmen \geq Stichprobe. Fälle, die sich nicht im Stichprobenrahmen befinden, können auch nicht in die Stichprobe aufgenommen werden.
SVG	Strassenverkehrsgesetz, SR 741.01
USG	Umweltschutzgesetz, SR 814.01
Vasokonstriktion	Medizinischer Terminus für Gefässverengung. Eine Vasokonstriktion erfolgt hauptsächlich durch Kontraktionen der glatten Muskulatur in den kleinen Arterien und Arteriolen meist unter dem Einfluss des Sympathikus.
VE	Vorentwurf
VIL	Verordnung über die Infrastruktur der Luftfahrt, SR 748.131.1
VRV	Verkehrsregelverordnung, SR 741.11
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)
Wohneinheit	Ein- oder mehrgeschossige →Nutzungseinheit deren Räume untereinander verbunden sind und die einem Wohnzweck dient (z.B. Wohnung, Terrassenhaus, Einfamilienhaus).
Zusatzrisiko	Risiko, (kausal) wegen einer bestimmten Exposition zu erkranken. Errechnet sich mit der Gleichung $RR-1$ (siehe auch →Relatives Risiko)

A.5 Literaturverzeichnis

1. Zäch, C.; Wolf, R., Art. 15. In *Kommentar zum Umweltschutzgesetz, 2. Aufl.*, Vereinigung für Umweltrecht und Helen Keller, Ed. Schulthess: Zürich-Basel-Genève, 2003.
2. Ecoplan AG (Im Auftrag der EKLB) *Forschungskonzept Lärm - Handlungsbedarf zur Aktualisierung der Grundlagen für die Lärmbeurteilung*; Ecoplan: Altdorf, 2010.
3. Bundesrat *Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 15.3840 Barazzone vom 14. September 2015*; 2017.
4. Brink, M. Überprüfung der Immissionsgrenzwerte für Lärm - Inputpapier 4: Lärmwirkung [im Auftrag der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung und des Bundesamts für Umwelt BAFU]. https://www.eklb.admin.ch/inhalte/dokumentation/EKLB_2009_Inputpapier_Wirkung.pdf
5. Planteam GHS AG *Überprüfung der Immissionsgrenzwerte für Lärm - Inputpapier 2: Technik und Betrieb [im Auftrag der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung und des Bundesamts für Umwelt BAFU]*; Sempach-Station, 2009.
6. Empa *Überprüfung der Immissionsgrenzwerte für Lärm - Inputpapier 3: Akustik [im Auftrag der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung und des Bundesamts für Umwelt BAFU]*; Dübendorf, 2009.
7. Christoph Zäch Büro für Gesetzgebung *Überprüfung der Immissionsgrenzwerte für Lärm - Inputpapier 1: Recht [im Auftrag der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung und des Bundesamts für Umwelt BAFU]*; Bern, 2009.
8. Hofmann, R. *Der geschichtliche Werdegang der heutigen Lärmgrenzwerte [Inputpapier Geschichte]*; Wallisellen, 2009.
9. Ecoplan *Forschungskonzept Lärm. Konzeptstudie zur Aktualisierung der Grundlagen für die Lärmbeurteilung*. https://www.eklb.admin.ch/inhalte/dokumentation/EKLB_2010_Forschungskonzept_Laerm_Konzeptstudie.pdf
10. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>
11. European Commission, Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise In 2002.
12. Brink, M.; Schäffer, B.; Pieren, R.; Wunderli, J. M., Conversion between noise exposure indicators Leq24h, LDay, LEvening, LNight, Ldn and Lden: Principles

- and practical guidance. *International journal of hygiene and environmental health* **2018**, 221, (1), 54-63.
13. Brink, M.; Schäffer, B.; Vienneau, D.; Foraster, M.; Pieren, R.; Eze, I. C.; Cajochen, C.; Probst-Hensch, N.; Rösli, M.; Wunderli, J.-M., A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise. *Environment International* **2019**, 125, 277-290.
