



---

ZWISCHENBERICHT – 24.11.2021

---

# Neuberechnung der Lärmkosten des Verkehrs in der Schweiz

Stand vor Einfrieren des Projektes

Im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung und des  
Bundesamtes für Umwelt

# Impressum

## Empfohlene Zitierweise

Autor: Ecoplan, Swiss TPH  
Titel: Neuberechnung der  
Lärmkosten des Verkehrs  
in der Schweiz  
Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung und Bundesamt für Umwelt  
Ort: Bern, Altdorf und Basel  
Datum: 24.11.2021

## Begleitgruppe

Joséphine Leuba (Bundesamt für Raumentwicklung, ab März 2021)  
Christina Hürzeler (Bundesamt für Raumentwicklung ARE, bis März 2021)  
Frank Abbühl (Bundesamt für Strassen ASTRA)  
Hans Bögli (Bundesamt für Umwelt BAFU)  
Andreas Catillaz (Bundesamt für Umwelt BAFU)  
Daniel Hiltbrunner (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL)  
Markus Liechti (Bundesamt für Verkehr BAV)  
Basil Oberholzer (Bundesamt für Umwelt BAFU, bis Juni 2021)  
Alexandra Quandt (Bundesamt für Statistik BFS)  
Manfred Zbinden (Bundesamt für Strassen ASTRA)

## Projektteam

Christoph Lieb (Ecoplan, Projektleitung)  
Heini Sommer (Ecoplan)  
Matthias Amacher (Ecoplan)

Martin Rösli (Swiss TPH)  
Danielle Vienneau (Swiss TPH)

Der Bericht gibt die Auffassung des Projektteams wieder, die nicht notwendigerweise mit derjenigen des Auftraggebers bzw. der Auftraggeberin oder der Begleitorgane übereinstimmen muss.

### ECOPLAN AG

Forschung und Beratung  
in Wirtschaft und Politik

[www.ecoplan.ch](http://www.ecoplan.ch)

Monbijoustrasse 14  
CH - 3011 Bern  
Tel +41 31 356 61 61  
[bern@ecoplan.ch](mailto:bern@ecoplan.ch)

Dätwylerstrasse 25  
CH - 6460 Altdorf  
Tel +41 41 870 90 60  
[altdorf@ecoplan.ch](mailto:altdorf@ecoplan.ch)

### Swiss TPH

Schweizerisches Tropen- und  
Public Health-Institut

[www.swisstph.ch](http://www.swisstph.ch)

Socinstrasse 57  
Postfach  
CH-4002 Basel

Tel. +41 61 284 83 83  
[martin.roosli@swisstph.ch](mailto:martin.roosli@swisstph.ch)

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>4</b>
1.1	Ausgangslage .....	4
1.2	Ziele .....	6
1.3	Aufbau des Berichtes .....	6
<b>2</b>	<b>Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Berechnungsgegenstand</b> .....	<b>11</b>
3.1	Übersicht .....	11
3.2	Additivität Ruhestörungen und Gesundheitskosten .....	14
3.3	Umgang mit Mehrfachbelastungen .....	16
<b>4</b>	<b>Bewertungsmethodik und wichtigste neue Erkenntnisse</b> .....	<b>19</b>
4.1	Belästigungen.....	19
4.1.1	Drei mögliche Bewertungsmethoden für Belästigungen .....	19
4.1.2	Wichtigste Neuerungen gegenüber bisheriger Methodik .....	23
4.1.3	Verwendete Bewertungsmethodik für Belästigungen .....	24
4.2	Gesundheitskosten .....	26
4.2.1	Ausgangslage.....	26
4.2.2	Wichtigste Neuerungen gegenüber bisheriger Methodik .....	26
4.2.3	Verwendete Bewertungsmethodik für Gesundheitskosten .....	27
<b>5</b>	<b>Mengengerüst</b> .....	<b>29</b>
5.1	Lärmbelastung.....	29
5.1.1	Die Lärmdatenbank sonBASE: Ermittlung der Lärmbelastung .....	29
5.1.2	Strassenverkehr .....	29
5.1.3	Schienenverkehr .....	31
5.1.4	Luftverkehr .....	31
5.1.5	Unsicherheit der Lärmberechnungen.....	32
5.2	Gesundheitseffekte .....	32
5.2.1	Evidenzbeurteilung.....	33
5.2.2	Auswahl der Krankheitsbilder.....	52
5.2.3	Herleitung der Expositions-Wirkungs-Beziehungen .....	54
5.2.4	Verwendete Expositions-Wirkungs-Beziehungen .....	61
5.2.5	Krankheitshäufigkeiten .....	62
5.2.6	Lärmbedingte Morbidität und Mortalität .....	63

<b>6</b>	<b>Wertgerüst .....</b>	<b>66</b>
6.1	Belästigungen.....	66
6.1.1	Abnahme Wohnungspreise.....	66
6.1.2	Festlegung der Preisniveaus von Wohnungen .....	79
6.2	Gesundheitskosten .....	82
6.2.1	Allgemeines.....	82
6.2.2	Medizinische Heilungskosten.....	82
6.2.3	Produktionsausfall.....	84
6.2.4	Wiederbesetzungskosten.....	85
6.2.5	Immaterielle Kosten .....	85
6.2.6	Zusammenfassung der verwendeten Kostensätze.....	86
6.3	Internalisierungsbeiträge.....	86
<b>7</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>88</b>
7.1	Überblick Gesamtverkehr.....	88
7.2	Strassenverkehr .....	88
7.3	Schienenverkehr .....	88
7.4	Luftverkehr .....	88
7.5	Ergebnisse pro Leistungseinheit.....	88
<b>8</b>	<b>Sensitivitätsanalyse .....</b>	<b>89</b>
8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten.....	89
8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse .....	90
8.3	Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen .....	90
<b>9</b>	<b>Vergleich zu den bisherigen Berechnungen .....</b>	<b>94</b>
<b>10</b>	<b>Zeitreihe der Lärmkosten 2010 bis 2019.....</b>	<b>95</b>
10.1	Methodik zur Herleitung der Zeitreihe .....	95
10.2	Ergebnisse für die Zeitreihe 2010 – 2019.....	95
	<b>Anhang A: Expertenfrage .....</b>	<b>96</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>98</b>

## Abstract

Ca. ½ Seite (gemäss Vertrag)

Folgt 2023 / 2024

## Kurzfassung

Ca. 5-10 Seiten (gemäss Vertrag)

Folgt 2023 / 2024

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Die externen Effekte des Verkehrs werden vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) seit bald 20 Jahren regelmässig ermittelt und ausgewiesen. Sie fliessen in die BFS-Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs ein. Zudem sind die externen Effekte des Strassenverkehrs eine wichtige Grundlage für die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA).

Die letzte umfassende Überarbeitung der Methodik wurde von Ecoplan, Infrac (2014)<sup>1</sup> für das Berechnungsjahr 2010 erstellt. Für das Berechnungsjahr 2015 erfolgte eine einfache Überarbeitung durch Infrac, Ecoplan (2019)<sup>2</sup>, in der nicht alle methodischen Fragestellungen aufdatiert werden konnten.

Insbesondere bei den **Lärmkosten** des Strassen-, Schienen- und Luftverkehrs stehen seit der letzten umfassenden Überarbeitung im Jahr 2014 (für das Berechnungsjahr 2010) in vielen Bereichen neue Grundlagen zur Verfügung:

- Das BAFU hat die Lärmbelastung der Schweizer Bevölkerung mit dem Lärmmodell son-BASE neu berechnet.
- Die Zürcher Kantonalbank (ZKB) hat eine neue Studie<sup>3</sup> verfasst, aus welcher neue Erkenntnisse zur Wirkung des Lärms auf die Wohnungspreise vorliegen.
- Bei den Gesundheitskosten sind viele neue Studien zum Zusammenhang zwischen Lärm und verschiedenen Krankheitsbildern erschienen, die eine Überarbeitung der berücksichtigten Krankheitsbilder und der Belastungs-Wirkungs-Beziehungen nahelegen.

Die nächste umfassende Methodenüberprüfung der gesamten externen Effekte des Verkehrs soll in ca. 2 Jahren durchgeführt werden. Die Überarbeitung des Lärmbereichs soll nun aber aufgrund der neu verfügbaren Grundlagen vorgezogen werden, dafür wird er dann in 2 Jahren nicht nochmals im Detail analysiert. In Absprache mit dem Auftraggeber werden bei dieser vorgezogenen Überarbeitung **nur die lärmspezifischen Fragestellungen und Datengrundlagen** untersucht. Datengrundlagen, die auch auf andere Kostenbereiche einen Einfluss haben, werden erst bei der nächsten umfassenden Überarbeitung in ca. 2 Jahren einer eingehenden Prüfung unterzogen.<sup>4</sup> Grund hierfür ist, dass die Zeitreihen in den anderen Kostenbereichen durch die Anpassung nicht betroffen werden sollen und dass Inkonsistenzen zwischen den Berechnungen im Lärmbereich und z.B. den Berechnungen im Bereich Luftbelastung vermieden werden sollen.

---

<sup>1</sup> Ecoplan; Infrac (2014)

<sup>2</sup> Infrac; Ecoplan (2019)

<sup>3</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2019)

<sup>4</sup> Entsprechend werden z.B. die folgenden Datengrundlagen NICHT überarbeitet: VOSL (value of statistical life), Sterbewahrscheinlichkeiten nach 1-Jahres-Altersklassen, medizinische Heilungskosten pro Krankheitsbild, immaterielle Kostensätze pro Krankheitsbild, Verteilung der Spalkkosten auf die Kostenträger. All diese Daten haben auch Auswirkungen auf die Bereiche Gesundheitskosten der Luftbelastung, Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs und Unfälle.

### Stand der Arbeiten

Die Arbeiten an der Berechnung der Lärmkosten waren schon weit fortgeschritten, als sich Anfang 2021 herausstellte, dass die Inputdaten zu den Lärmbelastungen unplausibel sind, da der Lärmanteil der Motorräder deutlich zu hoch war. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Motorräder in den Berechnungen gemäss bisheriger Methodik als laute Fahrzeuge (wie Lastwagen) betrachtet werden. Gemäss neusten Ergebnissen der Lärmforschung sind Motorräder aber eher als leise Fahrzeuge (wie Autos) zu berücksichtigen. Deshalb wurde beschlossen, die Lärmbelastungen bis Mitte 2021 durch n-sphere neu berechnen zu lassen und die Lärmkosten neu für 2019 (statt 2018) zu bestimmen.

Anfang Juni 2021 stellte sich jedoch heraus, dass die korrigierten Lärmberechnungen die Zahl der lärmbeeinträchtigten Personen um 45% bzw. 40% (Tag bzw. Nacht) vermindern würden, was als wenig plausibel taxiert wird. Das BAFU geht vielmehr davon aus, dass mit einem vollständig überarbeiteten sonBASE die Lärmbelastungen aufgrund von neuen Ausbreitungsrechnungen deutlich höher ausfallen werden. Die Arbeiten zur Aktualisierung von sonBASE sind bereits am Laufen, dauern aber noch bis 2023 (in welchem Monat die Ergebnisse vorliegen, ist noch nicht bekannt). Deshalb haben BAFU und ARE beschlossen, das laufende Projekt zu den Lärmkosten «einzufrieren» und erst nach Vorliegen der neuen Daten aus sonBASE wieder aufzunehmen.

Mit den neuen Lärmdaten aus sonBASE hätten im Sommer 2021 auch die Berechnungen der ZKB zur lärmbedingten Abnahme der Wohnungspreise aktualisiert werden und in unsere Berechnungen einfließen sollen. Diese Aktualisierung ist nun ebenfalls nicht möglich und muss auf 2023 / 2024 verschoben werden.<sup>5</sup>

Durch die deutliche Terminverschiebung bei den Lärmkosten dürften sich die Arbeiten mit den vorgesehenen Arbeiten des ARE zur Aktualisierung der gesamten externen Effekte des Verkehrs überschneiden. Gemäss ARE ist der Zeitplan der Arbeiten zu den externen Effekten noch offen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Arbeiten zu den externen Effekten bis Ende 2023 abgeschlossen sein dürften, so dass sie für die noch ausstehenden Abschlussarbeiten im Lärmbereich verwendet werden können. Die Berechnungen zu den externen Effekten sollen voraussichtlich für das Berichtsjahr 2021 durchgeführt werden. Entsprechend müssten auch die Lärmkosten in den Jahren 2023 / 2024 für das Jahr 2021 berechnet werden. Zudem werden bei Wiederaufnahme der Berechnungen zu den Lärmkosten im Jahr 2023 / 24 voraussichtlich aktualisierte Ergebnisse zu spezifischen Datengrundlagen aus den anderen Kostenbereichen vorliegen (vgl. Fussnote 4), die bei der Ermittlung der Lärmkosten zu berücksichtigen sind.

BAFU und ARE wollen vor dem «Einfrieren» der Arbeiten mit dem vorliegenden Bericht den «aktuellen Stand» sichern, soweit dies ohne Inputdaten zur Lärmbelastung möglich ist. Dies mit dem Ziel, im Jahr 2023 / 2024 mit geklärten Schnittstellen weiterfahren zu können.

<sup>5</sup> Das BAFU lässt zurzeit offen, ob diese Arbeiten weiterhin an die ZKB vergeben werden. Mögliche alternative Auftragnehmer wären u.a. FPRE (Fahrländer Partner Raumentwicklung) oder Wüest & Partner.

Aufgrund der fehlenden Inputdaten zu den Lärmimmissionen und zur lärmbedingten Abnahme der Wohnungspreise handelt es sich beim vorliegenden Zwischenbericht vorwiegend um ein Methodikpapier, in dem aber auch die bereits erhobenen Inputdaten erläutert werden. Der Zwischenbericht dokumentiert die bisherigen Arbeiten und skizziert die noch zu leistenden Arbeiten kurz. **Bemerkungen zu nötigen Arbeiten 2023 / 2024 werden jeweils grau hervorgehoben.**

## 1.2 Ziele

Das Hauptziel der vorliegenden Studie ist es, die **Berechnung der Lärmkosten des Verkehrs in der Schweiz auf den aktuellen Stand der Forschung zu bringen.**

Die umfassende Überarbeitung der Lärmkosten soll wie bisher für den **Strassen-, Schienen- und Luftverkehr** erfolgen (für den Schiffsverkehr werden weiterhin keine Lärmkosten ausgewiesen). Die Berechnungen werden für das **Jahr 2019** durchgeführt (**später wahrscheinlich 2021**).

Das **generelle Konzept** zur Berechnung der externen Kosten mit der Definition von sozialen und externen Kosten, der Festlegung des Territorialprinzips, dem Umgang mit Unsicherheiten und der Abgrenzung der Verkehrsträger wird unverändert übernommen (vgl. Kapitel 2).<sup>6</sup> Damit wird sichergestellt, dass die neuen Ergebnisse zu den Lärmkosten kompatibel mit den übrigen Kostenbereichen bleiben.

## 1.3 Aufbau des Berichtes

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert:

- In Kapitel 2 wird zuerst das grundlegende methodische Vorgehen bei der Berechnung der externen Effekte zusammengefasst.
- In Kapitel 3 wird der Berechnungsgegenstand (Lärmkosten) mit einer kurzen Beschreibung des Wirkungszusammenhangs erläutert.
- In Kapitel 4 wird die Berechnungsmethodik (inkl. einer schematischen Darstellung des Berechnungsgegenstands) vorgestellt und es werden die wichtigsten Neuerungen gegenüber der bisherigen Berechnungsmethodik aufgezeigt.
- In Kapitel 5 wird das Mengengerüstes (lärmbelastete Personen und Wohnungen, Anzahl Krankheits- und Todesfälle) hergeleitet.
- In Kapitel 6 wird das Wertgerüstes bzw. die verwendeten Kostensätze für die Monetarisierung des Mengengerüstes bestimmt.
- In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Berechnungen, d.h. die Lärmkosten des Strassen-, Schienen- und Luftverkehrs dargestellt.

---

<sup>6</sup> Ecoplan; Infrac (2014), Kapitel 2.

- In Kapitel 8 wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, wobei unsichere Annahmen, Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und zusätzliche Unter- oder Überschätzungen dargestellt werden.
- In Kapitel 9 werden die Ergebnisse für das Jahr 2019 mit den Ergebnissen gemäss der bisherigen Methodik für das gleiche Jahr verglichen.
- In Kapitel 10 wird schliesslich eine Zeitreihe der Lärmkosten von 2010 bis 2019 hergeleitet.

## 2 Methodisches Vorgehen

Die grundsätzliche Methodik zur Berechnung der externen Effekte des Verkehrs bleibt gegenüber den bisherigen Arbeiten<sup>7</sup> unverändert und orientiert sich weiterhin an den folgenden wichtigsten Eckpunkten:

- Es werden sowohl die sozialen als auch die externen Kosten berechnet, wobei die externen Kosten für drei Sichtweisen (vgl. folgenden Exkurs) bestimmt werden: a. Sicht Verkehrsträger (steht für die BFS-Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs (KFV-Statistik) im Vordergrund), b. Sicht Verkehrsteilnehmende (relevant für Internalisierung der externen Kosten) und c. Sicht Verkehrsart Schwerverkehr (relevant für Berechnung der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe LSVA). Im Lärmbereich führen diese drei Sichtweisen allerdings zu exakt identischen Ergebnissen.
- Bei der Bestimmung der externen Kosten werden Internalisierungsbeiträge berücksichtigt und abgezogen.
- Im Strassen- und Schienenverkehr wird das Territorialprinzip verwendet, im Luftverkehr das Halbstreckenprinzip.
- Die Bewertung der externen Effekte erfolgt wenn möglich über Marktpreise. Liegen keine Marktpreise vor, wird versucht, die Schadenskosten zu bestimmen (über den Hedonic Pricing Ansatz oder den Zahlungsbereitschaftsansatz). Ist auch dies nicht möglich, kommen der Vermeidungskostenansatz oder der Reparaturkosten- / Ersatzkostenansatz zum Einsatz.
- Die Berechnung der Kosten erfolgt zu Faktorpreisen für das Jahr 2019 (später 2021).
- Mit Unsicherheiten bei den Berechnungen wird wie folgt umgegangen: Falls ein wissenschaftlich fundierter «best guess» vorliegt, wird dieser Wert verwendet. Ansonsten beruht die Berechnung auf einer vorsichtigen Schätzung («at least Ansatz»). Wie in den bisherigen Berechnungen werden jene Annahmen einer **Sensitivitätsanalyse** unterzogen, die einen massgeblichen Einfluss auf die Höhe der Lärmkosten haben.
- Wie bisher geht es primär darum, die **gesamten Lärmkosten in der Schweiz** zu bestimmen. Basierend darauf werden auch die **Durchschnittskosten** pro Fahrzeug-, Tonnen- und Personenkilometer ermittelt. In Absprache mit dem Auftraggeber wird jedoch wie bisher darauf **verzichtet**, die **Grenzkosten** des Lärms herzuleiten.<sup>8</sup> Die überarbeitete Berechnungsmethodik wird aber kein Hemmnis für eine allfällige spätere Ermittlung von Grenzkosten darstellen.

Details zu diesen methodischen Eckpunkten sowie weitere methodische Grundlagen (z.B. die Abgrenzung der Verkehrsträger) finden sich in Kapitel 2 des Berichts von Ecoplan, Infrac (2014).<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> Ausführlich erläutert in Ecoplan; Infrac (2014, Kapitel 2) und unverändert übernommen in Infrac; Ecoplan (2019).

<sup>8</sup> Ecoplan; Infrac (2014), Kapitel 2.6.

<sup>9</sup> Ecoplan; Infrac (2014)

**Exkurs: Soziale und externe Kosten<sup>10</sup>**

Soziale, externe und interne Kosten können wie folgt definiert werden:

- **Soziale Kosten:** Die sozialen (oder volkswirtschaftlichen) Kosten des Verkehrs umfassen sämtliche gesellschaftlichen Kosten, die durch die Verkehrsaktivität entstehen. Sie setzen sich aus den internen und externen Kosten zusammen.
- **Interne Kosten:** Die internen Kosten sind jene Kosten, welche die Verkehrsteilnehmenden selbst für ihre Fahrten auf sich nehmen. Sie setzen sich aus materiellen Kosten (z.B. Benzinkosten, Autobahnvignette, Versicherungsbeiträge an die Motorfahrzeugversicherung usw.) und immateriellen Kosten (z.B. nervliche Belastung bei der Autofahrt, persönlich getragene Unfallfolgen usw.) zusammen.
- **Externe Kosten:** Als extern wird jener Teil der sozialen Kosten bezeichnet, für den nicht die Verursachenden der Verkehrsaktivität aufkommen. Typische Beispiele sind etwa der Lärm und die Luftverschmutzung, welche durch die Verkehrsaktivität verursacht werden, die sich jedoch im Preis für die Fahrt nicht widerspiegeln. Diese Kosten fallen z.B. bei den Anwohnern (Gesundheitskosten) oder als gesamtgesellschaftlich zu tragende Klimakosten an.

Wie hoch externe Kosten sind, ist immer auch abhängig von der Sichtweise bzw. von der Definition, was als system-intern und was als system-extern angesehen wird. Die externen Kosten des Verkehrs können aus drei verschiedenen Sichtweisen bestimmt werden:

- **Sicht Verkehrsteilnehmende:** Bei dieser Sicht wird für die Abgrenzung von internen und externen Kosten vom einzelnen Verkehrsteilnehmenden ausgegangen. Alle Kosten, die der Teilnehmende an der Verkehrsaktivität nicht selbst trägt, werden als extern betrachtet. Es spielt dabei keine Rolle, wo diese ungedeckten Kosten anfallen (z.B. bei anderen Verkehrsteilnehmenden, beim Steuerzahler oder bei einem Unternehmen). Bei der Sicht Verkehrsteilnehmende steht die volkswirtschaftlich **effiziente** Nutzung der Verkehrsinfrastruktur im Zentrum der Kostenermittlung.
- **Sicht Verkehrsträger:** Der gesamte Verkehrsträger (z.B. Strasse oder Schiene) wird als eine Einheit betrachtet. Innerhalb des Verkehrsträgers werden alle Kosten als intern angesehen. Externe Kosten ergeben sich bei dieser Sicht nur, wenn sie ausserhalb des Verkehrsträgers anfallen. Alle übrigen Kosten, die beispielsweise auf der Strasse zwischen einem Personenwagenlenker und einer Motorradfahrerin entstehen, sind intern, weil sie innerhalb des Verkehrsträgers anfallen. Bei der Sicht Verkehrsträger geht es um die Frage, welcher Verkehrsträger welche Kosten verursacht und bis zu welchem Grad diese Kosten innerhalb des Verkehrsträgers gedeckt werden (**Kostendeckungsgrad**).
- **Sicht Verkehrsart:** Hier steht die Verkehrsart (z.B. Schwerverkehr) im Zentrum. Als extern gelten alle Kosten, die nicht bei der eigenen Verkehrsart anfallen. Im Gegensatz zur Sicht Verkehrsträger werden also Kosten, die ein Lastwagen einem Personenwagen verursacht, als extern betrachtet. Im Unterschied zur Sicht Verkehrsteilnehmende werden

<sup>10</sup> Die folgenden Ausführungen basieren auf Ecoplan; Infrac (2014, Kapitel 2.1).

aber Kosten, die ein Lastwagen einem Sattelschlepper verursacht, als intern betrachtet. Die Sicht Verkehrsart eignet sich für die Abschätzung der Kosten, die eine bestimmte Verkehrsart (z.B. der Schwerverkehr) auf alle anderen Verkehrsarten und Nicht-Verkehrsteilnehmende ausübt. Sie wurde vom Bundesgericht für die Berechnung der LSVA explizit vorgeschrieben.

Dabei gilt folgende Ungleichung:

$$\begin{array}{ccc} \text{Externe Kosten aus Sicht} & \leq & \text{Externe Kosten aus Sicht} & \leq & \text{Externe Kosten aus Sicht} \\ \text{Verkehrsträger} & & \text{Verkehrsart} & & \text{Verkehrsteilnehmende} \end{array}$$

Grundsätzlich nehmen die externen Kosten zu, wenn der Kreis, der als extern angesehenen Kostenträger, vergrössert wird. Dies gilt insbesondere für die Unfallkosten (unterschiedliche Behandlung der Unfälle zwischen einzelnen Verkehrsteilnehmenden oder Verkehrsarten). Für die **Lärmkosten** sind die externen Kosten aber aus **allen drei Sichten gleich hoch**, weil keine Kosten zwischen den Verkehrsteilnehmenden auftreten. Entsprechend gelten die im Folgenden berechneten externen Kosten für alle Sichtweisen. Ergänzend werden auch die gesamten sozialen Kosten ausgewiesen (vor Abzug der Internalisierung durch Lärmgebühren im Luftverkehr).

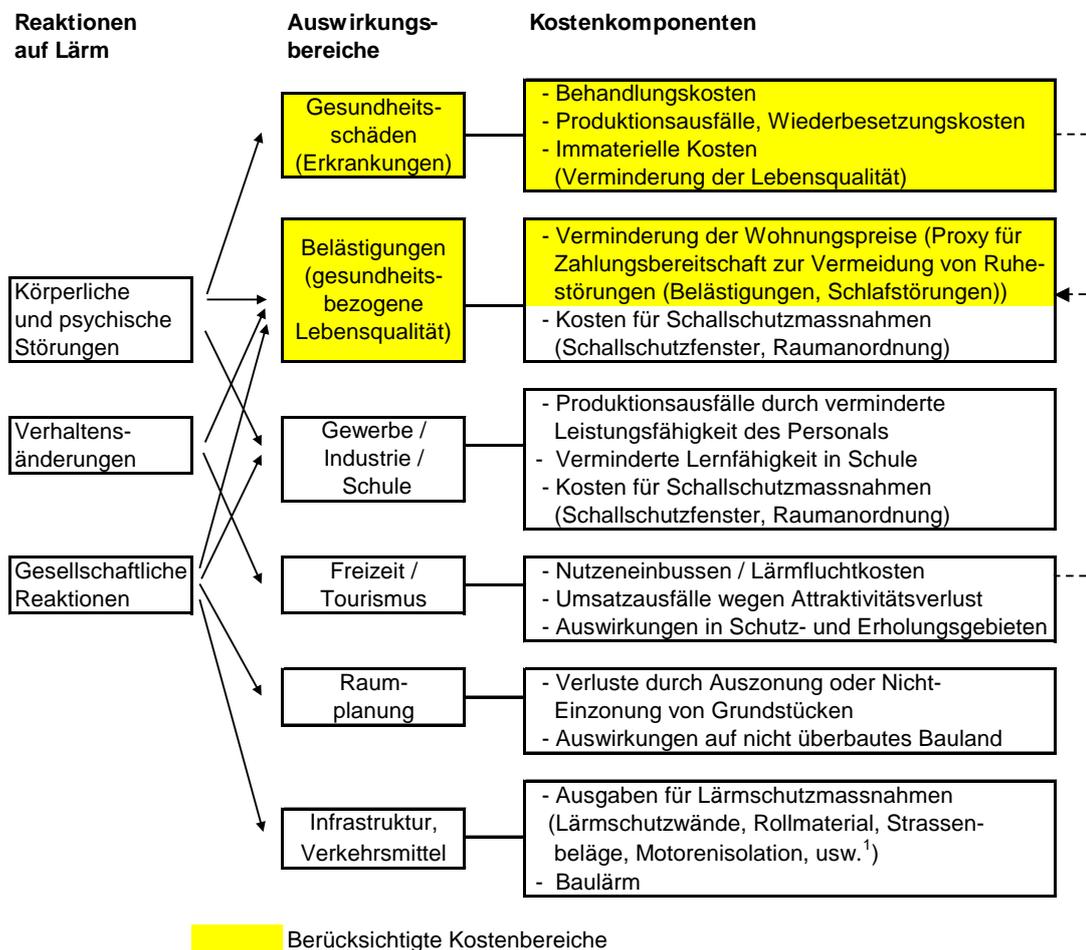
Für weitergehende Erläuterungen zu externen und sozialen Kosten siehe Ecoplan, Infras (2014, Kapitel 2.1).

### 3 Berechnungsgegenstand

#### 3.1 Übersicht

Lärm führt zu zahlreichen individuellen und gesellschaftlichen Störungen / Belästigungen. Diese Reaktionen verursachen meist volkswirtschaftliche Kosten. Einen Überblick über die Verhaltensmuster und die davon betroffenen Auswirkungsbereiche ist in Abbildung 3-1 dargestellt. In den Berechnungen zu den Lärmkosten werden die beiden gelb markierten Kostenbereiche quantifiziert und monetarisiert:

Abbildung 3-1: Auswirkungen des Lärms und ermittelte Kosten



<sup>1</sup> Die Kosten an der Strasseninfrastruktur (Lärmschutzwände, Strassenbeläge) sind in der Strassenrechnung enthalten, aber nicht einzeln ausgewiesen.

Quelle: Ecoplan, Infrac (2014), Abbildung 8-1.

- **Belästigungen:** Lärm wird von den Betroffenen zum Teil bewusst als störend oder belästigend wahrgenommen. So führen zum Beispiel einzelne Zugsdurchfahrten oder weggehende Autos zu Störungen von Aktivitäten und der Kommunikation, zu Unterbrüchen des Schlafs oder zu Störungen von Ruhe und Erholung. Die Kosten dieser bewusst wahrgenommenen Einschränkung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität<sup>11</sup> werden oft über die Reduktion der Wohnungspreise von belärmten Wohnungen bewertet<sup>12</sup>: Die grundsätzliche Überlegung dabei ist, dass Wohnungen mit einer Lärmexposition weniger stark nachgefragt werden und daher auf dem Wohnungsmarkt einen geringeren Marktwert haben, als vergleichbare Wohnungen an ruhiger Wohnlage (vgl. dazu auch den folgenden Exkurs). Der beobachtete Abschlag auf den Wohnungspreisen ist eine Näherung für die Zahlungsbereitschaft der BewohnerInnen für Ruhe.
- **Gesundheitsschäden** durch Lärmbelastung: Lärm kann nebst den beschriebenen bewussten Belästigungen bei den Betroffenen auch zu gesundheitlichen Problemen führen, insbesondere zu körperlichen und psychischen Krankheiten. Drei Hauptmechanismen sind verantwortlich für die Gesundheitsschäden des Lärms: Schlafstörungen, Stresshormone und autonomes Nervensystem, die miteinander interagieren. Gesundheitliche Folgen ergeben sich dabei meist aufgrund von mittel- bis langfristig auftretenden Lärmbelastungen. Über epidemiologische Studien kann der Zusammenhang zwischen Lärmbelastungen und verschiedenen Krankheitsbildern ermittelt werden (Belastungs-Wirkungs-Beziehungen). Mit dieser Kenntnis lassen sich in der Folge die Anzahl lärmbedingter Krankheits- und Todesfälle berechnen und die damit verursachten Kosten bestimmen.

Weitere Kostenkomponenten wurden in den bisherigen Berechnungen gemäss der Darstellung in Abbildung 3-1 nicht erfasst. Dies bleibt auch in der vorliegenden Studie so.<sup>13</sup>

Die Ausgaben für Lärmschutzmassnahmen – seien es z.B. Schallschutzfenster, Lärmschutzwände oder lärmarme Beläge – werden nicht in die Berechnungen der externen Kosten aufgenommen. Hintergrund hierfür ist der Umstand, dass diese Ausgaben bereits in der Strassenrechnung des BFS enthalten sind und – soweit die Infrastrukturkosten durch Einnahmen aus dem Verkehrsbereich gedeckt sind – auch keine externen Kosten darstellen.<sup>14</sup> Folglich wird auf die Ermittlung der Kosten für Lärmschutzmassnahmen im Rahmen der externen Kosten

---

<sup>11</sup> Belästigung und Schlafstörung werden von der WHO als Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit betrachtet (WHO World Health Organisation (2018)), wir fassen sie jedoch unter dem Begriff «Belästigungen» zusammen, um sie gegenüber den eigentlichen Gesundheitsschäden klar abgrenzen zu können. Nur im Zusammenhang mit Erkrankungen sprechen wir von Gesundheitsschäden.

<sup>12</sup> Für alternative Bewertungsmethoden für die Belästigung und die Wahl der Reduktion der Wohnungspreise siehe Kapitel 4.1.1

<sup>13</sup> Uns sind keine Kostenbereiche bekannt, die aufgrund von neuen Datengrundlagen oder Forschungsergebnissen miteinbezogen werden müssten. Auch im aktuellen EU-Handbuch werden keine weiteren Kostenbereiche integriert (sondern nur kurz diskutiert – European Commission (2019), S. 206). Die EEA erwähnt in ihrem Lärmbericht (EEA European Environment Agency (2020a) Kapitel 4 und 5) zwar neue Bereiche (unterschiedliche Auswirkungen des Lärms auf unterschiedliche soziale Schichten, Auswirkungen auf Biodiversität), diese werden aber nicht in Geldeinheiten ausgedrückt. Auftragsgemäss wird deshalb darauf verzichtet, eine tiefergehende Analyse möglicher neuer Kostenbereiche vorzunehmen.

<sup>14</sup> Ist die finanzielle Deckung nicht gegeben, fliesst die Unterdeckung als ungedeckte Ausgaben der öffentlichen Hand in die Zusammenstellung des BFS zu den «Kosten und Finanzierung des Verkehrs» ein.

verzichtet, weil dies entweder zu einer Doppelzählung führen würde oder sonst die Ermittlung der BFS Strassenrechnung angepasst werden müsste.

Im **Schiffsverkehr** führt der Lärm zu **vernachlässigbar kleinen Kosten**.<sup>15, 16</sup> Der Schiffsverkehr wird im Folgenden deshalb nicht weiter betrachtet. Untersucht werden damit die Lärmkosten im Strassen-, Schienen- und Luftverkehr.

#### **Exkurs: Berücksichtigung lärmbedingter Wertverluste von Liegenschaften**

Oft wird beobachtet, dass an lärmexponierten Standorten der Wert von Liegenschaften sinkt. Diese Wertreduktion ist in den hier berechneten Lärmkosten enthalten. Bei Mietwohnungen leidet der Mieter unter dem Lärm, bezahlt dafür aber eine tiefere Miete, so dass der Mieter (im Durchschnitt) keine Kosten trägt. Die Lärmkosten trägt der Liegenschaftseigentümer, der seine belärmte Mietwohnungen günstiger vermieten muss – oder, falls er die Mietwohnungen verkauft, einen geringeren Verkaufserlös erzielt. Der geringere Immobilienwert spiegelt dabei aber nur die Belästigungen und die Schlafstörungen, welche die Bewohner der Liegenschaft (bzw. der Mieter) in Zukunft erleiden müssen.

Bei Eigentumswohnungen leidet der Eigentümer entweder selbst unter dem Lärm, wenn er dort wohnt, oder unter dem geringeren Immobilienwert, wenn er die Immobilie verkauft. Hat er die Immobilie erst gerade gekauft, wurde der Eigentümer aber beim tieferen Kaufpreis für die nun zu erdulde Lärmbelastung kompensiert.

Die in den Berechnungen berücksichtigte Reduktion der Wohnungspreise stellt also die jährlich anfallenden Kosten des Lärms durch Belästigungen und Schlafstörungen dar. Wird ein Haus verkauft, so spiegelt der Verkaufspreis die diskontierten Kosten von künftigen Belästigungen und Schlafstörungen in allen folgenden Jahren.<sup>17</sup> Eine zusätzliche Berücksichtigung von lärmbedingten Wertverlusten von Liegenschaften würde deshalb zu einer Doppelzählung führen bzw. es würde nicht mehr nur der Lärm im Jahr 2019 (später 2021) bewertet, sondern der künftige Lärm in den Jahren nach dem Verkauf, was methodisch falsch wäre. Auf eine gesonderte Berücksichtigung von Wertminderungen von Immobilien muss deshalb verzichtet werden.

<sup>15</sup> IRENE; Ecosys (2013)

<sup>16</sup> Auch im EU-Handbuch wird der Schiffsverkehr (inkl. Schifffahrt auf dem Meer) beim Lärm vernachlässigt (European Commission (2019), S. 76). Ebenso wird in Deutschland bei der Ermittlung der Lärmkosten der Schiffsverkehr nicht berücksichtigt (UBA Umweltbundesamt (2019)).

<sup>17</sup> Dies ist auch der Grund, warum die Entschädigungsleistungen des Flughafens Zürich (gemäss ASTRA) höher sind als die hier berechneten Kosten des Fluglärms: Bei der Entschädigung handelt es sich um eine einmalige Zahlung, die alle künftigen Lärmkosten abdecken sollte, hier werden jedoch nur die Lärmkosten des aktuellen Jahres berücksichtigt.

### 3.2 Additivität Ruhestörungen und Gesundheitskosten

Bei der Berücksichtigung von Ruhestörungen über den Indikator der verminderten Wohnungspreise sowie der separaten Ermittlung von lärmbedingten Gesundheitsschäden stellt sich die Frage, ob es bei der Addition der beiden Effekte nicht zu Doppelzählungen kommen könnte. Eine Doppelzählung kann verneint werden, wenn die lärmbedingte Reduktion der Wohnungspreise nur die Effekte von Belästigung und Schlafstörungen umfasst, nicht aber die lärmbedingten Gesundheitskosten abdeckt. Eine Doppelzählung würde hingegen auftreten, wenn die gesundheitlichen Folgen der Lärmbelastung bewusst in die Bewertung (Nachfrage) einer angebotenen, lärmbelasteten Wohnung einfließen.

Wir gehen davon aus, dass die Bevölkerung über lärmbedingte Belästigung und Schlafstörungen gut informiert ist und dies die Zahlungsbereitschaft für Wohnungen beeinflusst. Hingegen treten lärmbedingte Gesundheitsschäden wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen nicht unmittelbar zusammen mit der Lärmbelastung auf, sondern stellen sich meist erst langfristig ein. Sie sind für die einzelnen, lärmbeeinträchtigten Personen daher auch nicht direkt als lärmbedingte Gesundheitsschäden beobachtbar oder als solche erkennbar, sondern erschliessen sich erst aus breit angelegten epidemiologischen Studien.<sup>18</sup> Darüber hinaus haben gesundheitliche Auswirkungen, die möglicherweise erst in ferner Zukunft mit kleiner Wahrscheinlichkeit auftreten, in der Regel wenig Gewicht in aktuellen Entscheidungsprozessen (siehe z.B. das Rauchverhalten vieler Menschen). Wir gehen aufgrund dieser verschiedenen Einschätzungen davon aus, dass bei der Addition keine Doppelzählung entsteht.<sup>19</sup>

**Fazit:** MieterInnen und HauskäuferInnen berücksichtigen kurzfristige und akut wahrnehmbare Beeinträchtigungen der gesundheitsbezogenen Lebensqualität (Lärmbelästigung und Schlafstörungen) bei der Bildung ihrer Zahlungsbereitschaft für Wohnobjekte. Die erst in ferner Zukunft und für den Einzelnen mit kleiner Wahrscheinlichkeit auftretenden Gesundheitsauswirkungen spielen jedoch keine (wesentliche) Rolle. Die aus hedonischen Modellen ermittelten lärmbedingten Wohnungspreisreduktionen und die (im Wohnungsmarkt kaum eingepreisten) lärmbedingten Gesundheitskosten müssen für eine vollständige Ermittlung der lärmbedingten Kosten deshalb zusammengezählt werden. Diese Argumentation wird auch durch die Ergebnisse einer im Juli / August 2020 durchgeführten Befragung von nationalen und internationalen ExpertInnen gestützt (vgl. folgenden Exkurs).

---

<sup>18</sup> Die Studie der WHO World Health Organisation (2018) stützt diese Annahme: Die Studie verfolgt zwar einen anderen Ansatz (Analyse von Belästigung, Schlafstörung und Gesundheitseffekten mit Vorgaben zur Berechnung von DALY), addiert aber ebenfalls die Gesundheitseffekte mit den Effekten aus Belästigungen und Schlafstörungen.

<sup>19</sup> Diese Schlussfolgerung zieht auch CEDR Conference of European Directors of Roads (2017).

**Exkurs: Expertenfrage zur Additivität von lärmbedingter Belästigung und lärmbedingten Gesundheitskosten**

In einer Umfrage unter 21 internationalen Expertinnen und Experten<sup>20</sup> haben wir unseren methodischen Ansatz mit der Addition der Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Ruhestörungen (über lärmbedingt tiefere Wohnungspreise) mit den lärmbedingten Gesundheitskosten erläutert und anhand konkreter Fragen zur Diskussion gestellt.

Alle befragten ExpertInnen unterstützen grundsätzlich die dargelegte Methode, dass die aus hedonischen Modellen ermittelten Mietpreisverluste aus lärmbedingter Belästigung (inkl. Schlafstörungen) zu den lärmbedingten Gesundheitskosten addiert werden können. Klar gegen die Addition spricht sich keine der befragten Personen aus.

7 der 21 ExpertInnen argumentieren, dass das Vorgehen zu einer Über- oder Unterschätzung führen könnte:

- Überschätzung: 3 ExpertInnen argumentieren, dass es nicht auszuschliessen sei (bzw. es wahrscheinlich sei), dass einige informierte Hauskäufer oder Mieter die lärmbedingten Gesundheitskosten bei der Bildung ihrer Zahlungsbereitschaft einbeziehen. Ihre Erläuterungen lassen aber auch darauf schliessen, dass sie den Anteil der so informierten und handelnden Hauskäufer bzw. Mieter mit grosser Wahrscheinlichkeit als klein einschätzen.
- Unterschätzung: 4 andere Experten vertreten die Meinung, dass die Reduktion der Wohnungspreise nicht alle Kosten von Belästigung und Schlafstörungen umfassen. So vertritt ein Experte die Meinung, dass die Reduktion der Wohnungspreise nur die Belästigung widerspiegeln, nicht aber die Schlafstörungen. Träfe dies zu, müsste zur Reduktion der Wohnungspreise und den Gesundheitskosten auch noch die Schlafstörungen addiert werden. Es wurde auch erwähnt, dass gewisse Leute zu wenige finanzielle Mittel haben, um die vorhandene Zahlungsbereitschaft auszuschöpfen.

Die Antwortenden führen teilweise zusätzliche Argumente für eine Addition ins Feld bzw. unterstützen eine Betrachtung der Addition als untere Grenze:

- Die Gesundheitskosten sind nicht in Wohnungspreisen enthalten, weil sie für die Betroffenen kaum sichtbar sind (geringe Eintretenswahrscheinlichkeit von Gesundheitseffekten durch Lärm und unklare Zuordnung der Krankheit zum Lärm im Einzelfall).
- In mehreren Antworten wird erläutert, warum bei der Bildung der Wohnungspreise die Gesundheitskosten nicht berücksichtigt werden: Die Zusammenhänge sind für die meisten Wohnungssuchenden «zu abstrakt». Kenntnisse über Gesundheitseffekte sind – nach Einschätzung der befragten Expertinnen und Experten – «praktisch nicht-existent» oder Gesundheitseffekte werden «einfach ignoriert».
- Die gesundheitlichen Zusammenhänge zeigen sich erst langfristig und langfristige Wirkungen werden meist wenig beachtet.

<sup>20</sup> Für eine Liste der befragten Personen und der gestellten Fragen siehe Anhang A.

- Selbst wenn sich Wohnungssuchende der gesundheitlichen Auswirkungen des Lärms bewusst wären, wäre es fraglich, ob sie dieses Wissen auch aktiv bei der Wahl des Wohnortes verwenden und die Wohnungspreise folglich aufgrund der Gesundheitseffekte tiefer ausfallen.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass man aufgrund des Lärms erkrankt, ist klein. Deshalb glauben viele Leute, dass sie selbst nicht davon betroffen sein werden.
- Die SIRENE Studie<sup>21</sup> hat gezeigt, dass auch Personen lärmbedingte Krankheiten entwickeln, die sich selbst als nicht-lärmbelästigt bezeichnen. Dies bedeutet, dass selbst Personen, die ihren Wohnort nach Lärmbelästigung wählen, sich täuschen können. Selbst hier entsteht keine Doppelzählung zwischen Wohnungspreisen und Gesundheitsschäden.

Schliesslich sind den internationalen und nationalen Expertinnen keine Studien bekannt, welche die Additivität von geringeren Wohnungspreisen und Gesundheitskosten bestätigen oder widerlegen können. Zu dieser Frage besteht also noch Forschungsbedarf.

Im Grundsatz unterstützen alle befragten ExpertInnen die dargelegte Argumentation und damit auch eine Addition der beiden Kostenkomponenten. Von 21 Befragten halten 3 eine partielle Doppelzählung für wahrscheinlich bzw. können diese nicht ausschliessen. Wobei keine der ExpertInnen eine Untersuchung nennt, die das Ausmass der Doppelzählung quantitativ untersucht. Wiederholt wird jedoch die Vermutung geäussert, dass die Doppelzählung (vernachlässigbar) klein sein dürfte. Es gibt zudem 4 ExpertInnen, die davon ausgehen, dass selbst eine Addition immer noch zu einer Unterschätzung führt.

### 3.3 Umgang mit Mehrfachbelastungen

Gewisse Gebäude bzw. Personen werden von mehreren Lärmquellen (Strassen-, Schienen- und Luftverkehr) gleichzeitig belastet. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die drei Lärmquellen in den Berechnungen als unabhängig betrachtet werden können und damit addiert werden dürfen oder ob bei der Addition mögliche Doppelzählungen zu berücksichtigen sind.