 14. Brink, M.; Schäffer, B.; Vienneau, D.; Pieren, R.; Foraster, M.; Eze, I. C.; Rudzik, F.; Thiesse, L.; Cajochen, C.; Probst-Hensch, N.; Rösli, M.; Wunderli, J. M., 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* **2019**, 16, (21), 4186.
 15. Griffel, A., Art. 74 (N18, N32). In *Bundesverfassung, Basler Kommentar*, Waldmann, B.; Belser, E. M.; Epiney, A., Eds. Schulthess: Basel, 2015.
 16. Griffel, A., *Umweltrecht in a nutshell*. Dike: Zürich, 2015.
 17. Wagner Pfeifer, B., *Umweltrecht Allgemeine Grundlagen*. Dike: Zürich/St. Gallen, 2017.
 18. Schrade, A.; Loretan, T., Art. 13 (N1, N12). In *Kommentar zum Umweltschutzgesetz, 2. Aufl.*, Vereinigung für Umweltrecht und Helen Keller, Ed. Schulthess: Zürich-Basel-Genève, 2003.
 19. Gossweiler, A. Entschädigungen für Lärm von öffentlichen Verkehrsanlagen – Elemente für eine Neuordnung durch den Gesetzgeber [Diss.]. Universität Zürich, 2014.
 20. Alig, J.; Schärmeli, L., Die Beurteilung geänderter Altanlagen aus lärmschutzrechtlicher Sicht – Eine kritische Analyse der heutigen Praxis. *Umweltrecht in der Praxis* **2019**, 193 ff.
 21. Griffel, A.; Rausch, H., *Kommentar zum Umweltschutzgesetz. Ergänzungsband zur 2. Auflage, Vereinigung für Umweltrecht VUR (Hrsg.), Zürich/Basel/Genf*. 2011.
 22. WHO, Preamble to the Constitution of the World Health Organization as adopted by the International Health Conference, New York, 19-22 June, 1946; signed on 22 July 1946 by the representatives of 61 States (Official Records of the World Health Organization, no. 2, p. 100) and entered into force on 7 April 1948. In 1946.
 23. Guski, R.; Schreckenber, D.; Schuemer, R., WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2017**, 14, (12), 1539.
 24. Basner, M.; McGuire, S., 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* **2018**, 15, (3), 519.
25. Vienneau, D.; Schindler, C.; Perez, L.; Probst-Hensch, N.; Roosli, M., The relationship between transportation noise exposure and ischemic heart disease: a meta-analysis. *Environmental research* **2015**, 138, 372-80.
 26. Seidler, A.; Wagner, M.; Schubert, M.; Droge, P.; Romer, K.; Pons-Kuhnemann, J.; Swart, E.; Zeeb, H.; Hegewald, J., Aircraft, road and railway traffic noise as risk factors for heart failure and hypertensive heart disease-A case-control study based on secondary data. *International journal of hygiene and environmental health* **2016**, 219, (8), 749-758.
 27. van Kempen, E.; Casas, M.; Pershagen, G.; Foraster, M., WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *Int J Environ Res Public Health* **2018**, 15, (2).
 28. Sorensen, M.; Andersen, Z. J.; Nordsborg, R. B.; Jensen, S. S.; Lilledund, K. G.; Beelen, R.; Schmidt, E. B.; Tjonneland, A.; Overvad, K.; Raaschou-Nielsen, O., Road traffic noise and incident myocardial infarction: a prospective cohort study. *PLoS One* **2012**, 7, (6), e39283.
 29. Huss, A.; Spoerri, A.; Egger, M.; Röösli, M., Aircraft Noise, Air Pollution, and Mortality From Myocardial Infarction. *Epidemiology* **2010**, 21, (6), 829-836.
 30. Heritier, H.; Vienneau, D.; Foraster, M.; Eze, I. C.; Schaffner, E.; Thiesse, L.; Rudzik, F.; Habermacher, M.; Kopfli, M.; Pieren, R.; Brink, M.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Probst-Hensch, N.; Roosli, M.; group, S. N. C. s., Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: a nationwide cohort study from Switzerland. *Eur J Epidemiol* **2017**, 32, 307–315.
 31. Vienneau, D.; Saucy, A.; Schäffer, B.; Tangermann, L.; Wunderli, J. M.; Röösli, M., Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: a 15-year analysis in Switzerland. In *ISEE 2020*, Washington DC, 2020.