Ein Argument für die Addition der verschiedenen Lärmarten sind unterschiedliche Charakteristika (Pegelspitzen, Dauer der einzelnen Ereignisse, Frequenz usw.), was dazu führt, dass verschiedene Lärmquellen differenziert und unterschiedlich wahrgenommen werden.<sup>22</sup> Selbst bei gleichem durchschnittlichem Lärmniveau sind Unterschiede zwischen Strassen- und Bahnlärm plausibel, da der Strassenlärm relativ gleichmässig anfällt, demgegenüber der Bahnlärm durch Einzelereignisse mit ihrem rasch anschwellenden Lärmpegel charakterisiert ist. So betonen

<sup>21</sup> Rööslü; Wunderli.; Brink; u. a. (2019) sowie [www.sirene-studie.ch](http://www.sirene-studie.ch)

<sup>22</sup> „Dies führte letztlich auch zur getrennten Beurteilung der Lärmarten in der Schweizerischen Lärmschutz-Verordnung“ (BAFU Bundesamt für Umwelt (2009), S. 44).

einige Autoren<sup>23</sup> die Rolle von Einzelereignissen und ihrer Maximalpegel für die Störwirkung (**Lärmdynamik**). Eine Betrachtung von Belastungs-Wirkungs-Beziehungen auf den äquivalenten Dauerschallpegel allein – wie er den meisten epidemiologischen Studien zugrunde liegt – erscheint daher nicht ausreichend zu sein. Allerdings gibt es bisher keine validierten Expositions-Wirkungs-Beziehungen, die sich auf andere Lärmmasse beziehen. Näherungsweise wird diesem Argument dadurch Rechnung getragen, dass die Abnahme der Wohnungspreise und die Gesundheitskosten getrennt nach Verkehrsträger erfasst werden, da alle Verkehrsträger ihre typische Lärmdynamik aufweisen.<sup>24</sup>

In der ZKB-Studie zu den Wohnungspreisen<sup>25</sup> werden (wie in anderen hedonischen Studien) die drei Lärmquellen Strassen-, Schienen- und Luftverkehr als unabhängige Variablen verwendet. Die Autoren schreiben dazu, dass die Wirkung von Strassen- und Schienenlärm als unabhängig angenommen wird, was «vertretbar» sei, da die Korrelation von Strassen- und Schienenlärm gering ist.<sup>26</sup> Mehrfachbelastungen werden also bei der Herleitung der Effektschätzer in der ZKB-Studie nicht im Sinne eines Gesamtlärmmasses berücksichtigt, sondern einzeln gemäss den Lärmimmissionen aus den verschiedenen Lärmquellen. Wir sehen vor, diese Grundlagenstudie für die Berechnung der lärmbedingten Reduktion der Wohnungspreise zu verwenden. Entsprechend müssen die Effekte für alle drei Verkehrsträger in unseren Berechnungen ebenfalls einzeln hergeleitet und am Ende addiert werden.

Viele epidemiologische Studien quantifizieren die Expositions-Wirkungs-Beziehung nur für einen Verkehrsträger, meistens Strassenlärm. Zunehmend wird aber auch die Exposition von allen drei Verkehrsträgern gleichzeitig mit unabhängigen Variablen erfasst (Mehrfachexpositionsmodelle). Dies war auch in den beiden epidemiologischen Kohortenstudien von SiRENE der Fall.<sup>27</sup> Damit werden die Gesundheitsrisiken für verschiedene Lärmquellen unabhängig voneinander quantifiziert und sind so bei Mehrfachexponierten additiv. Aber auch, wenn nur ein Verkehrsträger berücksichtigt wird, ist die Korrelation mit den nicht berücksichtigten Lärmquellen im Allgemeinen gering, so dass es gerechtfertigt ist, die gesundheitschädigende Wirkung pro Lärmquelle einzeln zu ermitteln und zu einem Gesamtergebnis zu addieren. Einzelne epidemiologische Studien haben bei ihren Analysen sowohl den Gesamtlärm berücksichtigt wie auch mehrere Lärmarten gleichzeitig mit unabhängigen Variablen erfasst. Bei diesen Studien waren die Risikoschätzer für den Gesamtlärm höher als die addierten Risikoschätzer für die einzelnen Lärmarten. Das deutet darauf hin, dass die Mehrfachexposition gegenüber mehreren Verkehrsquellen eine synergistische Wirkung hat und damit die einfache Addition zu einer Unterschätzung führt.<sup>28</sup> Zurzeit ist die epidemiologische Datenlage noch zu dünn, um sy-

---

<sup>23</sup> Beispielsweise Ising; Kruppa (2004) und UBA Fluglärm (2004).

<sup>24</sup> IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (2012), S. 8

<sup>25</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2019)

<sup>26</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2019), S. 4

<sup>27</sup> Rööfli M; Probst-Hensch N (2019)

<sup>28</sup> Pyko; Andersson; Eriksson; u. a. (2019); Seidler; Hegewald; Seidler; u. a. (2019); Eze; Foraster; Schaffner; u. a. (2020)

nergetische Wirkungen quantifizieren zu können. In diesem Sinne wird mit der einfachen Addition der Auswirkungen von Strassen-, Schienen- und Luftverkehr eine vorsichtige (konservative) Vorgehensweise gewählt, die eher zu einer Unter- als Überschätzung der lärmbedingten Gesundheitskosten führt.

Schliesslich wäre es in der Praxis auch kaum möglich, Mehrfachbelastungen zu quantifizieren: Bisher hat sich in sonBASE und auch international noch kein allgemein anerkanntes Modell zur Umrechnung der Immissionen aus verschiedenen Lärmquellen in ein einziges Mehrfachlärmbelastungs-Mass etabliert.<sup>29</sup> Es ist daher noch unklar, ob man verschiedene Lärmquellen über einen zusammenfassenden Wert (z.B. energetische Addition) beurteilen kann.

**Fazit:** Folglich werden pro Lärmquelle bzw. pro Verkehrsträger die Reduktion der Wohnungspreise und die Gesundheitskosten separat ermittelt, wobei keine Korrekturen wegen allfälliger Mehrfachlärmbelastung zu berücksichtigen sind.

---

<sup>29</sup> Schriftliche Auskunft des BAFU vom 9.9.2020.

## 4 Bewertungsmethodik und wichtigste neue Erkenntnisse

### 4.1 Belästigungen

#### 4.1.1 Drei mögliche Bewertungsmethoden für Belästigungen<sup>30</sup>

Um die Lärmkosten in Bereich **Belästigungen** (inkl. Schlafstörungen) zu berechnen, gibt es im Wesentlichen drei mögliche Vorgehensweisen:<sup>31</sup>

- In den bisherigen Studien zu den externen Lärmkosten in der Schweiz wurde der Weg über die **Reduktion der Wohnungspreise** gewählt: Für eine belärmte Wohnung kann ein weniger hoher Preis verlangt werden als für eine vergleichbare Wohnung an ruhiger Lage. Grund dafür ist, dass sich die Bewohner bewusst sind, dass in einer belärmten Wohnung mit Belästigungen (inkl. Schlafstörungen) zu rechnen ist. Mit sogenannten Hedonic Pricing-Studien wird der Wohnungsmarkt statistisch untersucht, um den Einfluss des Lärms auf den Wohnungspreis bestimmen zu können.
- Um den Wert der Ruhe (bzw. des vermiedenen Lärms) zu bestimmen, können auch direkt Umfragen durchgeführt werden, in denen die Zahlungsbereitschaft (**WTP** = willingness to pay) **für Ruhe** ermittelt wird.
- Diverse Studien<sup>32</sup> erlauben es, die Lärmkosten über **DALY** (disability adjusted life years<sup>33</sup>) **und VLYL** (value of life year lost) zu bestimmen: Im ersten Schritt wird die Beeinträchtigung des normalen beschwerdefreien Lebens durch lärmbedingte Belästigungen und Schlafstörungen bestimmt und in DALY ausgedrückt. Im zweiten Schritt werden die verlorenen Lebensjahre monetarisiert. Da ein DALY einem verlorenen Lebensjahr entspricht, macht der Wert eines verlorenen Lebensjahres (VLYL – ermittelt aus dem VOSL, d.h. einer WTP) die Monetarisierung möglich.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die wichtigsten Charakteristika der drei Methoden.

---

<sup>30</sup> Das folgende Kapitel wird auftragsgemäss aus Ecoplan; Infrac (2014) mit wenigen Änderungen übernommen und nicht umfassend aktualisiert.

<sup>31</sup> Eine vierte Möglichkeit würde der Entschädigungsansatz bieten (gerichtlich zugesprochene Entschädigungsleistungen). Dieser Ansatz ist aber aus verschiedenen Gründen weniger geeignet (Ecoplan; Planteam; Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (IHA-ETH) (2004), S. 52).

<sup>32</sup> WHO World Health Organisation (2011); (2018); Ecoplan (2019)

<sup>33</sup> DALYs sind eine Masszahl für die Sterblichkeit und die Beeinträchtigung des normalen beschwerdefreien Lebens durch eine Krankheit. Ein DALY entspricht einem verlorenen Lebensjahr bei einwandfreier Gesundheit. DALYs sind die Summe aus verlorenen Lebensjahren aufgrund von frühzeitigen Todesfällen sowie dem Verlust an Lebenszeit durch Krankheit. Dabei wird Letzteres auch in verlorene Lebensjahre umgerechnet, indem mit einem bestimmten Prozentwert (disability weight DW) multipliziert wird. Die Höhe des DWs ist abhängig von der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch die Krankheit.

Abbildung 4-1: Vergleich der drei Bewertungsmethoden für Belästigungen

	Reduktion Wohnungspreise	WTP für Ruhe	DALY und VLYL
Preisgrundlage	Wohnungsmarkt: Preis der Ruhe indirekt über Mietpreis bzw. Preis von Stockwerkeigentum oder Einfamilienhäusern	WTP für den Preis der Ruhe direkt erhebbar	1. Bestimmung der Beeinträchtigung des normalen beschwerdefreien Lebens durch lärmbedingte Belästigung und Schlafstörung, um die verlorenen DALY zu ermitteln. 2. Bewertung der DALY mit WTP-Ansatz für verlorenes Lebensjahr
Zuverlässigkeit der Schätzung	Marktpreis Hohe Zuverlässigkeit der Berechnung der Reduktion der Wohnungspreise, aber möglicherweise unterschätzt die Reduktion der Wohnungspreise die negativen Effekte durch Schlafstörungen und Belästigung aufgrund des Nachfrageüberhangs im Wohnungsmarkt (vgl. folgender Exkurs). Lärmbelastung ist vor Einzug bzw. bei Abschluss Miet- / Kaufvertrag möglicherweise zu wenig bekannt. Wegen hohen Umzugskosten (bzw. Transaktionskosten) bleibt man trotzdem (eine Weile). Ergebnisse reagieren sensitiv auf die Spezifikation der Schätzgleichung. <sup>1</sup>	Kein Markt Zuverlässigkeit angezweifelt, weil kein Anreiz, wahre Präferenzen zu nennen, hypothetische und ungewohnte Zahlungssituation -> Durch gute Befragungstechniken deutlich abgeschwächt <sup>2</sup> Teilweise schwierige Umrechnung der Umfrageergebnisse <sup>3</sup> in Kostensatz pro dB(A)	Kein Markt Zuverlässigkeit angezweifelt, da die Ermittlung der Disability Weights mit verschiedenen Problemen verbunden ist. <sup>4</sup> Bei der Bewertung der DALY durch Zahlungsbereitschaft für verlorenes Lebensjahr bestehen die gleichen Probleme wie beim WTP-Ansatz
Internationale Übertragbarkeit der Ergebnisse	Die Präferenzen bzgl. Ruhe können international unterschiedlich stark ausgeprägt sein (sozio-kulturelle Unterschiede). <sup>5</sup> Zudem hat – bei gleichem Aussenlärm – die länderspezifische Bauweise einen Einfluss auf den Lärmpegel im Innern. <sup>6</sup> Je nachdem wo eine Grundlagenstudie durchgeführt wird, kann das Ergebnis also unterschiedlich sein. Bei der Reduktion der Wohnungspreise beeinflussen zudem unterschiedliche Gesetzgebungen im Wohnungsmarkt sowie die Marktsituation die Schätzung.		
Schweizer Studien	Aktuelle Schweizer Studien liegen vor	Eine Schweizer Studie	In der Schweiz nur Berechnung der DALY, ohne Monetarisierung
Schallschutzfenster	Der Einbau von Schallschutzfenstern kann die Nachteile durch den Lärm und damit auch die Bewertung des Lärms verkleinern. Daten zu Schallschutzfenstern sind jedoch in den Studien unseres Wissens nie enthalten.		

Quellen: ZKB (2011), Ruhe bitte, S. 13, Ecoplan et al. (2004), Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz, S.51-54, Navrud (2002), The State of the Art on Economic Valuation of Noise.

<sup>1</sup> Navrud (2002), The State of the Art on Economic Valuation of Noise, S. 6.

<sup>2</sup> ZKB (2011), Ruhe bitte, S. 13.

<sup>3</sup> Das Studienresultat ist oft eine WTP für eine „Halbierung des Lärms“ (Navrud 2002, The State of the Art on Economic Valuation of Noise, S. 19-20).

<sup>4</sup> Individuen schrecken normalerweise davor zurück, Gesundheitszustände in der Nähe der Endpunkte anzudeuten (End-of-Scale Bias) oder sie bewerten mehrere Gesundheitszustände so, dass sie etwa gleichmässig auf der ganzen Skala zwischen 0-1 verteilt sind (Spacing-Out Bias). (Breyer et al. (2005), Gesundheitsökonomik, S.36).

<sup>5</sup> ZKB (2011), Ruhe bitte, S. 36.

<sup>6</sup> Ecoplan et al. (2004), Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz, S. 56.

### Exkurs: Nachfrageüberhang nach Wohnungen

Es ist denkbar, dass der Wohnungspreisabschlag (durch Schlafstörungen und Belästigung) bei belärmten Wohnungen durch die verwendeten hedonischen Modelle bei einem «ausgetrockneten» Wohnungsmarkt unterschätzt wird.<sup>34</sup> Aufgrund der resultierenden Wohnungsknappheit sehen sich Suchende gegebenenfalls dazu gezwungen, Wohnungen zu einem Preis zu mieten / zu kaufen, der über ihrer wahren Zahlungsbereitschaft für eine lärmbelastete Wohnung liegt. Es wäre möglich, dass sich die Lärmbelastung in einem perfekt funktionierenden Mietmarkt stärker im Mietpreis widerspiegeln würde.

In einer vergleichenden Studie zwischen den Städten Zürich (6'204 Beobachtungen) und Lugano (547 Beobachtungen) wurden für Lugano etwa doppelt so hohe Resultate für den Lärmeffekt ermittelt.<sup>35</sup> In Lugano war die Leerwohnungsziffer jedoch deutlich höher als in Zürich.<sup>36</sup> Dies könnte darauf hindeuten, dass der **Nachfrageüberhang im Mietmarkt** dazu führt, dass die **wahren Präferenzen für Ruhe sich in den Schätzungen nur teilweise widerspiegeln**.<sup>37</sup> Dass die tiefe Leerwohnungsziffer für die Schweiz relevant sein könnte, zeigen die Zahlen in Abbildung 4-2. Dort ist ersichtlich, dass die Leerwohnungsziffer (Anteil der leerstehenden Wohnungen am gesamten Wohnungsbestand) in den grossen Städten, welche auch einen grösseren Teil der Mietwohnungen beherbergen, tatsächlich sehr tief ist: In den fünf grössten Schweizer Städten liegt die Leerwohnungsziffer im Durchschnitt der letzten 10 Jahre zwischen 0.16% und 0.51%, besonders tief war sie in Zürich (0.06 bis 0.22%) und Lausanne (0.08 bis 0.68%). In der Schweiz lag die Leerwohnungsziffer zwar etwas höher, aber ebenfalls lange auf einem tiefen Niveau von ca. 1%, erst in den letzten Jahren ist sie bis auf 1.66% gestiegen.

Gegen eine mögliche Unterschätzung kann eingewendet werden, dass es in der Schweiz ausreichend viele Mieterwechsel gibt, um den Markt „spielen“ zu lassen, denn viele Mieterwechsel finden ohne Leerstand statt, was in der Leerwohnungsziffer nicht ersichtlich ist.<sup>38</sup> Ob der Nachfrageüberhang tatsächlich dazu führt, dass der Effekt des Lärms auf Mietwohnungen unterschätzt wird, muss an dieser Stelle offen bleiben.

**Abbildung 4-2: Leerwohnungsziffer in Prozent in der Schweiz und in fünf Städten**

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Durchschnitt
Schweiz	0.92	0.94	0.95	0.97	1.07	1.18	1.30	1.45	1.62	1.66	1.21
Zürich	0.07	0.06	0.10	0.11	0.22	0.22	0.22	0.21	0.20	0.14	0.16
Bern	0.45	0.45	0.44	0.39	0.48	0.41	0.45	0.56	0.44	0.55	0.46
Basel	0.75	0.48	0.46	0.32	0.20	0.31	0.40	0.47	0.70	1.02	0.51
Lausanne	0.17	0.12	0.14	0.15	0.08	0.14	0.29	0.38	0.68	0.35	0.25
Genf	0.26	0.27	0.30	0.39	0.43	0.50	0.51	0.57	0.62	0.63	0.45

Quelle: Offizielle Daten des BFS.

Die Lärmbewertung wird international dominiert durch Studien zur Abnahme der Wohnungspreise.<sup>39</sup> Studien, welche den Lärm über DALY und VLYL bewerten, gibt es nur wenige (meist werden – wie auch in den WHO-Studien – DALY bestimmt, doch werden diese nicht monetarisiert).<sup>40</sup> Studien zur WTP für Ruhe gibt es nur wenige; möglicherweise weil es schwierig ist, die Umfrage zu konzipieren.<sup>41</sup> Im EU-Projekt HEATCO<sup>42</sup>, im EU-Handbuch<sup>43</sup> und in den deutschen Sachstandspapieren<sup>44</sup> wird empfohlen, Werte für WTP für Ruhe zu verwenden. Als Sensitivität werden auch Resultate für Mietzinsausfälle verwendet, was in diesen Untersuchungen zu etwa doppelt so hohen Ergebnissen führt.<sup>45</sup> Gemäss einer älteren Schweizer Studie (1996) führen die beiden Ansätze Mietzinsausfälle und WTP für Ruhe hingegen zu etwa gleich hohen Werten.<sup>46</sup> Banfi et al.<sup>47</sup> haben die Lärmkosten einmal über Mietzinsausfälle und einmal über eine Zahlungsbereitschaftsstudie bestimmt. Während für Lugano identische Ergebnisse resultieren, führt der Zahlungsbereitschaftsansatz in Zürich zu gut doppelt so hohen Ergebnissen wie mit den Mietzinsausfällen. Es scheint also, dass die Details der Studie sowie der gewählte Untersuchungsraum ebenfalls eine bedeutende Rolle spielen.

Vor der Methode über **DALY und VLYL raten wir ab**: Gemäss einer Überschlagsrechnung dürfte das über DALY und VLYL berechnete Ergebnis gut doppelt so hoch liegen wie das Ergebnis über die Abnahme der Wohnungspreise. Das Ergebnis würde somit nicht dem at least Ansatz entsprechen.<sup>48</sup>

---

<sup>34</sup> Ein weiterer Grund für eine Unterschätzung könnte darin bestehen, dass die Lärmbelastung vor Einzug bzw. beim Abschluss des Vertrags möglicherweise zu wenig bekannt ist. Wegen hohen Umzugskosten (bzw. Transaktionskosten) bleibt man trotzdem (eine Weile).

<sup>35</sup> Banfi; Filippini; Horehájová; u. a. (2007)

<sup>36</sup> Ecoplan; Infrac (2014), S. 268

<sup>37</sup> Theoretisch wäre es auch denkbar, dass die Zürcher Stadtbevölkerung weniger lärmempfindlich sind als die Bevölkerung der Stadt Lugano. Wir gehen aber davon aus, dass die Lärmempfindlichkeit überall gleich ist (wobei es natürlich individuelle Unterschiede gibt).

<sup>38</sup> Mündliche Angabe von Wüest & Partner. Im Luftverkehr nennt Wüest & Partner aber den Nachfrageüberhang als möglichen Grund für die geringen Koeffizienten.

<sup>39</sup> Bickel; Hunt; de Jong; u. a. (2006), S. 145; Navrud (2002), S. 6

<sup>40</sup> European Commission (2019), S. 210

<sup>41</sup> Navrud (2002), S. 7

<sup>42</sup> Bickel; Hunt; de Jong; u. a. (2006)

<sup>43</sup> European Commission (2019), S. 78

<sup>44</sup> IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (2012)

<sup>45</sup> Bickel; Hunt; de Jong; u. a. (2006), S. 145 und Annex E

<sup>46</sup> Ecoplan; Planteam; Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (IHA-ETH) (2004), S. 53 bzw. Soguel (1996), S. 119–120.

<sup>47</sup> Banfi; Filippini; Horehájová; u. a. (2007)

<sup>48</sup> Zudem gibt es weitere Gründe, die gegen eine Verwendung des DALY-Ansatzes sprechen: Erstens beruht dieser Ansatz nicht auf Schweizer Studien: Gerade beim Lärm wird immer wieder betont, dass die Belästigungswirkung und die gesundheitlichen Folgen von Lärm international nicht gleich sein müssen, weil der gleiche Lärm je nach gesellschaftliche Gepflogenheiten und kulturellem Umfeld als unterschiedlich störend empfunden wird, weil die Art des Lärms und dessen zeitliche Verteilung unterschiedlich sein kann (z.B. Nachtfahr- / -flugverbot) und weil je nach Baustandard die Differenz zwischen Aussenlärm und Innenlärm unterschiedlich ist. Zweitens gibt es methodische

Es gibt unseres Wissens in der Schweiz nur eine Studie zur WTP für Ruhe (Banfi et al. 2007), hingegen gibt es viele Studien zur Abnahme der Wohnungspreise. Zudem beruhen die Studien zur Abnahme der Wohnungspreise meist auf Tausenden von Mietpreisbeobachtungen, die Studien der ZKB gar auf mehr als 800'000 Datensätzen (vgl. Abbildung 6-1 auf Seite 68), während die Studie von Banfi et al. (2007) zur Zahlungsbereitschaft auf lediglich 650 Haushalten basiert. Zwei Einwände, die gegen die Verwendung der Abnahme der Wohnungspreise sprechen, können zudem für die Schweiz entkräftet werden:

- Die Annahme, dass die Preisabnahme linear verläuft wird oft kritisiert, da vermutet wird, dass bei höheren Lärmniveaus ein zusätzliches dB(A) einen grösseren Einfluss hat als bei tieferen Lärmniveaus. Die ZKB (2011, S. 32) untersuchte dies mit ihren Daten und zeigte, dass die Annahme der Linearität getroffen werden darf.
- Insbesondere die Studien der ZKB berücksichtigen viele andere Einflussfaktoren auf die Wohnungspreise, darunter 14 Einflussfaktoren der Mikrolage (neben dem Lärm).<sup>49</sup> Damit kann sich die ZKB-Studie auch weitgehend der Kritik entziehen, dass der Schätzer für Lärm zu hoch ausfalle, da in diesen oft auch andere Aspekte der Mikrolage einfließen würden.