 32. Foraster, M.; Eze, I. C.; Vienneau, D.; Schaffner, E.; Jeong, A.; Heritier, H.; Rudzik, F.; Thiesse, L.; Pieren, R.; Brink, M.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Roosli, M.; Probst-Hensch, N., Long-term exposure to transportation noise and its association with adiposity markers and development of obesity. *Environ Int* **2018**, 121, (Pt 1), 879-889.
 33. Eze, I. C.; Foraster, M.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Heritier, H.; Rudzik, F.; Thiesse, L.; Pieren, R.; Imboden, M.; von Eckardstein, A.; Schindler, C.; Brink, M.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Roosli, M.; Probst-Hensch, N., Long-term exposure to transportation noise and air pollution in relation to incident diabetes in the SAPALDIA study. *Int J Epidemiol* **2017**, 46, (4), 1115–1125.
 34. Sorensen, M.; Andersen, Z. J.; Nordsborg, R. B.; Becker, T.; Tjonneland, A.; Overvad, K.; Raaschou-Nielsen, O., Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: A Cohort Study. *Environmental health perspectives* **2013**, 121, (2), 217-222.

35. Stansfeld, S. A.; Clark, C.; Cameron, R. M.; Alfred, T.; Head, J.; Haines, M. M.; van Kamp, I.; van Kempen, E.; Lopez-Barrio, I., Aircraft and road traffic noise exposure and children's mental health. *Journal of Environmental Psychology* **2009**, 29, (2), 203-207.
36. Seidler, A.; Hegewald, J.; Seidler, A. L.; Schubert, M.; Wagner, M.; Droge, P.; Haufe, E.; Schmitt, J.; Swart, E.; Zeeb, H., Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data. *Environmental research* **2017**, 152, 263-271.
37. Eze, I. C.; Foraster, M.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Pieren, R.; Imboden, M.; Wunderli, J.-M.; Cajochen, C.; Brink, M.; Röösl, M.; Probst-Hensch, N., Incidence of depression in relation to transportation noise exposure and noise annoyance in the SAPALDIA study. *Environment International* **2020**, 144, 106014.
38. Klatte, M.; Spilski, J.; Mayerl, J.; Möhler, U.; Lachmann, T.; Bergström, K., Effects of Aircraft Noise on Reading and Quality of Life in Primary School Children in Germany: Results From the NORAH Study. *Environment and Behavior* **2016**, 49, (4), 390–424.
39. Tiesler, C. M.; Birk, M.; Thiering, E.; Kohlbock, G.; Koletzko, S.; Bauer, C. P.; Berdel, D.; von Berg, A.; Babisch, W.; Heinrich, J., Exposure to road traffic noise and children's behavioural problems and sleep disturbance: results from the GINIplus and LISApplus studies. *Environmental research* **2013**, 123, 1-8.
40. Stansfeld, S. A.; Berglund, B.; Clark, C.; Lopez-Barrio, I.; Fischer, P.; Ohrstrom, E.; Haines, M. M.; Head, J.; Hygge, S.; van Kamp, I.; Berry, B. F., Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study. *Lancet* **2005**, 365, (9475), 1942-9.
41. Foraster, M.; Eze, I. C.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Heritier, H.; Endes, S.; Rudzik, F.; Thiesse, L.; Pieren, R.; Schindler, C.; Schmidt-Trucksass, A.; Brink, M.; Cajochen, C.; Marc Wunderli, J.; Roosli, M.; Probst-Hensch, N., Exposure to Road, Railway, and Aircraft Noise and Arterial Stiffness in the SAPALDIA Study: Annual Average Noise Levels and Temporal Noise Characteristics. *Environmental health perspectives* **2017**, 125, (9), 097004.
42. Eze, I. C.; Imboden, M.; Foraster, M.; Schaffner, E.; Kumar, A.; Vienneau, D.; Heritier, H.; Rudzik, F.; Thiesse, L.; Pieren, R.; von Eckardstein, A.; Schindler, C.; Brink, M.; Wunderli, J. M.; Cajochen, C.; Roosli, M.; Probst-Hensch, N., Exposure to Night-Time Traffic Noise, Melatonin-Regulating Gene Variants and Change in Glycemia in Adults. *Int J Environ Res Public Health* **2017**, 14, (12).
43. Haralabidis, A. S.; Dimakopoulou, K.; Vigna-Taglianti, F.; Giampaolo, M.; Borgini, A.; Dudley, M. L.; Pershagen, G.; Bluhm, G.; Houthuijs, D.; Babisch, W.; Velonakis, M.; Katsouyanni, K.; Jarup, L.; Consortium, H., Acute effects of night-time noise exposure on blood pressure in populations living near airports. *European Heart Journal* **2008**, 29, (5), 658-664.
44. Schmidt, F.; Kollé, K.; Kreuder, K.; Schnorbus, B.; Wild, P.; Hechtner, M.; Binder, H.; Gori, T.; Munzel, T., Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease. *Clin Res Cardiol* **2015**, 104, (1), 23-30.

45. Guski, R., Status, Tendenzen und Desiderate der Lärmwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* **2002**, 49, (6), 219-232.
46. Guski, R., *Lärm. Wirkungen unerwünschter Geräusche*. Hans Huber: Bern, 1987.
47. Fields, J. M.; De Jong, R. G.; Gjestland, T.; Flindell, I. H.; Job, R. F. S.; Kurra, S.; Lercher, P.; Vallet, M.; Yano, T.; Guski, R.; Felscher-Suhr, U.; Schumer, R., Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration* **2001**, 242, (4), 641-679.
48. Oliva, C. *Wirkung der Strassenlärmbelastung während des Tages. Bericht 2 der Lärmstudie 90.*; Büro für soziologische Grundlagenforschung und Entwicklungsplanung: Schlieren, 1993.
49. Wehrli, B.; Hauser, S.; Egli, H.; Bakke, P.; Grandjean, E., *Wohnen im Neubau*. Paul Haupt Verlag: Bern, 1978.
50. Wanner, H. U.; Wehrli, B.; Nemecek, J.; Turrian, V., Die Belästigung der Anwohner verkehrsreicher Strassen durch Lärm und Luftverunreinigungen. *Sozial- und Präventivmedizin/Social and Preventive Medicine* **1977**, 22, (3), 108-115.
51. Soziologisches Institut der Universität Zürich *Sozio-psychologische Strassenlärmuntersuchung*; 1980.
52. Soziologisches Institut der Universität Zürich *Zur Begrenzung der Lärmbelastung: Sozio-psychologische Untersuchungen zur Begrenzung von Eisenbahn-, Strassen und Rangierlärm. Vergleich der Störwirkungen von Eisenbahn- und Strassenlärm unter konstanten Bedingungen. Zusammenfassender Schlussbericht*, Universität Zürich: Zürich, 1980.
53. Oliva, C. *Wirkung der Fluglärmbelastung während des Tages. Bericht 1 der Lärmstudie 90.*; Büro für soziologische Grundlagenforschung und Entwicklungsplanung: Schlieren, 1993.
54. Arbeitsgemeinschaft für sozio-psychologische Fluglärmuntersuchungen, *Sozio-psychologische Fluglärmuntersuchung im Gebiet der drei Schweizer Flughäfen Zürich, Genf, Basel*. Eidgenössisches Luftamt: Bern, 1974.
55. Consensus Conference Panel; 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., 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* **2015**, 38, (8), 1161-83.
56. Basner, M.; Isermann, U.; Samel, A., Die Ergebnisse der DLR-Studie und ihre Umsetzung in einer lärmmedizinischen Beurteilung für ein Nachtschutzkonzept. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* **2005**, 52, 109-123.

57. Brink, M., A review of potential mechanisms in the genesis of long-term health effects due to noise-induced sleep disturbances. In *Internoise 2012*, New York, 2012.
58. Munzel, T.; Sorensen, M.; Gori, T.; Schmidt, F. P.; Rao, X.; Brook, F. R.; Chen, L. C.; Brook, R. D.; Rajagopalan, S., Environmental stressors and cardio-metabolic disease: part II-mechanistic insights. *Eur Heart J* **2017**, 38, (8), 557-564.