Aufgrund dieser Ausgangslage / Datenlage **verwenden wir wie bisher nur Studien zur Abnahme der Wohnungspreise.**

#### 4.1.2 Wichtigste Neuerungen gegenüber bisheriger Methodik

Im Folgenden werden die wichtigsten Neuerungen gegenüber der bisherigen Methodik kurz erläutert. Bei der Bewertung der Reduktion der Wohnungspreise konnten in den letzten Jahren einige Fortschritte erzielt werden, die nun in die Berechnungen einfließen können:

- Die Lärmdatenbank **sonBASE** des BAFU wurde auf das Jahr 2015 hin überarbeitet und **verbessert**. Dabei wurde z.B. das Gebäudemodell weiter verfeinert und aktuellere Verkehrsdaten verwendet. Auch in weiteren Punkten wurde sonBASE verbessert (vgl. Kapitel 5.1 unten). *später aktualisieren*
- Für die **Abnahme der Wohnungspreise** liegen neue, sehr umfassende Studien vor. Aufgrund dieser Studien wird neu das **Lärmmass  $L_{den}$**  (den = day, evening, night) als Basis benutzt, das in Europa oft verwendet wird.<sup>50</sup> Der  $L_{den}$  beschreibt ein durchschnittliches Lärmniveau, in dem der abendliche Lärm (18.00 – 22.00 Uhr) einen Zuschlag von 5 dB erhält und der nächtliche Lärm (22.00 – 6.00 Uhr) mit einem Zuschlag von 10 dB versehen wird. Der Taglärm (6.00 – 18.00 Uhr) wird ohne Zuschlag übernommen. Konkret wird für die Ermittlung des  $L_{den}$  die folgende Formel verwendet:

---

Bedenken bei der Bestimmung der disability weights (Umrechnung Belästigung bzw. Schlafstörung in DALY – vgl. Breyer; Zweifel; Kifmann (2005), S. 36 oder Narain; Sall (2016), S. 4, die schreiben, dass die disability weights ungeeignet für ökonomische Bewertungen sind). Drittens gibt es unseres Wissens bisher kaum Studien, die diesen Weg beschritten haben (die DALY werden nicht monetarisiert).

<sup>49</sup> So führt z.B. die gute Erreichbarkeit dank der Nähe zu Verkehrsinfrastrukturen (z.B. Autobahneinfahrten, Bahnhöfen und Flugplätzen) zu höheren Wohnungspreisen. Dieser Effekt ist unabhängig vom Verkehrslärm: Auch wenn der Verkehr keinen Lärm verursachen würde, so würden die Wohnungspreise dank der guten Erreichbarkeit steigen. Die Erreichbarkeit fliesst beim verwendeten hedonischen Modell in die Ermittlung der Wohnungspreise ein und muss bei der Bestimmung der Lärmkosten nicht weiter beachtet werden.

<sup>50</sup> Vgl. z.B. EU (2002)

$$L_{den} = 10 \times \lg \frac{1}{24} \left( 12 \times 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right)$$

Dabei wird ein Schwellenwert von 50 dB(A)  $L_{den}$  verwendet.<sup>51</sup> Schliesslich werden neu auch Ergebnisse zu Einfamilienhäusern mitberücksichtigt (nicht nur Mietwohnungen und Stockwerkeigentumswohnungen). **später aktualisieren**

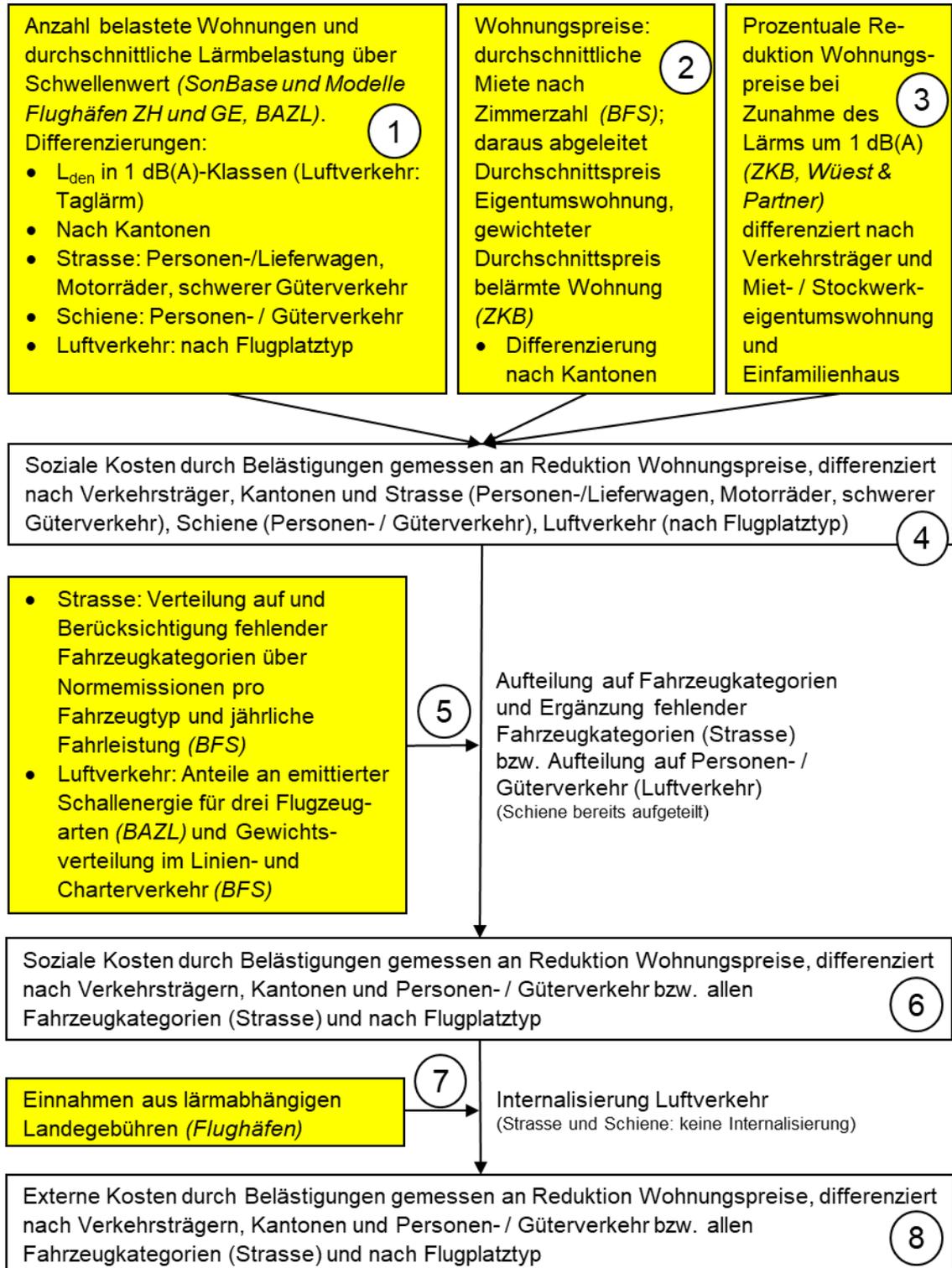
- Im **Luftverkehr** beruht die **Abnahme der Wohnungspreise** weiterhin auf dem Tageslärm. Bisher gab es kaum Studien zum Luftverkehrslärm. In den letzten Jahren hat sich die Studienlage jedoch verbessert, so dass aufgrund der neuen Forschungsergebnisse die Abnahme der Wohnungspreise pro dB(A) durch den Luftverkehr **deutlich tiefer** ausfällt als bisher. **später aktualisieren**
- Der **Preis einer durchschnittlichen Wohnung** (Durchschnitt Miet- und Eigentumswohnungen) kann dank neuen Datengrundlagen zum Anteil der belärmten Miet- und Eigentumswohnungen genauer bestimmt werden (vgl. Kapitel 6.1.2).
- Die **Aufteilung** der Lärmkosten auf die **Fahrzeugkategorien** wird verbessert: Einerseits kann sonBASE neu nach drei (statt zwei) Fahrzeuggruppen ausgewertet werden. Andererseits wird berücksichtigt, dass fünf eher kleinere Fahrzeugkategorien nicht in sonBASE enthalten sind. Für diese fehlenden Fahrzeugkategorien erfolgen neu Abschätzungen über die Lärmkosten pro Fahrzeugkilometer. Dadurch steigen die gesamten Lärmkosten leicht. **später aktualisieren**
- Zudem wurden diverse Inputdaten aktualisiert.

#### 4.1.3 Verwendete Bewertungsmethodik für Belästigungen

Die verwendete Bewertungsmethodik wird in der folgenden Abbildung dargestellt: Aus den Lärmdaten (1) der Lärmdatenbank sonBASE, den Wohnungspreisen gemäss BFS (2) und der Abnahme der Wohnungspreise pro dB(A) gemäss ZKB sowie Wüest & Partner (3) werden die Kosten für Belästigung ermittelt (4). Mittels weiterer Inputdaten (5) werden die im Strassenverkehr in sonBASE fehlenden Fahrzeugkategorien ergänzt bzw. im Luftverkehr die Lärmkosten auf den Personen- und Güterverkehr aufgeteilt. Daraus resultieren die sozialen Lärmkosten (6). Unter Abzug der lärmabhängigen Landegebühren im Luftverkehr (7) ergeben sich die externen Lärmkosten (8). Die ausführliche Beschreibung der Methodik folgt in den Kapiteln 5.1, 6.1 und 6.3.

<sup>51</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2019)

Abbildung 4-3: Bewertungsmethodik für Belästigungen durch Lärm: Reduktion der Wohnungspreise durch Lärmbelastung



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (Datenquellen kursiv)

## 4.2 Gesundheitskosten

### 4.2.1 Ausgangslage

Neben Belästigung, die über die Reduktion der Wohnungspreise quantifiziert werden, sind auch lärmbedingte Krankheitskosten zu berücksichtigen. Seit dem Jahr 2010 hat sich die epidemiologische Datenlage erheblich verändert. Die damals hergeleiteten Effektschätzer sind nicht mehr aktuell. Besonders relevant sind die 2018 publizierten Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO)<sup>52</sup> und die grosse Schweizer Studie SiRENE (Short and Long Term Effects of Transportation Noise).<sup>53</sup> Im Rahmen der SiRENE-Studie wurden Daten von zwei epidemiologischen Studien analysiert: SAPALDIA-Studie und Schweizerische Nationale Kohortenstudie.<sup>54</sup> Angesichts der Vielzahl von neuen Studienergebnissen ist es daher erforderlich, die Auswahl der Krankheitsbilder und die Expositions-Wirkungs-Beziehung dem neuesten wissenschaftlichen Kenntnisstand anzupassen. Im Kapitel 5.2 sind diese Arbeitsschritte im Detail erläutert. Im Folgenden sind die wichtigsten Neuerungen aus diesen Arbeiten zusammengefasst.

### 4.2.2 Wichtigste Neuerungen gegenüber bisheriger Methodik

- Bisher wurden die Krankheitsbilder ischämische Herzerkrankungen, Bluthochdruck-bedingte Krankheiten und Schlaganfälle berücksichtigt. Neu werden Spitaleintritte wegen **allen kardiovaskulären Erkrankungen**<sup>55</sup> sowie wegen **Diabetes** und **Depressionen** eingeschlossen. Zudem wird die Sterblichkeit wegen allen kardiovaskulären Diagnosen berücksichtigt. Nicht mehr quantifiziert werden Arztkonsultationen wegen Bluthochdruck.
- Da sich die Datenlage für Auswirkungen auf **kardiovaskuläre Erkrankungen** und Todesfälle erheblich verbessert hat, werden die **Expositions-Wirkungs-Beziehungen** für dieses Krankheitsbild neu **differenziert** hergeleitet: Einerseits **nach Verkehrsträger** (Strassen-, Schienen- und Luftverkehr) und andererseits **nach Alter** (drei Altersgruppen: 18- bis 64-Jährige, 65- bis 79-Jährige und über 80-Jährige). Für Diabetes und Depressionen ist die Datenlage geringer und es wird für alle drei Verkehrsquellen und alle Bevölkerungsgruppen (ab 18 Jahren) die gleiche Expositions-Wirkungs-Beziehung verwendet.
- Der **Schwellenwert** für den  $L_{den}$ , ab dem Gesundheitseffekte auftreten, beträgt neu 45 dB(A) statt wie bisher 48 dB(A).
- Bezüglich der **verbesserten Lärmdatenbank sonBASE** gelten die gleichen Ausführungen wie für die Reduktion der Wohnungspreise (vgl. Kapitel 4.1.2). **später aktualisieren**

---

<sup>52</sup> WHO World Health Organisation (2018)

<sup>53</sup> Rööslü; Wunderli.; Brink; u. a. (2019)

<sup>54</sup> Rööslü; Wunderli.; Brink; u. a. (2019)

<sup>55</sup> Bei den drei bisherigen Krankheitsbildern ischämische Herzerkrankungen, Bluthochdruck-bedingte Krankheiten und Schlaganfälle handelt es sich jeweils um Teilbereiche der kardiovaskulären Erkrankungen.

### 4.2.3 Verwendete Bewertungsmethodik für Gesundheitskosten

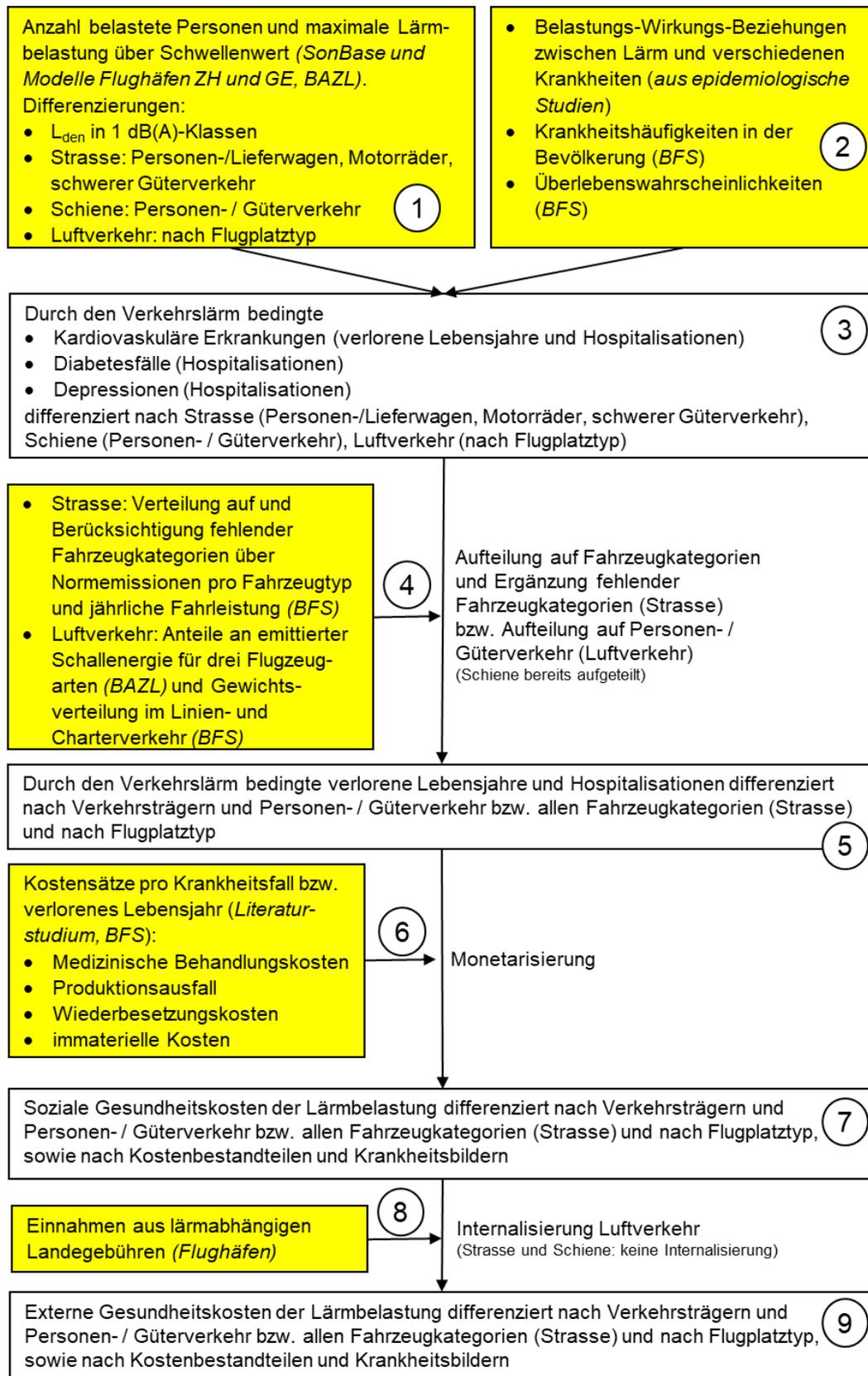
Die folgende Abbildung zeigt das Vorgehen bei der Bewertung der Gesundheitskosten durch die Lärmbelastung: Grundlage bildet die Auswertung der Lärmdatenbank sonBASE wie bei den Belästigungen, wobei diesmal nicht nach Wohnungen, sondern nach Personen ausgewertet wird und nach dem maximalen Lärmniveau anstatt nach dem durchschnittlichen analog zu den epidemiologischen Studien bei denen typischerweise auch die maximal exponierte Fassade als Lärmass für die Auswertungen verwendet wird (später anpassen?) (Schritt 1). Die bevölkerungsgewichtete mittlere Lärmbelastung oberhalb des Schwellenwertes<sup>56</sup> wird mit der Krankheitshäufigkeit und mit der Expositions-Wirkungs-Beziehung aus epidemiologischen Studien verknüpft (Schritt 2), um die verlorenen Lebensjahre sowie die Hospitalisationen für die drei betrachteten Krankheitsbilder zu bestimmen (Schritt 3). Wie bei den Belästigungen werden dann mittels weiterer Inputdaten (4) die in sonBASE fehlenden Fahrzeugkategorien ergänzt (Strassenverkehr) bzw. im Luftverkehr die Lärmkosten auf den Personen- und Güterverkehr aufgeteilt. Daraus resultieren die Gesamtheit der lärmbedingt verlorenen Lebensjahre und Krankheitsfälle (5). Die Monetarisierung erfolgt über verschiedene Kostensätze (Schritt 6). Das Ergebnis entspricht den sozialen Gesundheitskosten der Lärmbelastung (7).<sup>57</sup> Die ausführliche Beschreibung der Methodik folgt in den Kapiteln 5.1, 5.2 und 6.2.

---

<sup>56</sup> Für die Abschätzung der Anzahl Krankheitsfälle und der verlorenen Lebensjahre wird wie bisher die bevölkerungsgewichtete mittlere Lärmbelastung von den Modellierungen abgeleitet, wobei nur die Exposition oberhalb des Schwellenwertes berücksichtigt wird. Dabei wird die Anzahl exponierter Personen pro 1 dB-Expositionsklasse multipliziert mit der Differenz aus der Expositionshöhe der entsprechenden Expositionsklasse abzüglich des Schwellenwertes. Die erhaltene Grösse wird dann dividiert durch die Populationsgrösse. Damit erhält man die bevölkerungsgewichtete mittlere Dezibelbelastung oberhalb des Schwellenwertes (Schritt 1).

<sup>57</sup> Auf die Erläuterung des Berechnungsschritts zur Berücksichtigung der Lärmabgabe im Luftverkehr als Internalisierungsmassnahme wird hier verzichtet. Das Vorgehen ist identisch zu den Schritten 7 und 8 in Abbildung 4-3.

Abbildung 4-4: Bewertungsmethodik für Gesundheitskosten durch Lärm



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (*Datenquellen kursiv*)

## 5 Mengengerüst

Wichtigste Bestandteile des Mengengerüsts sind die Anzahl belärmter Personen und Wohnungen durch die verschiedenen Verkehrsträger, welche mit der Lärmdatenbank sonBASE berechnet werden.<sup>58</sup> Die Lärmbelastung der Wohnungen bildet direkt das Mengengerüst für die Abnahme der Wohnungspreise bzw. für die Bewertung von Belästigungen. Für die Gesundheitskosten müssen die Lärmbelastungen der Personen zuerst noch in Krankheitsfälle (Todesfälle und Hospitalisationen) umgerechnet werden (vgl. Kapitel 5.2). Dazu werden aus der wissenschaftlichen Literatur die von Lärm beeinflussten Krankheitsbilder bestimmt und für diese die Expositions-Wirkungs-Beziehungen hergeleitet.

### 5.1 Lärmbelastung

#### 5.1.1 Die Lärmdatenbank sonBASE: Ermittlung der Lärmbelastung

Wie erläutert, stehen die Daten zur Lärmbelastung aus sonBASE noch nicht zur Verfügung. Entsprechend folgen die Erläuterungen 2023 / 2024.

#### 5.1.2 Strassenverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

##### a) Wohnungen

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

##### b) Personen

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

##### c) Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien

Die Berechnungen in sonBASE wurden nicht nur für den gesamten Strassenverkehr durchgeführt, sondern zusätzlich separat auch für Personen- und Lieferwagen<sup>59</sup>, für Motorräder und für schwere Nutzfahrzeuge (Lastwagen und Sattelschlepper). Dies erlaubt es, den Anteil dieser drei Fahrzeuggruppen an den gesamten Lärmkosten approximativ zu berechnen.<sup>60</sup> Die Ergebnisse für die Fahrzeuggruppen werden in der folgenden Abbildung dargestellt.

---

<sup>58</sup> Alle Berechnungen zur Lärmbelastung wurden von Büro n-Sphere durchgeführt und uns vom BAFU zur Verfügung gestellt.

<sup>59</sup> Eine Trennung von Personen- und Lieferwagen wäre zu aufwändig.

<sup>60</sup> Es wird in sonBASE nicht nur die gesamte durchschnittliche Lärmbelastung in dB(A) pro Person bestimmt, sondern zusätzlich wird berechnet, wie hoch die durchschnittliche Lärmbelastung wäre, wenn auf den Schweizer Strassen

**Abbildung 5-1: Kostenanteile der drei in sonBASE ausgewerteten Fahrzeuggruppen**

	Basis	Personen- und Lieferwagen	Motorräder	Schwere Güterfahrzeuge (Lastwagen + Sattelschlepper)	Total
Anteil Belästigungen	L <sub>den</sub> ab 50 dB(A)	XXX%	XXX%	XXX%	100.0%
Anteil Gesundheitskosten	L <sub>den</sub> ab 45 dB(A)	XXX%	XXX%	XXX%	100.0%

Für die weitere Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien benutzen wir wie bisher Normemissionen pro Fahrzeugkategorie. Im Rahmen der Arbeiten wurde mit Sinus AG geprüft, ob und wie die Standard-Lärmemissionen zu aktualisieren sind. Es hat sich dabei gezeigt, dass die bisherigen Lärmemissionen, die in der folgenden Abbildung dargestellt sind, weiterhin gültig sind.<sup>61</sup> Dem Langsamverkehr werden (wie bisher) keine Lärmkosten angelastet.