59. WHO Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2018/biological-mechanisms-related-to-cardiovascular-and-metabolic-effects-by-environmental-noise>
60. Recio, A.; Linares, C.; Banegas, J. R.; Diaz, J., Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms. *Environmental research* **2016**, 146, 359-70.
61. Global Burden of Disease Collaborative Network, Global Burden of Disease Study 2016 (GBD 2016) Disability Weights. In Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), Ed. Seattle, United States, 2017.
62. Mathers, C. D.; Bernard, C.; Moesgaard Iburg, K.; Inoue, M.; Fat, D. M.; Shibuya, K.; Stein, C.; Tomijima, N.; Xu, H. *Global Burden of Disease in 2002: data sources, methods and results*; 2003.
63. Salomon, J. A.; Haagsma, J. A.; Davis, A.; de Noordhout, C. M.; Polinder, S.; Havelaar, A. H.; Cassini, A.; Devleeschauwer, B.; Kretzschmar, M.; Speybroeck, N.; Murray, C. J.; Vos, T., Disability weights for the Global Burden of Disease 2013 study. *The Lancet. Global health* **2015**, 3, (11), e712-23.
64. Ecoplan *Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit. Berechnung von DALY für die Schweiz [Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt]*; Altdorf und Bern, 30. März 2012, 2012.
65. WHO Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2011/burden-of-disease-from-environmental-noise.-quantification-of-healthy-life-years-lost-in-europe>
66. Vienneau, D.; Eze, I.; Probst-Hensch, N.; Rösli, M., Association Between Transportation Noise and Cardiometabolic Diseases: an Update of the WHO Meta-analysis. In *ICA 2019*, Aachen, 2019.
67. Jung, T.; Jahraus, H.; Burkart, W., Akzeptables Risiko als Basis für gesetzliche Regelungen im Umweltschutz. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* **2000**, 5, 328-335.
68. Empa *Vorlesungs-Skript Lärmbekämpfung (Fassung 2011)*; Dübendorf, 2011.
69. Hofmann, R., Die Grenzwerte für Fluglärm - kritisch betrachtet. *Umweltrecht in der Praxis [URP]* **2000**, 853-859.

70. Rohrmann, B., Psychologische Kriterien zur "Erheblichkeit" von Belästigungen. In *Beiträge zur Bedeutungslehre des Schalls. Ergebnisse des 3. Oldenburger Symposions zur Psychologischen Akustik*, Schick, A.; Walcher, K. P., Eds. Lang: Bern, 1984; pp 139-149.
71. Wirth, K., *Lärmstudie 2000. Die Belästigungssituation im Umfeld des Flughafens Zürich*. Shaker Verlag: Aachen, 2004.
72. Vienneau, D.; Heritier, H.; Foraster, M.; Eze, I. C.; Schaffner, E.; Thiesse, L.; Rudzik, F.; Habermacher, M.; Kopfli, M.; Pieren, R.; Brink, M.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Probst-Hensch, N.; Roosli, M.; group, S. N. C. s., Facades, floors and maps - Influence of exposure measurement error on the association between transportation noise and myocardial infarction. *Environ Int* **2019**, 123, 399-406.
73. INTERFACE Politikstudien *Wirkungsanalyse Lärmbekämpfung - Übersicht über die Entwicklung der Lärmbelastung und Vertiefung in den Bereichen Lärm von bestehenden Strassen und Alltagslärm [Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)]*; Luzern, 2015.
74. Breugelmans, O.; Houthuijs, D.; Poll, R. v.; Hajema, K.; Hogenhuis, R., Predicting aircraft noise annoyance: exploring noise metrics other than Lden. In *12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem*, Zurich, 2017.
75. Brink, M., A review of explained variance in exposure-annoyance relationships in noise annoyance surveys. In *ICBEN 2014*, Nara, Japan, 2014.
76. WHO Night noise guidelines for Europe. <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/publications/2009/night-noise-guidelines-for-europe>
77. Guski, R., Zum Anspruch auf Ruhe beim Wohnen. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* **1991**, 38, 61 -65.
78. Miedema, H.; Vos, H.; de Jong, R. G., Community reaction to aircraft noise: time-of-day penalty and tradeoff between levels of overflights. *Journal of the Acoustical Society of America* **2000**, 107, (6), 3245-53.
79. Jansen, G.; Linnemeier, A.; Nitsche, M., Methodenkritische Überlegungen und Empfehlungen zur Bewertung von Nachtfluglärm. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* **1995**, 42, 91-106.
80. Eidg. Kommission für die Beurteilung von Lärmimmissionsgrenzwerten 6. *Teilbericht, Belastungsgrenzwerte für den Lärm der Landesflughäfen*; 1997.
81. BAFU Arbeitsgruppe *Belastungsgrenzwerte Fluglärm und raumplanerische Flexibilität - Standbericht / 1.11.2011 (Referenz/Aktenzeichen: K412-0888)*; 1 Nov 2011, 2011.
82. Brink, M.; Bögli, H.; Guski, R.; Maschke, C.; Tinguely, G. *Überprüfung BGW Fluglärm: Bericht der Arbeitsgruppe zu den wissenschaftlichen Grundlagen [interner Bericht des Bundesamtes für Umwelt]*; Bundesamt für Umwelt, Abt. Lärm und NIS, Bern: 2011.

83. Eidg. Kommission für die Beurteilung von Lärmimmissionsgrenzwerten 4. Teilbericht, Belastungsgrenzwerte für Eisenbahnlärm.
www.eklb.admin.ch/de/dokumentation/berichte
84. IPSO *Störwirkungen durch den Lärm der Kleinaviatik - Herausgeber: Bundesamt für Umweltschutz und Bundesamt für Zivilluftfahrt, Bern; 1980.*
85. Brink, M.; Schäffer, B.; Vienneau, D.; Foraster, M.; Pieren, R.; Eze, I. C.; Cajochen, C.; Probst-Hensch, N.; Rösli, M.; Wunderli, J.-M., A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise. *Environment International* **submitted**.
86. Öhrström, E.; Ögren, M.; Jerson, T.; Gidlof-Gunnarsson, A. In *Experimental studies on sleep disturbances due to railway and road traffic noise*, 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN), Foxwoods, CT, 2008; Foxwoods, CT, 2008.
87. Brink, M.; Lercher, P.; Eisenmann, A.; Schierz, C., Influence of slope of rise and event order of aircraft noise events on high resolution actimetry parameters. *Somnologie* **2008**, 12, 118-128.
88. Marks, A.; Griefahn, B.; Basner, M., Event-related awakenings caused by nocturnal transportation noise. *Noise Control Engineering Journal* **2008**, 56, (1), 52-62.
89. Spreng, M., Kritische Betrachtung des Schienenbonus anhand hörphysiologischer/medizinischer Fakten. In *Tagungsband Fachseminar Schienenlärm. Ist der Schienenbonus noch zeitgemäss? 17.10.1997*, Institut für ökologische Strategien: 1998.
90. Guski, R.; Schmid, R.; Schäffer, B.; Wunderli, J. M.; Haubrich, J.; Benz, S.; Schreckenberger, D. *Leq + X - Lärmexposition, Ereignishäufigkeiten und Belästigung: Re-Analyse von Daten zur Belästigung und Schlafstörung durch Fluglärm an deutschen und Schweizer Flughäfen (Hauptbericht)*; Ruhr-Universität Bochum: Bochum, 2020.
91. Hofmann, R., Lärm und Lärmbekämpfung in der Schweiz [Vorlesungsskript] (5. Auflage). In Wallisellen, 2003.
92. Brink, M.; Wirth, K.; Schierz, C.; Thomann, G.; Bauer, G., Annoyance responses to stable and changing aircraft noise exposure. *Journal of the Acoustical Society of America* **2008**, 124, (5), 2930-2941.