**Abbildung 5-2: Standard-Lärmemissionen nach Fahrzeugkategorien**

	Personenverkehr							Güterverkehr		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Öffentlicher Personenverkehr			Li	LW	SS
	PW	GW	MR	Mofa	Bus	Trolley	Tram			
% PW	100			100		100	80	80		
% LW		100	100		100		20	20	100	100
L <sub>v50,7.5m</sub>	71.0	81.6	81.6	71.0	81.6	71.0	75.9	75.9	81.6	81.6

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.  
L<sub>v50,7.5m</sub> = Vorbeifahrpegel eines Fahrzeuges bei Geschwindigkeit 50 km/h und einem Abstand von 7.5m in [dB(A)]

nur Personen- und Lieferwagen verkehren würden und keine anderen Fahrzeuge (bzw. nur Motorräder oder nur schwere Nutzfahrzeuge). Die Summe der Berechnungen für die drei Fahrzeuggruppen stimmt allerdings nicht mit dem Total überein, denn die Kombination verschiedener Lärmquellen ist komplex: Beträgt z.B. der Lärm auf einer Strasse durch alle drei Fahrzeuggruppen je 60 dB(A), so sind dies insgesamt knapp 65 dB(A) durch den Gesamtverkehr. Bei den gesonderten Berechnungen wird dreimal mit 60 dB(A) gerechnet, im Total einmal mit 65 dB(A). Das korrekte Total für den Gesamtverkehr wird dann entsprechend den berechneten Anteilen auf die drei Fahrzeuggruppen aufgeteilt (z.B. Anteil SNF = Ergebnis SNF / (Ergebnis SNF + Ergebnis PW/Li + Ergebnis Motorrad). Die Ergebnisse für Belästigungen und Gesundheitskosten sind unterschiedlich, da unterschiedliche Schwellenwerte und andere Lärmmasse verwendet werden.

<sup>61</sup> Das BAFU ist momentan daran, sonBASE (bzw. sonROAD) zu überarbeiten. In Zukunft (d.h. in ca. 2 Jahren) sollen in sonROAD Emissionsansätze für 14 verschiedene Fahrzeugkategorien enthalten sein. Dies bedeutet, dass künftige Auswertungen mit sonBASE nicht nur für Personen- und Lieferwagen, Motorräder und für schwere Nutzfahrzeuge möglich sind, sondern theoretisch für bis zu 14 Fahrzeugkategorien (tatsächlich dürften aber auch nur 3 bis 4 Fahrzeuggruppen ausgewertet werden – noch offen). Die Berechnungen könnten daher in Zukunft auf noch differenzierteren Datengrundlagen aus sonBASE erfolgen, so dass es sich momentan ohnehin nicht lohnt, die jetzigen Standard-Lärmemissionen zu aktualisieren, da diese separate Aufteilung in Zukunft möglicherweise gar nicht mehr benötigt wird. Das genaue künftige Vorgehen kann aber erst nach Vorliegen des neuen sonROAD geklärt werden. Momentan wird auf eine Aktualisierung der Normemissionen nach Fahrzeugkategorien verzichtet.

Innerhalb der drei Fahrzeuggruppen in Abbildung 5-1 werden die Lärmkosten über die Fahrzeugkilometer auf die 5 betroffenen Fahrzeugkategorien verteilt.<sup>62</sup> Dabei werden die Fahrzeugkilometer nach den Lärmemissionen der Fahrzeugkategorie in Abbildung 5-2 gewichtet.

In sonBASE sind nicht alle Fahrzeugkategorien enthalten, die in den ARE-Studien zu den externen Effekten zu berücksichtigen sind. Konkret fehlen in sonBASE Angaben zu den folgenden fünf Fahrzeugkategorien: Gesellschaftswagen, Mofas, öffentliche Busse, Trolleybusse und Trams. Für diese Fahrzeugkategorien werden die Lärmkosten nach folgendem Verfahren grob abgeschätzt: Grundlage bilden die Lärmkosten pro Fahrzeugkilometer der aus sonBASE bekannten Fahrzeugkategorien. Für die in sonBASE nicht verfügbaren Fahrzeugkategorien wird dann (wie bisher<sup>63</sup>) angenommen, dass die Lärmkosten pro Fahrzeugkilometer der leisen, mittleren bzw. lauten Fahrzeugkategorien (vgl. Abbildung 5-2) identisch sind.<sup>64</sup> Unter dieser Annahme können auch für die in sonBASE nicht enthaltenen Fahrzeugkategorien Lärmkosten abgeschätzt werden. Durch den Einbezug der in sonBASE fehlenden Fahrzeugkategorien erhöhen sich die Lärmkosten des Strassenverkehrs um **3.3%**.<sup>65</sup>

Schliesslich ist zu erwähnen, dass in sonBASE **Elektrofahrzeuge** (noch) keine Rolle spielen. Denn in den Datengrundlagen zum Verkehr in sonBASE sind keine Angaben zu Elektrofahrzeugen enthalten. **Bei der Wiederaufnahme der Arbeiten im Jahr 2023 / 24 ist zu prüfen, ob dies noch gilt.** Elektrofahrzeuge verursachen praktisch keinen Motorenlärm. Bei höheren Geschwindigkeiten sind jedoch auch bei konventionellen Fahrzeugen (mit Benzin und Diesel) – wie bei Elektrofahrzeugen – die Rollgeräusche dominant. Im Jahr 2015 dürfte der Effekt von Elektrofahrzeugen aber ohnehin noch gering sein, da ihre Verbreitung noch eher gering war und da sie ihre Vorteile beim Lärm nur bei geringen Geschwindigkeiten ausspielen können.

### 5.1.3 Schienenverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

### 5.1.4 Luftverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

---

<sup>62</sup> Dabei wird die in sonBASE unterstellte Menge der Fahrzeugkilometer (nach den 5 Fahrzeugkategorien) verwendet.

<sup>63</sup> Ecoplan; Infrac (2014); Infrac; Ecoplan (2019)

<sup>64</sup> Konkret wird von den Lärmkosten der Personen- bzw. Lieferwagen ausgegangen. Dabei ist zu beachten, dass sich die Lärmkosten der drei Fahrzeuggruppen (PW und Lieferwagen, Motorräder und schwere Nutzfahrzeuge) auch deshalb unterscheiden, weil sie an anderen Orten verkehren, schwere Nutzfahrzeuge z.B. vermehrt auf Autobahnen. Wir gehen davon aus, dass das «Fahrmuster» der Personen- und Lieferwagen das «Fahrmuster» der fehlenden Fahrzeugkategorien am besten abbilden kann. Die lauten Fahrzeugkategorien werden als Hilfsrechnung mit einem sehr kleinen Fahrzeugkilometeranteil, aber mit ihrer hohen Lärmemissionen in die bisherige Verteilung der Personen- und Lieferwagen eingefügt, um daraus einen Kostensatz pro Fahrzeugkilometer für laute Fahrzeugkategorien ableiten zu können.

<sup>65</sup> Dies stellt eine Überschätzung der Lärmkosten der fehlenden Fahrzeugkategorien dar, da die Grenzkosten des Lärms deutlich tiefer sind als die Durchschnittskosten und hier mit Durchschnittskosten gerechnet werden muss, da wir keine alternative Methodik für die fehlenden Fahrzeugkategorien sehen. Andererseits ist auch zu erwähnen, dass der ÖV besonders oft in dicht besiedelten Gebieten verkehrt und damit tendenziell höhere Lärmkosten hat als hier berechnet.

Für die Differenzierung der Lärmkosten nach Verkehrsart (Linien- und Charterverkehr interkontinental, Linien- und Charterverkehr europäisch, General Aviation) wird approximativ die Verteilung der Schallenergie (energetische Anteile) verwendet (vgl. Abbildung 5-3). Dazu hat das BAZL spezifische Berechnungen vorgenommen: Für die drei Landesflughäfen hat das BAZL die gesamte Flottenstruktur des Betriebsjahres 2019 analysiert und nach den Verkehrsarten aufgeteilt. Dabei wurden die Anzahl Bewegungen nach Flugzeugtypen untersucht, wobei die Lärmemissionen je nach Flugzeugtyp unterschiedlich gross sind. Generell gilt, dass grosse Flugzeuge tendenziell lauter sind. Deshalb ist der interkontinentale Verkehr meist lauter als der europäische, weil er oft mit grösseren Flugzeugen geflogen wird. Da am Abend bzw. in der Nacht weniger bzw. keine General Aviation-Flüge zu verzeichnen sind, ist bei den Landesflughäfen der Anteil der General Aviation an den Lärmemissionen beim Tageslärm höher als beim  $L_{den}$ . Die Ergebnisse zeigen, dass die General Aviation auf den Landesflughäfen insgesamt ca. **6%** der Lärmkosten verursacht. Am bedeutendsten sind die europäischen Linien- und Charterflüge mit knapp **75%**, gefolgt von den internationalen Flügen mit knapp **20%**.

Die Aufteilung der Ergebnisse nach dem Personen- und Güterverkehr wird wie folgt vorgenommen: Der Linien- und Charterverkehr wird nach dem transportierten Gewicht aufgeteilt (im Jahr 2019 ergeben sich 92.4% für den Personenverkehr und 7.6% für den Güterverkehr), da die Masse eines Flugzeuges gemäss BAZL relativ gut mit der Lärmentstehung korreliert. Beleg hierfür sind die lärmabhängigen Landegebühren, die teilweise ebenfalls vom Gewicht abhängen. Bei der General Aviation wird wie bisher angenommen, dass der Güterverkehr keine Kosten verursacht, da der Güterverkehr in diesem Bereich eine marginale Rolle spielt.

**Abbildung 5-3: Aufteilung auf die Verkehrsart: Verteilung der Schallenergie am Tag**

Prozentuale Verteilung der Schallenergie	Landesflughäfen		Regional- flugplätze
	Tageslärm	$L_{den}$	
Linien- und Charterverkehr interkontinental	19.0%	19.6%	
Linien- und Charterverkehr europäisch	74.2%	74.7%	4.0%
General Aviation	6.8%	5.7%	96.0%
Total	100.0%	100.0%	100.0%

*Daten könnten noch ändern, weil die Daten für die Landesflughäfen nach den drei Landesflughäfen getrennt vorliegen und mit den Lärmkosten gewichtet werden, die momentan nur provisorisch vorliegen.*

### 5.1.5 Unsicherheit der Lärmberechnungen

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

## 5.2 Gesundheitseffekte

Die folgenden Erläuterungen im gesamten Kapitel 5.2 müssen 2023 / 2024 aktualisiert werden. Das beinhaltet ein Update der Literaturübersicht, Aktualisierung der Krankheitshäufigkeiten sowie Darstellung der Ergebnisse. Auf Wunsch des BAFU werden im Folgenden die heute aktuellen Ergebnisse dargestellt.

### 5.2.1 Evidenzbeurteilung

Im Folgenden wird ein Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zu möglichen gesundheitlichen Wirkungen des Verkehrslärms gegeben. Dazu gehören Herz-Kreislaufkrankungen, Diabetes, Depression und mentale Gesundheit, Übergewicht, Krankheitsbilder im Zusammenhang mit der Geburt, Kognition und Verhalten bei Kindern sowie andere Krankheitsbilder. Die Methodik zur Beurteilung der Evidenz lehnt sich am Verfahren der sogenannten «Umbrella Reviews» an. Ein «Umbrella Review» ist eine Übersicht über systematische Reviews und Meta-Analysen. Ausgangspunkt sind die **WHO-Richtlinien** von 2018. In diesem Bericht ist die publizierte Literatur zur Lärmwirkung bis 2015 systematisch evaluiert worden. Im WHO Bericht wird die **Evidenzqualität** für oder gegen einen Zusammenhang für verschiedene Krankheitsbilder und Lärmquellen jeweils mit «hoch», «moderat», «tief» oder «sehr tief» eingeschätzt. Die Bewertung der Evidenzqualität beruht auf einer systematischen Analyse der vorhandenen Studienqualität. Ausschlaggebend für eine hohe Evidenzqualität ist das Vorliegen von mindestens zwei prospektiven Kohortenstudien, welche ein erhöhtes Erkrankungs- oder Sterberisiko im Zusammenhang mit der Lärmbelastung nachweisen und welche ein geringes Risiko aufweisen, dass die Studienergebnisse auf methodische Unzulänglichkeiten (Bias) zurückzuführen sind. Dieses Kriterium wird auch in diesem Bericht angewendet, um zu entscheiden, ob ein Krankheitsbild ausgewählt wird oder nicht.

Ergänzend zu den WHO-Richtlinien werden allfällige **Studienergebnisse aus der Schweiz** vorgestellt, neuere **Meta-Analysen nach Publikation der WHO-Richtlinien** diskutiert sowie **wichtige aktuelle Einzelstudien** dargestellt, welche in den jeweils neuesten Meta-Analysen nicht berücksichtigt sind. Dabei wurde der Fokus auf Studien gelegt, welche informativ für die Herleitung von Expositions-Wirkungs-Beziehungen sind. Die Literatur wurde in wissenschaftlichen Datenbanken wie Pubmed und Web of Science identifiziert. Eingeschlossen sind Publikationen bis Ende Juli 2021. Zudem wurden die Beiträge der ICBEN 2021<sup>66</sup> im Hinblick auf relevante neue Befunde überprüft. Am Schluss folgt jeweils pro untersuchte Ausprägung der gesundheitlichen Wirkungen der Lärmbelastung eine **Zusammenfassung**.

Zu den am besten untersuchten gesundheitlichen Wirkungen des Verkehrslärms gehören zudem Belästigungen und Schlafprobleme. Gemäss der Europäischen Umweltagentur fühlten sich im Jahr 2019 in Europa (EEA-33) 21'868'500 Personen stark durch Umgebungslärm gestört (Strassenlärm: 17'150'500; Bahnlärm: 3'497'100; Fluglärm: 1'133'700 und Industrielärm: 87'200).<sup>67</sup> An starken lärmbedingten Schlafproblemen leiden in Europa 6'476'600 Personen (Strassenlärm: 4'443'400; Bahnlärm: 1'758'400; Fluglärm: 251'400 und Industrielärm: 23'400)). Gemäss diesen Abschätzungen sind in der Schweiz 445'800 Personen stark durch Strassenlärm gestört, 81'900 Personen durch Bahnlärm und 28'800 Personen wegen Fluglärm.<sup>68</sup> Starke Schlafprobleme haben 117'700 Personen wegen Strassenlärm, 40'500 Personen wegen

<sup>66</sup> International Commission on Biological Effects of Noise, <https://www.icben2021.se/>

<sup>67</sup> EEA European Environment Agency (2020a)

<sup>68</sup> EEA European Environment Agency (2020c)

Bahnlärm und 6'200 Personen wegen Fluglärm. Einflüsse auf den Schlaf und der Zusammenhang mit der Lärmbelastung sind jedoch nicht Gegenstand der folgenden Evidenzbeurteilung, da diese Auswirkungen über die Reduktion der Wohnungspreise abgebildet werden.

### Epidemiologische Begriffe

Prävalenz und Inzidenz sind in der Epidemiologie gebräuchliche Begriffe für die Krankheitshäufigkeit. Die **Prävalenz** beschreibt wie viele Personen zu einem bestimmten Zeitpunkt erkrankt sind. Die **Inzidenz** ist ein Mass für die Anzahl Neuerkrankter in einem bestimmten Zeitraum, z.B. Anzahl Erkrankungen pro Jahr.

In der Lärmwirkungsforschung sind grundsätzlich **Kohortenstudien** der Goldstandard, um langfristige Auswirkungen der Lärmbelastung zu untersuchen. Dabei wird in einer gut definierten Kohorte von Personen über einen bestimmten Zeitraum beobachtet wie viele Personen erkranken, und ob die Erkrankungs- oder Sterberaten, unter Berücksichtigung von anderen Faktoren (**Confounder**), mit der Lärmexposition am Wohnort zusammenhängen. Studien, welche die Inzidenz einer Erkrankung untersuchen, schliessen sowohl fatale wie auch nicht-fatale Fälle ein. Auch **Fall-Kontrollstudien** untersuchen den Zusammenhang zwischen der Krankheitsinzidenz und dem Lärm, jedoch retrospektiv. Das heisst, es wird im Nachhinein verglichen, ob Fälle anders lärmbelastet waren als vergleichbare Kontrollen.

Ein anderes epidemiologisches Studiendesign sind **Querschnittsstudien**. In diesem Fall wird zu einem bestimmten Zeitpunkt verglichen, ob eine Erkrankung in lärmbelasteten Gebieten häufiger vorkommt als in ruhigen Gegenden. In der Lärmwirkungsforschung sind solche Studien häufig zu Bluthochdruck gemacht worden. Solche Studien sind aber prinzipiell fehleranfälliger (**Bias**). Beeinflusst nämlich der Lärm nicht nur das Blutdruckerkrankungsrisiko, sondern auch die Überlebenswahrscheinlichkeit bzw. die Krankheitsdauer, kann dies zu einem Bias führen. Wenn beispielsweise Personen mit Bluthochdruck in lärmbelasteten Gebieten früher sterben als in ruhigen Gebieten, würde eine Querschnittsstudie zum Schluss kommen, dass die Prävalenz von Bluthochdruck in lärmbelasteten Gebieten geringer ist, da die Verstorbenen ja nicht in eine Querschnittsstudie eingeschlossen werden können. Damit würde eine paradoxe protektive Wirkung von Lärm beobachtet werden.

### a) Herz-Kreislaufkrankungen

#### *WHO-Richtlinien*

Herz-Kreislaufkrankungen gehören zu den am besten untersuchten Krankheitsbildern im Zusammenhang mit Lärm. In den 2018 publizierten Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation<sup>69</sup> wurde die Qualität der Evidenz für einen Zusammenhang zwischen **Strassenlärm** und der

<sup>69</sup> WHO World Health Organisation (2018)

Inzidenz für ischämische Herzerkrankungen als hoch gewertet. Über alle Studien wurde eine Zunahme des Erkrankungsrisikos um 8% (95% KI<sup>70</sup>: 1 bis 15%) pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ) am Wohnort beobachtet. Die Evidenzqualität, dass kein Zusammenhang zwischen dem Neuauftreten von Bluthochdruck und Strassenlärm besteht, war tief, da nur eine einzige Kohortenstudie durchgeführt wurde. Deutlich mehr Studien gab es zur Prävalenz von Bluthochdruck und Strassenlärm, welche einen Zusammenhang nahelegen (5% [95% KI: 2 bis 8%] pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms,  $L_{den}$ ). Dennoch wurde die Evidenzqualität für einen Zusammenhang als sehr tief bewertet, da es sich um Querschnittsstudien handelt. Die Evidenzqualität für Schlaganfälle wurde auf der Basis einer Kohortenstudie als moderat betrachtet mit einer Zunahme des Erkrankungsrisikos um 14% [95% KI: 3 bis 25%] pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ).

Für andere Lärmquellen gab es deutlich weniger Studien für die Beurteilung der Evidenz. In Bezug auf **Bahnlärm** gab es keine Studie zur Inzidenz von ischämischen Erkrankungen und Schlaganfällen. In einer Studie wurde die Inzidenz von Bluthochdruck untersucht, welche keinen Zusammenhang mit Bahnlärm fand (tiefe Evidenzqualität).

Die Evidenzqualität für einen Zusammenhang zwischen **Fluglärm** und Inzidenz von ischämischen Erkrankungen wurde als sehr tief eingeschätzt (9% [95% KI: 4 bis 15%] pro 10 dB Zunahme des Fluglärms ( $L_{den}$ )). Die Abwesenheit eines Zusammenhanges zwischen Fluglärm und dem Neuauftreten von Bluthochdruck wurde basierend auf einer Kohortenstudie mit tiefer Evidenzqualität bewertet. Zu Fluglärm und der Inzidenz von Schlaganfällen gab es keine Studie.

#### *Studienergebnisse aus der Schweiz*

In der SAPALDIA-Studie war die arterielle Steifheit, ein Risikofaktor für eine spätere kardiovaskuläre Erkrankung, bei 2'775 untersuchten Studienteilnehmenden unter Berücksichtigung einer Vielzahl weiterer Einflussfaktoren wie Rauchen oder körperliche Aktivität mit zunehmender Bahnlärmexposition am Wohnort erhöht.<sup>71</sup> In der Aktualisierung der SiRENE-Studie wurde das kardiovaskuläre Sterblichkeitsrisiko im Zusammenhang mit Strassen-, Bahn- und Fluglärm untersucht.<sup>72</sup> In die Studie eingeschlossen wurden Erwachsene ab dem Alter von 30 Jahren, welche im Jahr 2000 in der Schweiz lebten. Insgesamt traten zwischen 2000 und 2015 rund 280'000 kardiovaskuläre Todesfälle auf, welche in die Analyse eingeschlossen wurden. Das Sterberisiko für alle kardiovaskulären Ursachen erhöht sich um 2.9% (95%-KI: 2.4 bis 3.4%) pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ) und um 1.3% (95%-KI: 1.0 bis 1.7%) pro 10 dB Zunahme des Bahnlärms. Für Fluglärm war der Zusammenhang mit allen kardiovaskulären Todesursachen nicht signifikant erhöht (0.3%, 95%-KI: -0.4 bis 1.0%). In Bezug auf die einzelnen Diagnosegruppen ist Strassenlärm signifikant mit ischämischen Herzerkrankungen (3.4%, 95%-KI: 2.1 bis 4.2%) inklusive Herzinfarkt (4.3%, 95%-KI: 2.9 bis 5.8%), Herzinsuffizienz (1.9%, 95%-KI: 0.2 bis 3.6%), bluthochdruckbedingte Erkrankungen (3.5%, 95%-KI: 2.0 bis

<sup>70</sup> Das 95%-KI bezeichnet das 95%-Konfidenzintervall des Effektschätzers.

<sup>71</sup> Foraster; Eze; Schaffner; u. a. (2017a)

<sup>72</sup> Vienneau; Saucy; Schäffer; u. a. (2021)

4.9%) und Schlaganfällen (1.5%, 95%-KI: 0.2 bis 2.8%) assoziiert. Bahnlärm ist signifikant mit ischämischen Herzerkrankungen (2.1%, 95%-KI: 1.5 bis 2.7%) inklusive Herzinfarkt (2.0%, 95%-KI: 1.0 bis 3.0%) und bluthochdruckbedingte Erkrankungen (1.6%, 95%-KI: 0.6 bis 2.7%) sowie mit Schlaganfällen (1.0%, 95%-KI: 0.1 bis 1.9%) assoziiert. Fluglärm ist signifikant mit Herzinfarkt (4.0%, 95%-KI: 2.0 bis 6.0%) und ischämischen Schlaganfällen (6.5%, 95%-KI: 2.1 bis 11.1%) assoziiert, sowie knapp nicht signifikant mit bluthochdruckbedingten Erkrankungen (1.9%, 95%-KI: -0.2 bis 4.0%). Die relativen Risiken waren für Männer höher als für Frauen und nahmen mit zunehmendem Alter ab (siehe Kapitel 5.2.3, Herz-Kreislauf-erkrankungen).

In einer weiteren Schweizer Studie wurde untersucht, ob nächtlicher Fluglärm akute Herz-Kreislauf-Todesfälle auslösen kann.<sup>73</sup> Dazu wurden mittels einer Case-Crossover<sup>74</sup> Studie die Sterblichkeitsdaten von 2000 und 2015 um den Flughafen Zürich mit der akuten nächtlichen Lärmbelastung verglichen. Es zeigte sich, dass das Risiko eines Herz-Kreislauf-Todesfalls mit zunehmender Lärmbelastung signifikant zunahm. Die stärksten Assoziationen wurden für Todesfälle wegen ischämischer Herzerkrankung inkl. Herzinfarkt beobachtet. Es wurde abgeschätzt, dass im Studienzeitraum bei rund 800 Herz-Kreislauf-Todesfällen Fluglärm eine Mitursache war, was drei Prozent aller beobachteten Herz-Kreislauf-Todesfälle in der Nähe des Flughafens Zürich entsprach. Die Ergebnisse sind im Einklang mit anderen Studien zu den Trigger-Effekten von Emotionen auf akute koronare Erkrankungen (zum Beispiel Wut oder Aufregung). Das verwendete Studiendesign ist nicht anfällig auf Verzerrungen (Confounding) durch Lebensstilfaktoren und somit hilfreich, um die Kausalität mit Lärmereignissen zu evaluieren. Es eignet sich aber nur für Lärmquellen, welche grosse Variationen zwischen den einzelnen Tagen aufweisen. Dies ist für Strassen- und Bahnverkehr typischerweise nicht der Fall, während die Verteilung des Flugverkehrs um den Flughafen wetterbedingt stark variieren kann.

#### *Neue systematische Literaturübersichten und Meta-Analysen*

Seit den WHO Richtlinien sind einige Meta-Analysen zum lärmbedingten kardiovaskulären Erkrankungsrisiko erschienen (Abbildung 5-4). In einer Aktualisierung der WHO-Richtlinien wurden Expositions-Wirkungs-Beziehungen für die Inzidenz von ischämischen Erkrankungen berechnet.<sup>75</sup> In die Meta-Analyse wurden alle von der WHO Richtlinie berücksichtigten Studien sowie alle seither erschienenen Publikationen bis Februar 2019 eingeschlossen. Studien, welche Prävalenz und nur Sterblichkeit berücksichtigt hatten, wurden ausgeschlossen. Basierend auf 13 Studien zu Strassenlärm wurde eine signifikante Zunahme des Erkrankungsrisikos von 2% (95%-KI: 0 bis 4%) pro 10 dB Zunahme des  $L_{den}$  beobachtet, für Fluglärm eine Zunahme des Erkrankungsrisikos von 3% (95%-KI: -2 bis 9%) pro 10 dB (fünf Studien) und für Bahnlärm basierend auf drei Studien eine Zunahme des Erkrankungsrisikos von 1% (95%-KI: -1 bis 3%). Der mittlere Effektschätzer über alle Verkehrsquellen betrug 2% (95%-KI: 0 bis 4%). Alle Expositions-Wirkungs-Beziehungen waren über den ganzen Expositionsbereich linear mit den tiefsten

<sup>73</sup> Saucy; Schäffer; Tangermann; u. a. (2021)

<sup>74</sup> Case Crossover Studien erlauben die Untersuchung von akuten Effekten. Dabei wird für akute Ereignisse (z.B. Todesfälle) evaluiert, ob die Exposition anders war als statistisch zu erwarten gewesen wäre.

<sup>75</sup> Vienneau; Eze; Probst-Hensch; u. a. (2019)

Werten ( $L_{den}$ ) typischerweise im Bereich von 35 bis 45 dB. Das bedeutet, dass kein Schwellenwert bestimmt werden konnte, unterhalb dessen Gesundheitseffekte mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden konnten.

In einer anderen systematischen Literaturübersicht zu Strassenlärm und der Inzidenz von Herzinfarkt wurden 13 Studien eingeschlossen, welche bis zum 29. November 2019 publiziert wurden.<sup>76</sup> Unter Annahme einer linearen Expositions-Wirkungs-Beziehung resultierte ein statistisch signifikanter Effektschätzer von 3% (95-KI: 0 bis 5%) pro 10 dB Strassenverkehrslärm ( $L_{den}$ ). Es wurde keine Analyse zu möglichen Schwellenwerten publiziert.

Dzhambov and Dimitrova<sup>77</sup> evaluierten die Expositions-Wirkungs-Beziehung für Inzidenz oder Sterblichkeit wegen Schlaganfälle basierend auf allen Studien, welche bis 24. November 2015 publiziert wurden. Sechs Studien untersuchten Strassenlärm und fanden eine Zunahme des Risikos für Schlaganfall von 1% (95-KI: -4 bis 6%) pro 10 dB Zunahme. Für Personen mit 70-75 dB Lärm war das Erkrankungsrisiko nicht-signifikant um 29% (95-KI: -26 bis 124%) höher als bei Personen mit weniger als 55 dB Lärm an ihrem Wohnort. Für Fluglärm war die Risikozunahme in fünf Studien 1% (95-KI: 0 bis 2%) pro 10 dB Zunahme.

In einer weiteren systematischen Literaturübersicht zu Fluglärm und Inzidenz oder Sterblichkeit wegen Schlaganfällen wurden neun Studien eingeschlossen, welche bis zum 31. August 2017 publiziert wurden.<sup>78</sup> Unter Annahme einer linearen Expositions-Wirkungs-Beziehung resultierte ein gemeinsamer Effektschätzer von 1.3% (95-KI: -0.2 bis 2.8%) pro 10 dB Fluglärm ( $L_{den}$ ). Die tiefsten berücksichtigten Schwellenwerte waren unterschiedlich. Die Autoren vermuten, dass unterschiedliche methodische Ansätze in den verschiedenen Studien dazu führen, dass die mittels Meta-Analyse hergeleitete Expositions-Wirkungs-Beziehung unterschätzt wurde.

In einer Meta-Analyse zu Bluthochdruck im Zusammenhang mit Strassenlärm wurden alle bis 5. August 2017 publizierten Studien aufgenommen.<sup>79</sup> Studien zu Inzidenz oder Sterblichkeit wurden eingeschlossen, Prävalenzstudien ausgeschlossen. Basierend auf sieben Kohortenstudien wurde eine Zunahme des Risikos für Bluthochdruck von 1.8% (95% KI: -1.3 bis 4.9%) pro 10 dB Zunahme der Strassenlärmbelastung am Wohnort beobachtet. Es gab keinen Hinweis für einen Publikationsbias. Die Evidenzqualität wurde von den Autoren als moderat eingeschätzt.

Dzhambov and Dimitrova<sup>80</sup> analysierten 13 Studien zu Bluthochdruck und Strassenlärm bei Kindern, welche bis 21. Juli 2016 publiziert wurden. Insgesamt war die Studienlage heterogen mit gewissen Hinweisen für einen Zusammenhang. Pro 5 dB Zunahme der Strassenlärmbelastung im Kindergarten oder in der Schule nahm der systolische Blutdruck um 0.48 mmHg (95% KI: -0.87 bis 1.83 mmHg) zu und der diastolische um 0.22 mmHg (95% KI: -0.64 bis 1.07

---

<sup>76</sup> Khosravipour; Khanlari (2020)

<sup>77</sup> Dzhambov; Dimitrova (2016)

<sup>78</sup> Weihofen; Hegewald; Euler; u. a. (2019)

<sup>79</sup> Dzhambov; Dimitrova (2018)

<sup>80</sup> Dzhambov; Dimitrova (2017)

mmHg). Die entsprechenden Effekte bei Strassenlärm zuhause waren 0.20 mmHg (95% KI: -0.30 bis 0.71 mmHg) und 0.03 mmHg (95% KI: -0.18 bis 0.25 mmHg).

**Abbildung 5-4: Überblick über neue Meta-Analysen zum Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und kardiovaskulären Erkrankungen**

Verkehrslärmquelle	Erkrankung	Risiko pro 10 dB (95%-Konfidenzintervalle)	Quelle
Strassenlärm	Alle kardiovaskulären Erkrankungen (Sterblichkeit)	1% (-2 bis 5%)	Cai et al, 2021
Strassenlärm	Ischämische Erkrankungen (Sterblichkeit)	3% (-1 bis 8%)	Cai et al, 2021
Strassenlärm	Ischämische Erkrankungen (Inzidenz und Sterblichkeit)	2% (0 bis 4%)	Vienneau et al, 2019
Strassenlärm	Herzinfarkt (Inzidenz)	3% (0 bis 5%)	Khosravipour et al, 2020
Strassenlärm	Schlaganfälle (Inzidenz und Sterblichkeit)	1% (-4% bis 6%)	Dzhambov, et al. 2016
Strassenlärm	Schlaganfälle (Sterblichkeit)	5% (-3 bis 14%)	Cai et al, 2021
Strassenlärm	Bluthochdruck (Inzidenz und Sterblichkeit)	1.8% (-1.3 bis 4.9%)	Dzhambov et al, 2018
Strassenlärm	arteriellen Bluthochdruck (Prävalenz)	14% (6 bis 20%)	Renner et al, 2020
Strassenlärm	arteriellen Bluthochdruck (Inzidenz)	13% (-1 bis 28%)	Chen et al, 2021
Bahnlärm	Ischämische Erkrankungen (Inzidenz und Sterblichkeit)	1% (-1 bis 3%)	Vienneau et al, 2019
Fluglärm	Ischämische Erkrankungen (Inzidenz und Sterblichkeit)	3% (-2 bis 9%)	Vienneau et al, 2019
Fluglärm	Schlaganfälle (Inzidenz und Sterblichkeit)	1% (0 bis 2%)	Dzhambov, et al. 2016
Fluglärm	Schlaganfälle (Inzidenz und Sterblichkeit)	1.3% (-0.2 bis 2.8%)	Weihofen et al. 2019

Weiter wurden 31 Studien zu Blutdruck und Hypertonie im Zusammenhang mit Strassenlärm evaluiert, welche bis Februar 2017 publiziert wurden.<sup>81</sup> Für Erwachsene nahm die selbstberichtete oder vom Doktor diagnostizierte Prävalenz für arteriellen Bluthochdruck signifikant um 7% pro 5 dB(A) zu. Studien mit gemessenen Blutdruckwerten fanden für den systolischen Blutdruck sowohl für Kinder als auch für Erwachsene nur schwach positive Assoziationen mit Strassenlärm und für diastolischen Blutdruck waren in beiden Altersgruppen keine Zusammenhänge erkennbar. Aufgrund der Heterogenität und methodischer Limitierungen bewerten die Autoren die Aussagekraft der geschätzten Effekte als stark eingeschränkt. Eine Schwierigkeit bei Studien zum gemessenen Blutdruck ist der Umgang mit Patienten, welche Blutdrucksenker benutzen. Einige Studien schliessen diese Leute aus, andere Studien ignorieren diese Tatsache oder wenden statistische Korrekturen an («Censoring»). Das kann dazu führen, dass reale Zusammenhänge maskiert werden.

<sup>81</sup> Renner; Gross; Ernst; u. a. (2020)

In einer weiteren systematischen Literaturanalyse und Evidenzbeurteilung zur lärmbedingten Sterblichkeit, welche sich an der WHO Methodik anlehnte, wurden 13 Publikationen vom Jahr 2000 bis 2020 eingeschlossen.<sup>82</sup> Für alle kardiovaskulären Todesursachen nahm das Risiko pro 10 dB Strassenlärm nicht-signifikant um 1% (95% KI: -2 bis 5%) zu. Für ischämische Herzkrankheiten betrug das Risiko 3% (95%-KI: -1 bis 8%) und für Schlaganfälle 5% (95%-KI: -3 bis 14%). Die Evidenzqualität wurde für alle kardiovaskulären und für ischämische Erkrankungen als moderat eingestuft. Bei dieser Arbeit fehlen jedoch einige relevante Publikationen.

In einer weiteren Meta-Analyse von Kohortenstudien wurde geschlossen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Bluthochdruck und Verkehrslärm besteht.<sup>83</sup> Das zusätzliche Risiko für «Wohnen oder Arbeiten in lärmiger Umgebung» wurde mit 18% (95%-KI: 6 bis 32%) angegeben und das Risiko pro 10 dB mit 13% (95% -1 bis 28%). Es gibt aber einige Unklarheiten in Bezug auf die Auswahl der Studien und die Quantifizierung der Expositions-Wirkungs-Beziehungen.

#### *Neue Einzelstudien (ab 2020)*

Seit der Analyse der WHO-Richtlinien wurden sehr viele neue Studien zum kardiovaskulären Gesundheitsrisiko im Zusammenhang mit Verkehrslärm publiziert. Im Folgenden werden die Studien besprochen, welche nach 2020 publiziert wurden und grösstenteils nicht in den neueren Meta-Analysen berücksichtigt sind.

In einer grossen Studie aus Toronto wurde basierend auf 701'174 neu aufgetretenen Bluthochdruck-Fällen zwischen 2001 und 2015 eine 2%-Zunahme des Erkrankungsrisikos für Bluthochdruck (95%-KI: 1 bis 3%) pro 10 dB Zunahme des 24-Stunden Mittelwerts für Strassenlärm beobachtet.<sup>84</sup> Der Zusammenhang war ausgeprägter für Frauen und für jüngere (<60 Jahre) Studienteilnehmende.

In einer dänischen Kohortenstudie bei 57'000 Personen wurde der Zusammenhang zwischen Verschreibung von Medikamenten gegen Bluthochdruck und Strassenlärm im Zeitraum 1987 bis 2016 untersucht.<sup>85</sup> Insgesamt konnte keine signifikanter Nachweis erbracht werden, aber es gab gewisse Hinweise für einen Zusammenhang zwischen der Lärmbelastung an der am wenigsten exponierten Hausfassade und Lärmeffekten bei Rauchern und übergewichtigen Personen.

In einer weiteren dänischen Kohortenstudie wurde bei 52'758 Personen in Kopenhagen die Sterblichkeit zwischen 1987 und 2016 im Zusammenhang mit Strassenlärm untersucht.<sup>86</sup> Das

---

<sup>82</sup> Cai; Ramakrishnan; Rahimi (2021)

<sup>83</sup> Chen; Fu; Shi; u. a. (2021)

<sup>84</sup> Shin; Bai; Oiamo; u. a. (2020)

<sup>85</sup> Thacher; Poulsen; Roswall; u. a. (2020)

<sup>86</sup> Thacher; Hvidtfeldt; Poulsen; u. a. (2020)

Sterberisiko für alle Todesursachen zusammen nahm um 8% (95% KI: 5 bis 11%) zu pro Interquartilsabstand<sup>87</sup> (10.4 dB) des Strassenlärms ( $L_{den}$ ) in den vorhergehenden 10 Jahren. Für alle kardiovaskulären Todesfälle betrug das entsprechende Sterberisiko 13% (95% KI: 6 bis 19%), für Schlaganfälle 11% (95% KI: -1 bis 25%) und für ischämische Herzerkrankungen 3% (95% KI: -6 bis 14%).

In einer schwedischen Studie wurden kardiovaskuläre Sterblichkeit und Erkrankungen bei 6'300 Personen aus Stockholm zwischen 1970 und 2011 im Zusammenhang mit Strassenlärm untersucht.<sup>88</sup> Personen, welche Strassenlärm ( $L_{den}$ ) von mehr als 60 dB ausgesetzt waren, hatten ein 8% (95% KI: -10 bis 28%) höheres kardiovaskuläres Sterberisiko als Personen unterhalb von 50 dB. Das Risiko für das Neuauftreten einer ischämischen Herzerkrankung war um 14% (95% KI: -4 bis 36%) erhöht und das Risiko für einen Schlaganfall um 7% (95% KI: -15 bis 36%).

In der dänischen Pflegerinnenstudie mit 22'882 Teilnehmenden wurde das Auftreten von Herzinfarkten zwischen 1993 und 2015 im Zusammenhang mit Strassenlärm untersucht.<sup>89</sup> Im Vergleich zu Personen mit einer Strassenlärmaxposition ( $L_{den}$ ) von weniger als 50.4 dB hatten Personen mit einer Lärmaxposition von  $\geq 56.2$  dB ein 7% (95% KI: -13 bis 33%) erhöhtes Risiko für einen Herzinfarkt. Für tödliche Herzinfarkte war das Risiko um 28% (95% KI: -17 bis 99%) erhöht.

In einer kanadischen Kohortenstudie mit einer Million Teilnehmenden aus Toronto erhöhte sich zwischen 2001 bis 2015 das Risiko für ischämische Erkrankungen um 7% (95% KI: 6 bis 9%) und das Risiko für Herzinsuffizienz um 7% (95% KI: 6 bis 8%) pro Interquartilsabstand (10.7 dB) des 24-Stunden Mittelwertes.<sup>90</sup> Separate Analysen für den Nachtlärm ergaben ähnliche Resultate. Die Expositions-Wirkungs-Beziehungen waren linear.

In einer anderen kanadischen Kohortenstudie aus der Provinz Quebec wurde das Auftreten von Herzinfarkten bei rund einer Million Personen zwischen 2000 und 2014 im Zusammenhang mit dem Umgebungs- und Strassenverkehrslärm untersucht.<sup>91</sup> Das Erkrankungsrisiko nahm um 11% (95%-K: 7 bis 14%) pro 10 dB  $L_{den}$  des Umgebungslärms zu. Modellierter Strassenlärm sowie Distanz zu Hauptstrassen und Autobahnen waren nicht mit Herzinfarkt assoziiert. In der Nähe ( $\leq 100$  m) von Eisenbahnen war das Herzinfarktrisiko erhöht (7%, 95%-KI: 1 bis 14%) im Vergleich zu entfernteren Gebieten ( $>1'000$ m), während in der Nähe von Flughäfen das Risiko signifikant reduziert war. Da in dieser Studie keine Daten zu individuellen Risikofaktoren verfügbar waren, könnte das paradoxe Resultat zu Fluglärm auf Confounding zurückzuführen sein.

---

<sup>87</sup> Der Interquartilsabstand entspricht der Differenz zwischen dem 25. und 75. Perzentil in der Lärmverteilung. Dieser Vergleich ist in epidemiologischen Studien gängig, wenn Effekte von verschiedenen Expositionen, welche auf unterschiedlichen Skalen gemessen werden, vergleichbar gemacht werden sollen. Aus diesem Grund erfolgt bei dieser Studie der Vergleich pro 10.4 dB statt wie üblicherweise pro 10 dB.

<sup>88</sup> Andersson; Ogren; Molnar; u. a. (2020)

<sup>89</sup> Cramer; Jorgensen; Hoffmann; u. a. (2020)

<sup>90</sup> Bai; Shin; Oiamo; u. a. (2020)

<sup>91</sup> Yankoty; Gamache; Plante; u. a. (2021)

In einer ökologischen Studie<sup>92</sup>, basierend auf den Sterblichkeitsraten in 3'259 Volkszählungsgebieten um einen brasilianischen Flughafen, war die Sterblichkeit für kardiovaskuläre und ischämische Herzerkrankungen in Gebieten mit einem Tag-Nacht-Durchschnittsfluglärm von mehr als 65 dB um 6% (95%-KI: -6 bis 20%) bzw. 11% (95%-KI: -4 bis 27%) erhöht im Vergleich zu Gebieten mit einer Lärmbelastung von 50 dB oder weniger.<sup>93</sup> Analysen der Expositions-Wirkungs-Beziehungen ergaben eine statistisch signifikante Zunahme des Risikos für beide Krankheitsbilder ( $p = 0.043$  bzw.  $p = 0,005$ ). Für Schlaganfälle gab es wenig Hinweise für einen Zusammenhang.

### *Zusammenfassung*

Auswirkungen des Verkehrslärms auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen wurden mehrfach nachgewiesen und haben eine hohe pathophysiologische Plausibilität wie in mehreren neuen experimentellen Studien<sup>94</sup> und anhand von Biomarkern<sup>95</sup> gezeigt werden konnte. Für Strassenlärm und ischämische Herzerkrankungen hat die WHO die Evidenzqualität als hoch eingestuft. Seither ist eine Reihe von weiteren Studien publiziert worden, die vor allem Zusammenhänge mit ischämischen Herzerkrankungen, Bluthochdruck, Herzinsuffizienz und Schlaganfälle zeigten. Diese machen rund 70-80% aller kardiovaskulären Erkrankungen aus. Insbesondere für die Sterblichkeit gibt es einige Studien, welche den Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und allen kardiovaskulären Todesursachen gesamthaft untersucht haben. An der IC BEN 2021 wurden mehrere neue Analysen zu verschiedenen kardiovaskulären Erkrankungen und Todesfällen aus skandinavischen Kohortenstudien publiziert, welche im Einklang mit den bisherigen Befunden stehen. Aus diesem Grund wird die Evidenz für einen kausalen Zusammenhang zwischen Strassen-, Bahn- und Fluglärm mit **kardiovaskulären Erkrankungen bzw. Todesfällen** als hoch eingeschätzt.

## **b) Diabetes**

### *WHO-Richtlinien*

In den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation wurde eine Kohortenstudie zu Strassen- und Bahnlärm im Zusammenhang mit der Inzidenz für Diabetes Typ 2 (früher auch Altersdiabetes genannt) evaluiert sowie eine Kohortenstudie zu Fluglärm.<sup>96</sup> Für Strassenlärm wurde die Qualität der Evidenz für einen Zusammenhang als moderat eingeschätzt und für Fluglärm als sehr tief. Für Bahnlärm wurde die Evidenzqualität für die Absenz einer Assoziation auf der Basis von einer Studie als moderat gewertet. Diese scheinbar paradoxe Einschätzung rührt daher, dass eine einzige Kohortenstudie aus Dänemark zu Bahnlärm vorhanden war, welche

---

<sup>92</sup> In ökologischen Studien werden aggregierte Daten (Krankheitsraten) und nicht individuelle Daten analysiert.

<sup>93</sup> Roca-Barcelo; Nardocci; de Aguiar; u. a. (2021)

<sup>94</sup> Schmidt; Herzog; Schnorbus; u. a. (2021); Münzel; Sorensen; Daiber (2021)

<sup>95</sup> Osborne; Radfar; Hassan; u. a. (2020); Kupcikova; Fecht; Ramakrishnan; u. a. (2021); Foraster; Eze; Schaffner; u. a. (2017b)

<sup>96</sup> WHO (2018)

keinen Zusammenhang fand. Diese war prospektiv und von guter Qualität, was für eine moderate Evidenzqualität ausschlaggebend war. Die Hauptschwäche dieser Studien lag jedoch darin, dass die Modellierung des Bahnlärms mit grösserer Unsicherheit behaftet war und die Exposition tief war. Nur rund 10% der Studienpopulation war oberhalb von 50 dB ( $L_{den}$ ) exponiert. Insofern erstaunt es nicht, dass kein Zusammenhang gefunden wurde.