93. Babisch, W.; Houthuijs, D.; Pershagen, G.; Cadum, E.; Katsouyanni, K.; Velonakis, M.; Dudley, M.-L.; Marohn, H.-D.; Swart, W.; Breugelmans, O.; Bluhm, G.; Selander, J.; Vigna-Taglianti, F.; Pisani, S.; Haralabidis, A.; Dimakopoulou, K.; Zachos, I.; Järup, L., Annoyance due to aircraft noise has increased over the years-Results of the HYENA study. *Environment International* **2009**, 35, (8), 1169-1176.
94. Janssen, S. A.; Vos, H.; van Kempen, E. E. M. M.; Breugelmans, O. R. P.; Miedema, H. M. E., Trends in aircraft noise annoyance: The role of study and

- sample characteristics. *Journal of the Acoustical Society of America* **2011**, 129, (4), 1953-1962.
95. Guski, R. In *The Aircraft Noise Paradox 13 Years Later*, ICBEN 2017, Nara, Japan, 2014; Nara, Japan, 2014.
 96. EPA Network Interest Group on Noise Abatement (IGNA) *Overview of critical noise values in the European Region (by Peeters, B & Nusselder, R; M+P raadgevende ingenieurs BV)*; 2019.
 97. Mathers, C.; Vos, T.; Stevenson, C. *The burden of disease and injury in Australia (AIHW Cat. no. PHE 17)*; Australian Institute of Health and Welfare: Canberra, 1999.
 98. Müller-Wenk, R.; Hofstetter, P. *Monetarisierung verkehrslärmbedingter Gesundheitsschäden. Umwelt-Materialien Nr. 166. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern*; 2003.
 99. WHO Global Burden of Disease (GBD) project.
https://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/about/en/
 100. Haagsma, J.; Maertens de Noordhout, C.; Polinder, S.; Vos, T.; Havelaar, A.; Cassini, A.; Devleeschauwer, B.; Kretzschmar, M.; Speybroeck, N.; Salomon, J., Assessing disability weights based on the responses of 30,660 people from four European countries. *Population Health Metrics* **2015**, 13.
 101. G. B. D. Injury Incidence Prevalence Collaborators, Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 328 diseases and injuries for 195 countries, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet* **2017**, 390, (10100), 1211-1259.
 102. van Kamp, I.; Schreckenberg, D.; van Kempen, E.; Basner, M.; Brown, A.; Clark, C.; Houthuijs, D.; Breugelmans, O.; van Beek, A.; Janssen-Stelder, B. Study on methodology to perform environmental noise and health assessment.
 103. Tinguely, G.; Cajochen, C., Sleep times, sleep quality and subjectively perceived disturbing noise sources in a representative sample of the Swiss Population. In *10th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*, London, UK, 2011.
 104. FORS MOSAiCH-ISSP. <https://forscenter.ch/projekte/mosaich/?lang=de>
 105. Brink, M.; Wirth, K.; Rometsch, R.; Schierz, C. Lärmstudie 2000 Zusammenfassung. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=444> (1 January 2008),
 106. SiRENE study group SiRENE website. <http://www.sirene-studie.ch>
 107. Brink, M.; Schierz, C. *Review und erweiterter Berechnungsvorschlag zum Zürcher Fluglärm-Index ZFI (Version 2.05)*; ETH Zürich, Zentrum für Organisations- und Arbeitswissenschaften: 2007; p 71.
 108. Schuette, M.; Marks, A.; Wenning, E.; Griefahn, B., The development of the noise sensitivity questionnaire. *Noise and Health* **2007**, 9, (34), 15-24.

109. Griefahn, B.; Marks, A.; Gjestland, T.; Preis, A. In *Annoyance and noise sensitivity in urban areas*, ICA 2007, Madrid, 2007; Madrid, 2007.
110. Wunderli, J. M.; Pieren, R.; Habermacher, M.; Vienneau, D.; Cajochen, C.; Probst-Hensch, N.; Roosli, M.; Brink, M., Intermittency ratio: A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure. *J Expo Sci Environ Epidemiol* **2015**, 1-11.
111. McKelvey, R. D.; Zavoina, W., Statistical-Model for Analysis of Ordinal Level Dependent Variables. *Journal of Mathematical Sociology* **1975**, 4, (1), 103-120.
112. Nagelkerke, N. J. D., A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika* **78** **1991**, 78, 691-692.