#### *Studienergebnisse aus der Schweiz*

Seither sind mehrere neue Studien publiziert worden, unter anderem im Rahmen von SiRENE die Schweizer SAPALDIA-Studie, welche basierend auf einer Kohorte von 2'631 Personen die Inzidenz von Diabetes Typ 2 zwischen 2002 und 2011 untersuchte.<sup>97</sup> Es wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen Strassenlärm und dem Auftreten von Diabetes beobachtet (Risikoerhöhung um 35% [95%-KI: 2%-78%] pro 10 dB Zunahme des  $L_{den}$ ). Fluglärm erhöhte das Diabetesrisiko nicht-signifikant um 86% (95% KI: -4 bis 259%) pro 10 dB und Bahnlärm war nicht mit Diabetes assoziiert. Aufgrund der geringen Fallzahlen sind die Expositions-Wirkungs-Beziehungen in SAPALDIA mit relativ grosser Unsicherheit behaftet.

#### *Neue systematische Literaturübersichten und Meta-Analysen*

Eine neue internationale Meta-Analyse, die auch die Schweizer SAPALDIA-Daten benutzt, kommt zum Schluss, dass es Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Diabetes Typ2 und Lärm gibt, insbesondere für Strassen- und Fluglärm.<sup>98</sup>

Eine andere neue Meta-Analyse basierend auf fünf Studien zur Inzidenz von Diabetes findet für Strassenlärm eine Zunahme des Erkrankungsrisikos von 11% (95-KI: 8 bis 15%) pro 10 dB Zunahme des  $L_{den}$ , für Fluglärm eine Zunahme des Erkrankungsrisikos von 20% (95-KI: -12 bis 63%) pro 10 dB (drei Studien) und für Bahnlärm basierend auf zwei Studien keinen Zusammenhang (-1%, 95% KI: -6 bis 4%).<sup>99</sup> Der mittlere Effektschätzer über alle Verkehrsquellen beträgt 8% (95%-KI: 2 bis 15%).

Alle Expositions-Wirkungs-Beziehungen waren über den ganzen Expositionsbereich linear mit den tiefsten Werten ( $L_{den}$ ) typischerweise im Bereich von 35 bis 45 dB. Das bedeutet, dass keinen Schwellenwert bestimmt werden konnte, unterhalb dessen Gesundheitseffekte mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden könnten.

Auf der gleichen Studienbasis kommen Wang et al, über alle Verkehrsquellen kombiniert ebenfalls zu einem mittleren Effektschätzer von 8% (95%-KI: 2 bis 15%).<sup>100</sup> In dieser Meta-Analyse wurden auch vier Querschnittsstudien eingeschlossen, wobei zwei davon beruflichen Lärm un-

---

<sup>97</sup> Eze; Foraster; Schaffner; u. a. (2017)

<sup>98</sup> Ohlwein; Hennig; Lucht; u. a. (2019)

<sup>99</sup> Vienneau; Eze; Probst-Hensch; u. a. (2019)

<sup>100</sup> Wang; Sun; Wang; u. a. (2020)

tersucht hatten. Diese Studien fanden für Lärm-Exponierte ein 9% (95%-KI: -11 bis 29%) erhöhtes Diabetesrisiko. Es ist jedoch unklar auf welche Expositions-differenz sich dieser Risikoschätzer bezieht.

In einer anderen Meta-Analyse wurde der Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und dem metabolischen Syndrom, ein Risikofaktor für Diabetes und Bluthochdruck, evaluiert.<sup>101</sup> Basierend auf drei Kohorten und zwei Querschnittsstudien wurde ein signifikanter Zusammenhang beobachtet. Die Effektgrößen wurden aber nicht standardisiert und drei Studien untersuchten berufliche Expositionen, so dass der kombinierte Effektschätzer nicht aussagekräftig ist.

### *Neue Einzelstudien*

Nicht eingeschlossen in die neueste Meta-Analyse<sup>102</sup> wurde eine grosse Studie aus Toronto, welche basierend auf 914'607 neu aufgetretenen Diabetes-Fällen zwischen 2001 und 2015 eine 8%-Zunahme des Erkrankungsrisikos (95%-KI: 7% bis 9%) pro 10 dB Strassenlärm beobachtet hat.<sup>103</sup> Der Zusammenhang war ausgeprägter für Frauen und für jüngere (<60 Jahre) Studienteilnehmende.

In einer dänischen Studie wurde der Zusammenhang zwischen Strassenverkehrslärmexposition und Schwangerschaftsdiabetes bei rund 630'000 Schwangerschaften zwischen 2004-2017 untersucht.<sup>104</sup> Unter Berücksichtigung von potentiellen Confoundern war Strassenlärm nicht mit Schwangerschaftsdiabetes assoziiert. Pro 10 dB Zunahme des Bahn-lärms an der am meisten und am wenigsten exponierten Hausfassade während des ersten Schwangerschaftstrimesters nahm das Risiko einen Schwangerschaftsdiabetes zu entwickeln um 6% (95%-KI: 3 bis 10%) bzw. 7% (95%-KI: 2 bis 13%) zu.

In einer Kohortenstudie aus der Region Augsburg war bei 1'192 Personen im Zeitraum 2006/08 bis 2013/14 das Risiko ein metabolisches Syndrom zu entwickeln nicht mit der Lärmexposition assoziiert, welche anhand von Regressionsmodellen und Lärmkarten hergeleitet wurde.<sup>105</sup>

### *Zusammenfassung*

WHO hat auf der Basis von den bis 2015 publizierten Studien die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Strassenlärm und dem Auftreten (Inzidenz) von Diabetes vom Typ 2 als moderat (zweithöchste Stufe) eingestuft. Es gab eine prospektive Kohortenstudie von hoher Qualität zu diesem Thema. Weil es nur eine prospektive Studie war, wurde gemäss Regeln der WHO die Evidenz von der höchsten Evidenzklasse auf die zweithöchste runtergestuft, obwohl die Studie von hoher Qualität war. Mittlerweile gibt es sechs weitere prospektive Kohortenstudie, eine davon aus der Schweiz, die alle einen Zusammenhang zwischen Strassenlärm

---

<sup>101</sup> Li; Ruan; Yi; u. a. (2021)

<sup>102</sup> Vienneau; Eze; Probst-Hensch; u. a. (2019)

<sup>103</sup> Shin; Bai; Oiamo; u. a. (2020)

<sup>104</sup> Thacher; Roswall; Damm; u. a. (2021)

<sup>105</sup> Voss; Schneider; Huth; u. a. (2021)

und Diabetes finden. Damit besteht kein Zweifel, dass gemäss den Regeln der WHO zur Evidenzbewertung, die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Diabetes im Zusammenhang mit Strassenlärm nun als hoch beurteilt werden muss. Zu diesem Schluss kommt auch eine neue Übersichtsarbeit.<sup>106</sup> Die biologische Plausibilität ist ebenfalls hoch. Das bedeutet, dass die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Strassenlärm und Diabetes als hoch eingeschätzt wird. Für Flug- und Bahnlärm gibt es weniger Studien. Insofern ist isoliert für diese Quellen betrachtet die Evidenz geringer.

Zum Zusammenhang zwischen der Prävalenz von Diabetes und Verkehrslärm wurden in den WHO-Richtlinien zwei Studien identifiziert und der Zusammenhang der Evidenzqualität wurde für alle drei Verkehrsträgern als sehr tief eingeschätzt. Seither hat sich die Datenlage nicht wesentlich verändert.

### **c) Depression und mentale Gesundheit**

#### *WHO-Richtlinien*

In den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation<sup>107</sup> wurde die Evidenzqualität für den Zusammenhang von Strassen- und Fluglärm mit Depression, Ängstlichkeit sowie der Einnahme von Medikamenten gegen Depressionen als sehr tief bewertet. Zum Bahnlärm gab es keine Studie. Expositions-Wirkungs-Beziehungen wurden keine berechnet.

#### *Studienergebnisse aus der Schweiz*

In der Schweizer Kohortenstudie SAPALDIA wurden 4'581 Personen eingeschlossen, welche 2001/2002 nicht an Depressionen litten.<sup>108</sup> Unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Ko-Faktoren wurde das Erkrankungsrisiko bis 2010/2011 in Bezug auf die Lärmexposition am Wohnort analysiert. Das Erkrankungsrisiko nahm nicht-signifikant um 7% (95% KI: -7 bis 22%) pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ) zu und um 20% (95% KI: -8 bis 55%) pro 10 dB Zunahme des Fluglärms. Für Studienteilnehmende ohne Wohnortswechsel während der Studiedauer war der Zusammenhang mit Fluglärm statistisch signifikant. Für Bahnlärm wurde kein Zusammenhang beobachtet. Das Ausmass der subjektiven Lärmbelastigung war ein wichtiger modifizierender Faktor in der Analyse.

#### *Neue systematische Literaturübersichten und Meta-Analysen*

Eine neue Meta-Analyse schloss zehn Studien zu Strassenlärm und Depression sowie Strassenlärm und Ängstlichkeit ein, welche vor dem 18. August 2019 publiziert wurden. Pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ) nahm das Risiko für Depression um 4% (95% KI: -3 bis 11%) und dasjenige für Ängstlichkeit um 12% (95% KI: -4 bis 30%) zu, ohne erkennbaren

---

<sup>106</sup> Münzel; Sorensen; Daiber (2021)

<sup>107</sup> WHO (2018)

<sup>108</sup> Eze; Foraster; Schaffner; u. a. (2020)

Schwellenwert.<sup>109</sup> Da die meisten Studien Querschnittsstudien waren, wurde die Evidenzqualität als sehr tief bewertet. Eine andere Literaturanalyse, die nur Studien seit der Publikation der WHO Richtlinien evaluierte, welche zwischen Mitte 2015 bis März 2019 publiziert wurden, kommt zum Schluss, dass sich seither die Evidenzqualität für Studien mit Interview-basierter Depressionseinschätzungen etwas erhöht hat und jetzt für alle drei Verkehrslärmarten tief statt sehr tief ist.<sup>110</sup>

In einer anderen Meta-Analyse wurde der Zusammenhang zwischen Angstzuständen und Verkehrslärmexposition evaluiert.<sup>111</sup> Basierend auf neun Studien mit verwertbaren Resultaten war das Risiko für Angstzustände pro 10 dB Zunahme der Verkehrslärmexposition um 9% (95%-KI: -3 bis 23%) erhöht. Der Zusammenhang war für schwere Angstzustände statistisch signifikant (8%, 95%-KI: 1 bis 15%). Die Zusammenhänge waren stärker für Strassenverkehrslärm und abwesend für Bahn- und Fluglärm, wobei für diese beiden Verkehrsträger nur je zwei Studien identifiziert wurden. Ausser einer ökologischen Studie waren alles Querschnittsstudien und deshalb wurde die Qualität der Evidenz als sehr gering bis gering eingeschätzt.

In der neusten Meta-Analyse wurden 26 Studien zu Depression und Ängstlichkeit eingeschlossen, ohne SAPALDIA.<sup>112</sup> In fünf Studien zu Fluglärm war das Risiko an Depression zu erkranken um 14% (95% KI: 12 bis 15%) erhöht pro 10 dB Zunahme des  $L_{den}$ . Für Strassenlärm (elf Studien) und Bahnlärm (drei Studien) war das Erkrankungsrisiko nicht-signifikant um 2-3% erhöht. Die Resultate waren stark von der deutschen Fall-Kontrollstudie des NORAH Projektes beeinflusst, welche 77'295 Patienten mit Depressionen und 578'246 Kontrollpersonen einschloss.<sup>113</sup> Die Verschreibung von Medikamenten gegen Depression war für Personen mit Strassenlärm  $\geq 70$  dB ( $L_{den}$ ) im Vergleich zu wenig Exponierten 17% (95% KI: 10 bis 25%) häufiger. Auch Hinweise für einen Zusammenhang mit Flug- und Bahnlärm wurde in dieser Studie gefunden. Ebenfalls Teil der Meta-Analyse war eine kleinere prospektive Kohortenstudie aus Deutschland mit 302 Neuerkrankungen während der Studiendauer von ca. 5 Jahren. Das Auftreten dieser Depressionen war um 29% (95% KI: 3 bis 62%) erhöht für Personen mit einer Strassenlärmexposition von  $>55$  dB  $L_{den}$  im Vergleich zu tiefer exponierten Personen.<sup>114</sup>

### *Neue Einzelstudien*

In einer neuen Kohortenstudie in Montreal wurde bei 140'000 Frauen mit einer Schwangerschaft zwischen 2000 bis 2016 bis 18 Jahre nach der Geburt analysiert, ob das Risiko wegen einer Depression hospitalisiert zu werden mit dem Umgebungslärm zusammenhing.<sup>115</sup> Nicht-

---

<sup>109</sup> Dzhambov; Lercher (2019b)

<sup>110</sup> Clark; Crumpler; Notley (2020)

<sup>111</sup> Lan; Roberts; Kwan; u. a. (2020)

<sup>112</sup> Hegewald; Schubert; Freiberg; u. a. (2020)

<sup>113</sup> Seidler; Hegewald; Seidler; u. a. (2017)

<sup>114</sup> Orban; McDonald; Sutcliffe; u. a. (2016)

<sup>115</sup> He; Smargiassi; Low; u. a. (2019)

lineare Expositions-Wirkungsanalysen fanden, dass das Risiko für eine Hospitalisierung wegen Depression für Personen mit einer Umgebungslärmexposition von 60 dB um 16% (95%-KI: -16 bis 62%) erhöht war im Vergleich zu 50 dB. Für Nachtlärm war der Zusammenhang statistisch signifikant (32%, 95%-KI: 8 bis 63%). Noch stärkere Assoziationen wurden für psychische Störungen gefunden. Die Studie wurde in der Meta-Analyse von Hegewald et al. (2020) erwähnt aber nicht für die Berechnung des Effektschätzers berücksichtigt, da keine quellenspezifischen Lärmdaten publiziert wurden, sondern Abschätzungen für den gesamten Umgebungslärm gemacht wurden.

In einer deutschen Kohortenstudie von 11'905 Personen im Alter von 35-74 Jahren war das Risiko, innerhalb von fünf Jahren depressive Symptome oder Angstzustände zu entwickeln, statistisch signifikant mit der Lärmbelästigung assoziiert.<sup>116</sup> Es lagen aber keine Daten zur effektiven Lärmexposition vor, so dass diesbezügliche Zusammenhänge unklar sind.

### *Schlussfolgerung*

Mittlerweile liegen mehrere Kohortenstudien vor, welche einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Depressionen und mindestens einer Verkehrslärmquelle nachweisen. Das bedeutet, dass gemäss dem Vorgehen der WHO bei der Evidenzeinschätzung die Evidenz für einen Zusammenhang als hoch eingeschätzt wird. Auch in Schweizer Daten finden sich substantielle Hinweise, dass sich das Risiko für Depressionen bei Lärmexposition am Wohnort erhöht. Zudem ist ein solcher Zusammenhang biologisch plausibel. Die Ergebnisse zu Depressionen sind auch konsistent mit der Studienlage zu Ängstlichkeit und gesundheitsbezogener Lebensqualität. Eine kürzlich erschienene Übersichtsarbeit kommt zum Schluss, dass «substantielle Anhaltspunkte» für einen Zusammenhang zwischen Lärm und Depressionen bestehen.<sup>117</sup> Insofern kann man die gleichen Schlussfolgerungen ziehen wie für Diabetes. Es besteht hohe Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Depressionen und Verkehrslärm. Unsicherheiten gibt es in Bezug auf die quellenspezifische Expositions-Wirkungs-Beziehung. Beim Fluglärm ist der Zusammenhang mit Depressionen zwar hoch-signifikant, aber dieses Resultat wird massgeblich von einer Fall-Kontrollstudie und nicht von einer prospektiven Kohortenstudie bestimmt. Für Bahnlärm hat man wenig Daten von Exponierten.

### **d) Übergewicht**

Basierend auf drei Querschnittsstudien zum Zusammenhang zwischen Strassenverkehrslärm und Körpergewicht (Body Mass Index, BMI) sowie Hüftumfang wurde die Evidenzqualität in den WHO Richtlinien als sehr tief bewertet.<sup>118</sup> Für Bahnlärm wurde die Evidenzqualität auf der Basis von zwei Querschnittsstudien als tief bis sehr tief bewertet. Für Fluglärm wurde die Evidenzqualität basierend auf einer Kohortenstudie für einen Zusammenhang mit BMI als sehr

---

<sup>116</sup> Beutel; Brahler; Ernst; u. a. (2020)

<sup>117</sup> Hahad; Beutel; Gilan; u. a. (2020)

<sup>118</sup> WHO (2018)

tief und für einen Zusammenhang mit Hüftumfang als moderat eingeschätzt. Der entsprechende Effektschätzer war eine Zunahme des Hüftumfangs um 3.46 cm (95% KI: 2.13 bis 4.77 cm) pro 10 dB Zunahme des Fluglärms ( $L_{den}$ ).

In der SAPALDIA-Studie waren bei 3'796 Teilnehmenden im Jahr 2010/2011 das Risiko für Übergewicht sowie BMI, Körperfettanteil und Hüftumfang signifikant mit Strassenlärm assoziiert.<sup>119</sup> In longitudinalen Analysen war das Risiko zwischen 2001 und 2010/2011 übergewichtig zu werden um 25% (95 KI: 4 bis 51%) erhöht pro 10 dB Strassenlärmexposition am Wohnort (5-Jahresmittelwert des  $L_{den}$ ).

Eine neue Meta-Analyse<sup>120</sup> zu Übergewicht bei Erwachsenen, welche elf Studien einschliesst, davon sieben Studien mit einem positiven Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und Übergewicht, fand über alle Verkehrsträger gemittelt eine Zunahme des Hüftumfangs von 7.5 mm (95% KI=3.6 bis 11.4 mm) pro Jahr und 10 dB Lärm Zunahme. Dieser Effektschätzer beruht nur auf signifikanten Studien und stellt somit eine Überschätzung dar.

Cai et al. (2020) evaluierten den Zusammenhang zwischen Übergewicht und Strassenverkehrslärm in Querschnittsanalysen mit Daten von drei Kohortenstudien (412'934 Teilnehmende der UK Biobank, 61'032 Personen in Lifelines und 30'305 Personen in HUNT3).<sup>121</sup> In der UK Biobank war der BMI pro 10 dB  $L_{den}$  um 0.14kg/m<sup>2</sup> (95%-KI: 0.11-0.18) erhöht, der Taillenumfang um 0.27 cm (95%-KI: 0.19-0.35) und die Wahrscheinlichkeit für Adipositas um 6% (95%-KI: 4 bis 8%). In HUNT3 wurden Assoziationen zwischen Strassenlärm und Adipositas bei denjenigen mit einem  $L_{den}$  von mehr als 55 dB beobachtet. Im Gegensatz dazu wurden keine oder negative Assoziationen in der Lifelines-Kohorte festgestellt.

In der Dänischen Nationalen Geburtskohorte wurde bei 74'065 Frauen die Gewichtszunahme während der Schwangerschaft und bei 52'661 Frauen die Gewichts Differenz 18 Monaten nach der Schwangerschaft (postpartale Gewichtsretention) im Zusammenhang mit modelliertem Strassen- und Bahnlärm am Wohnort analysiert.<sup>122</sup> Ein 10 dB(A) höherer Strassenverkehrslärm war mit einem zusätzlichen Anstieg des Gewichts während der Schwangerschaft um 3.8 g/Woche (95%-KI: 2.3 bis 5.3) und einer zusätzlichen postpartalen Gewichtsretention von 0.09 kg (95%-KI: 0.02 bis 0.16) assoziiert, wobei letzteres auf übergewichtige Frauen beschränkt war. Eisenbahnlärm  $\geq 65$  dB war im Vergleich zu  $< 55$  dB mit einem Anstieg des Schwangerschaftsgewichts um 4.5 g/Woche (95%-KI: -2.7 bis 11.6) und einer postpartalen Gewichtsretention von 0.26 kg (95%-KI: -0.09 bis 0.60) verbunden.

### *Schlussfolgerung*

Der Zusammenhang zwischen **Übergewicht** und Verkehrslärmexposition wird zwar grundsätzlich als plausibel erachtet und eine neue Übersichtsarbeit kommt zum Schluss, dass sich

---

<sup>119</sup> Foraster; Eze; Vienneau; u. a. (2018)

<sup>120</sup> An; Wang; Ashrafi; u. a. (2018)

<sup>121</sup> Cai; Zijlema; Sorgjerd; u. a. (2020)

<sup>122</sup> Sorensen; Sorensen; Ketzler; u. a. (2020)

seit der WHO-Richtlinien die Evidenz für einen Zusammenhang mit Strassenverkehrslärm erheblich verbessert hat, insbesondere für eine Zunahme des Taillenumfangs.<sup>123</sup> Dennoch ist die Studienlage immer noch relativ dünn und heterogen, so dass der Zusammenhang mit Lärm zurzeit nur mit grosser Unsicherheit quantifizierbar wäre.

#### e) Krankheitsbilder im Zusammenhang mit der Geburt

Basierend auf acht Studien zu Neugeborenen wurde in den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation<sup>124</sup> die Evidenzqualität für einen Zusammenhang von Strassenlärm mit niedrigem Geburtsgewicht als tief bewertet. Es gab keinen klaren Zusammenhang zwischen Strassenlärm und Frühgeburten. Das Risiko für kleine Neugeborenen (Geburtsgrösse) nahm bei tiefer Evidenzqualität um 9% (95% KI: 6 bis 12%) pro 6 dB Zunahme in der Strassenlärmexposition ( $L_{den}$ ) zu. Zu Bahnlärm gab es keine Studie und zu Fluglärm wurde auf Basis von sechs Studien die Evidenzqualität für einen Zusammenhang als sehr tief bewertet. Zu diesen Krankheitsbildern gibt es keine Daten aus der Schweiz.

Eine Meta-Analyse aller Studien seit der Publikation der WHO Richtlinien kam zum Schluss, dass kein Zusammenhang zwischen dem Strassenlärm und verschiedenen Krankheitsbildern im Kontext mit der Geburt besteht.<sup>125</sup> Die Evidenzqualität für einen fehlenden Effekt war hoch für niedriges Geburtsgewicht, moderat für Frühgeburten und kleine Geburtsgrösse sowie tief für Geburtsgebrechen. Für Fluglärm konnten keine Aussagen gemacht werden und beim Bahnlärm gibt es nur je eine Studie zu Geburtsgewicht und Geburtsgrösse, welche bei tiefer Evidenzqualität keinen Zusammenhang finden. Die Übersichtsarbeit erwähnte je eine Studie zu Fieberkrämpfen und männlicher Fertilität, die beide mit tiefer Evidenzqualität auf einen Zusammenhang mit Strassenlärm hindeuten.

Eine Aktualisierung der systematischen Literaturübersicht der WHO schloss alle vor dem 12. Mai 2019 publizierten Studien ein und berechnete auf der Basis von neun Studien Expositions-Wirkungs-Beziehungen für Strassenlärm und verschiedene Effekte im Zusammenhang mit der Geburt.<sup>126</sup> Das Geburtsgewicht veränderte sich um -8.3 g (95% KI: -20.6 bis +4.1 g) pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ). Keine signifikanten Zusammenhänge wurden beobachtet mit niedrigem Geburtsgewicht (6%; 95% KI: -9 bis 23%), Geburtsgrösse (2%; 95% KI: -14 bis 21%), und Frühgeburten (0%; 95% KI: -21 bis 27%). Die Studienergebnisse waren heterogen. Die Evidenzqualität für einen Zusammenhang mit dem Geburtsgewicht als kontinuierliche Grösse wurde als moderat eingeschätzt und für alle anderen Krankheitsbilder als sehr tief.

Eine Analyse von 174'186 Geburten zwischen 2008 und 2016 um den Flughafen in Los Angeles fand ein 10% (95% KI: 1 bis 20%) erhöhtes Risiko für Frühgeburten bei Müttern, welche einer Fluglärmexposition von mehr als 65 dB ausgesetzt waren.<sup>127</sup>

---

<sup>123</sup> Münzel; Sorensen; Daiber (2021)

<sup>124</sup> WHO (2018)

<sup>125</sup> Clark; Crumpler; Notley (2020)

<sup>126</sup> Dzhambov; Lercher (2019a)

<sup>127</sup> Wing; Larson; Hadda; u. a. (2020)

In einer neuen Studie zu allen Geburten zwischen 2004 und 2016 um einen Flughafen in New Jersey wurde für Frauen mit einer Lärmexposition von mehr als 55 dB ( $L_{den}$ ) ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko für Neugeborene mit niedrigem Geburtsgewicht identifiziert.<sup>128</sup>

### *Schlussfolgerung*

Die Studien zum Einfluss der Lärmexposition auf Krankheitsbilder im Zusammenhang mit der Geburt sind inkonsistent. Vereinzelt sind Zusammenhänge für Frühgeburten und niedriges Geburtsgewicht beobachtet worden. Biologisch ist es grundsätzlich plausibel, dass sich chronischer Stress durch Lärm auf den Fötus auswirken kann. Es fehlen jedoch robuste experimentelle Daten, welche einen solchen Zusammenhang stützen würden. Die Evidenz wird deshalb für die verschiedenen Krankheitsbilder als tief bis moderat erachtet.

### **f) Kognition und Verhalten bei Kindern**

Während die Evidenzqualität für einen Zusammenhang zwischen Strassen- und Bahnlärm mit der kognitiven Entwicklung für Kinder in den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation<sup>129</sup> als sehr tief eingeschätzt wird, wurde sie für Fluglärm als moderat gewertet. Gemäss WHO verspätet sich die Lesefähigkeit und das mündliche Verstehen um ein bis zwei Monate pro 5dB Zunahme der Fluglärmexposition ( $L_{den}$ ). Aus der Schweiz gibt es hierzu keine Daten.

Alle seither publizierten Studien (Mitte 2015 bis März 2019) wurde von Clark et al.<sup>130</sup> evaluiert. Die Evidenzqualität wurde für alle untersuchten kognitiven Parameter (Leseverständnis, Mathematik, Arbeitsgedächtnis, Aufmerksamkeit, Ablenkung, Einschätzung der Kognition durch Erwachsene) im Zusammenhang mit Strassen- und Fluglärm als tief bis sehr tief eingeschätzt. Es ist anzumerken, dass die Publikationen, welche schon bei der WHO Richtlinie diskutiert wurden, nicht in diese Einschätzung einfließen. Zum Bahnlärm gab es keine Studien.

Eine weitere Meta-Analyse<sup>131</sup> evaluierte Ergebnisse zu Verhaltensproblemen bei Kindern im Zusammenhang mit Lärm. Basierend auf sieben Studien zu Strassenlärm, einer Studie zu Bahnlärm und fünf Studien zu Fluglärm wurde die Evidenzqualität für einen Einfluss auf Verhaltensprobleme als tief bis sehr tief eingeschätzt. Eine weitere systematische Literaturübersicht mit einer Meta-Analyse basierend auf drei Studien fand bei 9- bis 17-Jährigen eine Zunahme des Risikos von Hyperaktivität und Unaufmerksamkeit von 11% (95% KI: 4 bis 19%) pro 10 dB Zunahme des Strassenlärms ( $L_{den}$ ) sowie eine Zunahme von allgemeinen Verhaltensproblemen von 9% (95% KI: 2 bis 16%) pro 10 dB Zunahme.

In einer Querschnittsanalyse von 1'710 Kindern im Alter von 10-12 Jahren aus Holland nahm die Häufigkeit von Aufmerksamkeitsdefiziten (ADHS) mit zunehmendem Strassenlärm

---

<sup>128</sup> Argys; Averett; Yang (2020)

<sup>129</sup> WHO (2018)

<sup>130</sup> Clark; Crumpler; Notley (2020)

<sup>131</sup> Sakhvidi; Zare Sakhvidi; Mehrparvar; u. a. (2018)

signifikant ab.<sup>132</sup> Dieses scheinbar paradoxe Resultat könnte ein Zufallsbefund sein oder auf einen Selektionsbias zurückzuführen sein. In einer Untergruppe mit diagnostizierter ADHS gab es eine Tendenz für eine Zunahme von Symptomen mit zunehmendem Strassenlärm.

Bei 5'227 Personen im Alter von mindestens 65 Jahren aus der Chicago Gesundheits- und Altersstudie war die kognitive Leistung mit zunehmendem Umgebungslärm in den fünf vorhergehenden Jahren signifikant reduziert.<sup>133</sup> Dies war vor allem auf einen Abnahme der Wahrnehmungsgeschwindigkeit zurückzuführen. Andere Aspekte der Kognition waren nicht konsistent mit Lärm assoziiert.

### *Schlussfolgerung*

Der Einfluss der Lärmexposition auf die Kognition und Verhaltensproblemen bei Kindern und Jugendlichen ist unklar. In den WHO-Richtlinien wurde die Evidenzqualität für einen Zusammenhang zwischen Kognition bei Kindern und Fluglärm als moderat eingestuft. Auf dieser Basis kommt die europäische Umweltbehörde EEA zum Schluss, dass in Europa (EEA-33) 12'400 Kinder kognitive Einschränkungen aufgrund von Fluglärm haben.<sup>134</sup> Aufgrund der heterogenen Studienlage und der Tatsache, dass es sich bei den meisten Studien um Querschnittsanalysen handelt, wird die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und Verhaltensproblemen als tief eingeschätzt und für Kognition bei Kindern als moderat. In Bezug auf kognitive Leistung bei Erwachsenen oder kognitiven Abbau bei älteren Personen ist die Datenlage sehr dünn und die wissenschaftliche Evidenz deshalb tief.

### **g) Andere Krankheitsbilder**

In den Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation<sup>135</sup> wurden auch **Hörverlust** und **Tinnitus** im Zusammenhang mit Freizeidlärm evaluiert. Dieser Zusammenhang ist für berufliche Exposition ab 80 dB gut etabliert, aber im Kontext von Verkehrslärmabschätzungen nach heutigem Kenntnisstand nicht relevant. Im Zusammenhang mit beruflichem Lärm gibt es auch gewisse Hinweise für ein erhöhtes Risiko von **Akustikus Neurinomen**, einem Tumor des Gehörnervs.<sup>136</sup> Für Strassenlärm wurde in einer dänischen Studie kein solcher Zusammenhang beobachtet.<sup>137</sup>

In einer Metaanalyse wurden acht Studien zu **Krebs** und Verkehrslärm identifiziert,<sup>138</sup> welche zwischen 2014 und 2019 publiziert wurden. Die Evidenzqualität für einen Effekt von Strassenlärm auf verschiedene Arten von Tumoren wurde als tief eingeschätzt. Für Krebssterblichkeit

---

<sup>132</sup> Zijlema; de Kluizenaar; van Kamp; u. a. (2021)

<sup>133</sup> Weuve; D'Souza; Beck; u. a. (2021)

<sup>134</sup> EEA European Environment Agency (2020b)

<sup>135</sup> Clark; Paunovic (2018)

<sup>136</sup> Cao; Zhao; Mulugeta (2019)

<sup>137</sup> Roswall; Stangerup; Caye-Thomasen; u. a. (2017)

<sup>138</sup> Clark; Crumpler; Notley (2020)

wurde ein Zusammenhang mit Strassenlärm mit hoher Evidenzqualität basierend auf zwei Studien ausgeschlossen. Bezüglich des Flug- und Bahnlärms war die Datenbasis gering und sporadische Assoziationen oder fehlende Assoziationen wurden mit tiefer Evidenzqualität bewertet.

In zwei dänischen Kohortenstudien, welche Teil der obigen Meta-Analyse waren, wurden gewisse Hinweise für einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von **Brustkrebs** und Strassenlärm gefunden.<sup>139</sup> In einer Nachfolgestudie konnten keine Zusammenhänge zwischen Strassenlärm und auffälligen Befunden bei der Mammographie ermittelt werden.<sup>140</sup> Jedoch ergab eine dänemarkweite Analyse aller Brustkrebsfälle bei Frauen zwischen 2000 und 2017 einen signifikanten Zusammenhang mit dem Strassen- und Bahnlärm am Wohnort in den vorhergehenden 10 Jahren. Der Zusammenhang war ausgeprägter für Lärm an der leiseren Fassade im Vergleich zur lautesten Fassade. Da sich hinter der leisen Fassade meistens das Schlafzimmer befindet, stehen diese Ergebnisse im Einklang mit der Hypothese, dass Schlafprobleme und daraus resultierende Störungen des Metabolismus und des circadianen Rhythmus ein Risikofaktor für Brustkrebs sein könnten. In einer dänischen Kohorte von 1'243 Patienten mit einem **kolorektalen Tumor** wurde kein Zusammenhang zwischen Strassenlärm am Wohnort und der Überlebenswahrscheinlichkeit beobachtet.<sup>141</sup>

In der oben erwähnten dänischen Kohortenstudie, in der einen Zusammenhang zwischen Strassenlärm und kardiovaskulärer Sterblichkeitsrisiko beobachtet wurde, war das Risiko für **Krebs** und für **Atemwegserkrankungen** nicht mit Strassenlärm assoziiert.<sup>142</sup> In der Schweizer SAPALDIA Studie waren Atemwegserkrankungen vorwiegend mit Lärmbelastigung aber nicht mit modelliertem Strassen-, Bahn- oder Fluglärm assoziiert.<sup>143</sup> In einer dänischen Kohortenstudie von 28'731 Pflegerinnen im Alter von mindestens 44 Jahren, war das Risiko wegen **Asthma** hospitalisiert zu werden nicht mit Strassenlärm am Wohnort assoziiert, wenn die Luftschadstoffexposition mitberücksichtigt wurde.<sup>144</sup> In einer Kohortenstudie bei 4'000 Jugendlichen aus Schweden, welche während ihres Lebens wiederholt zu Asthma befragt wurde, war weder die mütterliche Strassenverkehrslärmexposition während der Schwangerschaft noch die kindliche Exposition konsistent mit dem Auftreten von Asthma assoziiert.<sup>145</sup>

Eine systematische Literaturübersicht hat 32 Studien zum Einfluss des Lärms auf das **Immunsystem** evaluiert.<sup>146</sup> Es wurde geschlossen, dass Lärm das Immunsystem beeinflussen

---

<sup>139</sup> Andersen; Jorgensen; Elsborg; u. a. (2018); Sorensen; Ketzler; Overvad; u. a. (2014)

<sup>140</sup> Roswall; Andersen; von Euler-Chelpin; u. a. (2018)

<sup>141</sup> Roswall; Bidstrup; Raaschou-Nielsen; u. a. (2017)

<sup>142</sup> Thacher; Poulsen; Roswall; u. a. (2020)

<sup>143</sup> Eze; Foraster; Schaffner; u. a. (2018)

<sup>144</sup> Liu; Lim; Pedersen; u. a. (2021)

<sup>145</sup> Wallas; Eriksson; Ogren; u. a. (2020)

<sup>146</sup> Abouee-Mehrizi; Rasoulzadeh; Kazemi; u. a. (2020)

könnte, teilweise indirekt über das Zentralnervensystem, das vaskuläre System oder über Hormonausschüttung. Zudem wurde vermutet, dass Lärm den Zellstress (NADPH Oxidase und reaktive oxidative Spezies, ROS) beeinflusst.

Insgesamt sieben Studien wurden zu **neurodegenerativen Erkrankungen**<sup>147</sup> im Zusammenhang mit Strassenlärm identifiziert.<sup>148</sup> Keine Studien gab es zu Bahn- und Fluglärm. Die Evidenzqualität für einen Zusammenhang wurde für die verschiedenen Krankheitsbilder durchwegs als sehr tief eingeschätzt. In Bezug auf vaskuläre **Demenz** wurde die Evidenzqualität für die Abwesenheit eines Zusammenhangs als tief eingeschätzt (zwei Studien). Eine andere Meta-Analyse identifizierte fünf Studien zu Demenz und erachtete die Datenlage als zu dünn für die Durchführung einer quantitativen Meta-Analyse.<sup>149</sup> Eine neue Studie bei 1'612 amerikanischen Mexikanerinnen und Mexikanern in Kalifornien fand einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Demenz und dem Strassenlärm.<sup>150</sup> Bei der oben erwähnten Altersstudie aus Chicago war Prävalenz von milder kognitiver Beeinträchtigung und Alzheimer um 36% (95%-KI: 15 bis 62%) bzw. 29% (95%-KI: 8 bis 55%) erhöht pro 10 dB Umgebungslärm in fünf vorhergehenden Jahren.<sup>151</sup>

In einer koreanischen Studie wurde bei 1'972 Männer, welche eine Fertilitätsklinik konsultierten, gewisse Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Umgebungslärm und verminderter **Spermienqualität** beobachtet.<sup>152</sup> Aufgrund der selektiven Probandenauswahl erlaubt die Studie aber keine soliden Schlussfolgerungen

### *Schlussfolgerung*

Für die in diesem Kapitel diskutierten Krankheitsbilder, wie z.B. Krebs und neurodegenerative Erkrankungen, gibt es zwar vereinzelte Hinweise. Je nach Krankheitsbild, gibt es auch biologische plausible Hypothesen. Dennoch ist die Evidenz für einen Zusammenhang mit der Verkehrslärmexposition für all diese Krankheitsbilder tief bis sehr tief.

## **5.2.2 Auswahl der Krankheitsbilder**

Die Evidenzeinschätzung der WHO-Richtlinien ist mittlerweile veraltet, weil nur Studien bis 2015 berücksichtigt wurden. In diesem Bericht wurden deshalb bei der Auswahl der Krankheitsbilder die neuen Forschungsergebnisse ab 2015 ebenfalls mitberücksichtigt. Für jedes Krankheitsbild wurde die Evidenzqualität gemäss den Kriterien der WHO evaluiert. Krankheitsbilder mit hoher Evidenz für einen Zusammenhang werden in dieser Studie ausgewählt. Für hohe Evidenzqualität muss der pathophysiologische Wirkungsmechanismus zwischen der

---

<sup>147</sup> Neurodegenerative Erkrankungen sind verbunden mit einer schrittweisen Degeneration von Nervenzellen (z.B. Alzheimer oder Parkinson).

<sup>148</sup> Clark; Crumpler; Notley (2020)

<sup>149</sup> Hegewald; Schubert; Freiberg; u. a. (2020)

<sup>150</sup> Yu Y.; Rose E.; Kimberly P.; u. a. (2020)

<sup>151</sup> Weuve; D'Souza; Beck; u. a. (2021)

<sup>152</sup> Choe; Kim; Im; u. a. (2020)

Lärmbelastung und dem Krankheitsbild plausibel sein, und ein Zusammenhang mit einem erhöhten Erkrankungs- oder Sterberisiko muss in mindestens zwei prospektiven Kohortenstudien, welche ein geringes Bias-Risiko aufweisen, unabhängig voneinander nachgewiesen worden sein.

#### a) Ausgewählte Krankheitsbilder

Die Evidenz für Auswirkungen des Verkehrslärms auf Herz-Kreislaufkrankungen ist hoch. Diesbezügliche Assoziationen wurden mehrfach nachgewiesen und haben eine hohe pathophysiologische Plausibilität. Bisher sind vor allem Zusammenhänge mit ischämischen Herzkrankungen, Bluthochdruck, Herzinsuffizienz und (ischämische) Schlaganfällen beobachtet worden. Diese machen rund 70-80% aller kardiovaskulären Erkrankungen aus. Insbesondere für die Sterblichkeit gibt es einige Studien, welche den Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und allen kardiovaskulären Todesursachen gesamthaft untersucht haben. Aus diesem Grund werden alle **kardiovaskulären Erkrankungen** für die Herleitung der Gesundheitsauswirkungen berücksichtigt, analog wie das bisher für die Bestimmung der Kosten durch die Luftbelastung gemacht wurde.

Physiologisch sind Auswirkungen von chronischer Lärmbelastung auf den Metabolismus und die mentale Gesundheit plausibel. Von internationalen und Schweizer prospektiven Kohorten gibt es mittlerweile hohe Evidenz für einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von **Diabetes** und Verkehrslärm. Ähnlich ist die Situation für **Depressionen**. Neue internationale und Schweizer Daten von prospektiven Kohorten finden substantielle Hinweise, dass sich das Risiko für Depressionen im Zusammenhang mit der Strassen- oder Fluglärmmexposition am Wohnort erhöht. Aus diesem Grund werden Diabetes und Depressionen bei den Gesundheitsrisikoabschätzungen berücksichtigt.

Damit werden im Vergleich zur früheren Abschätzung alle kardiovaskulären Erkrankungen berücksichtigt anstatt nur spezifischer Diagnosen (ischämische Herzkrankheiten, Bluthochdruck bedingte Krankheiten und Schlaganfälle). Diese Verallgemeinerung ist biologisch plausibel und konsistent mit dem Vorgehen bei der Abschätzung der Gesundheitseffekte von Luftschadstoffen. Diabetes und Depressionen wurden bisher nicht berücksichtigt. Die diesbezügliche Studienlage hat sich aber in den letzten 10 Jahren stark verbessert.

#### b) Nicht ausgewählte Krankheitsbilder

Der Zusammenhang zwischen **Übergewicht** und Verkehrslärmmexposition wird zwar als biologisch plausibel erachtet, ist zurzeit aber nur mit grosser Unsicherheit quantifizierbar. Zudem liegt dieses Krankheitsbild zumindest teilweise auf dem Erkrankungsweg zu Diabetes, so dass die Gefahr einer Doppelzählung besteht.

Weniger klar, obwohl auch ein diesbezüglicher Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden kann, ist der Einfluss von Lärm auf Krankheitsbilder im Zusammenhang mit der **Geburt** und **kognitiven Funktionen**. Einem konservativen Ansatz folgend werden diese Krankheitsbilder

nicht berücksichtigt. Für **andere Krankheitsbilder** wie Krebs und neurodegenerative Erkrankungen ist die Evidenz für einen Zusammenhang mit der Verkehrslärmexposition gering. Sie werden daher ebenfalls nicht berücksichtigt.

### 5.2.3 Herleitung der Expositions-Wirkungs-Beziehungen

#### a) Methodische Erläuterungen

Bei der Herleitung der Expositions-Wirkungs-Beziehung ergeben sich vier Hauptherausforderungen.

1. Übertragbarkeit von ausländischen Studienergebnissen auf die Schweiz: Mehr noch als bei anderen Umweltexpositionen gibt es beim Lärm Unsicherheiten in der Übertragbarkeit von ausländischen Studienergebnissen auf die Schweizer Verhältnisse. Expositions-Wirkungs-Beziehungen in grossen epidemiologischen Studien zu chronischen Erkrankungen beruhen auf der modellierten Lärmexposition an der Hausfassade (typischerweise den Maximalwert). Gesundheitlich relevant ist aber der Pegel im Innenraum. Die Übertragbarkeit von ausländischen Studienergebnisse ist daher eingeschränkt, weil sich die Lärmcharakteristik (z.B. Regelung für Nachtlärm, Fahrzeugflotte, Strassenbeläge etc.) oder die Dämpfungseigenschaften von Wohngebäuden unterscheiden. Zudem ist zu erwarten, dass auch soziokulturelle Unterschiede eine Rolle spielen (z.B. im Hinblick auf mögliche Interaktionen zwischen der Lärmbelästigung, Lärmexposition und den gesundheitlichen Folgen). Es gibt auch Unsicherheiten, wenn die im Ausland untersuchten Populationen ein anderes Gesundheits-Risikoprofil aufweisen als die Schweizer Bevölkerung. Weiter wurden bisher die Unterschiede in der Lärmmodellierung zwischen verschiedenen Ländern bzw. Studien nie systematisch aufgearbeitet, was ein weiterer Unsicherheitsfaktor bei der Übertragung von Expositions-Wirkungs-Beziehungen darstellt. Die Lärmmodellierungen in den epidemiologischen Studien von SiRENE beruhen auf sonBASE und sind damit konsistent mit der Lärmberechnung in der vorliegenden Studie. In SiRENE wurde für die epidemiologischen Analysen jeweils der Maximalwert pro Wohnung verwendet, was ebenfalls konsistent ist mit dem hier vorgeschlagenen Vorgehen. In anderen ausländischen Studien wurden zum Teil auch andere Werte verwendet, wie zum Beispiel der Maximalwert pro Fassade oder Lärmkarten. Aus diesem Grund haben Studiendaten aus der Schweiz die höchste Priorität bei der Herleitung der Expositions-Wirkungs-Beziehung.
2. Statistische Unsicherheiten der Schweizer Daten: Aus obigen Erläuterungen wäre es daher wünschbar für die Bestimmung der Expositions-Wirkungs-Beziehung nur Schweizer Daten heranzuziehen. In Bezug auf kardiovaskuläre Sterblichkeit ist dies möglich, da im Rahmen der Schweizer Nationalen Kohortenstudie (SNC) präzise Expositions-Wirkungs-Beziehungen hergeleitet wurden. Dabei wurden alle 250'000 kardiovaskulären Todesfälle analysiert, welche in der Schweiz zwischen 2000 und 2015 bei Erwachsenen im Alter ab 30 Jahre aufgetreten sind. Diese hohen Fallzahlen ergeben präzise Expositions-Wirkungs-Beziehungen. Die Schweizer Daten zu Diabetes und Depressionen beruhen jedoch

nur auf einigen Tausend Studienteilnehmenden der SAPALDIA-Studie. Die Unsicherheiten (95% Konfidenzintervalle) in den Expositions-Wirkungs-Beziehungen sind dadurch gross. Darum werden diese Schweizer Daten zu Diabetes und Depressionen mittels Meta-Analysen mit den vorhanden ausländischen Daten kombiniert, was deutlich präzisere Expositions-Wirkungs-Beziehungen ergibt.

3. Verkehrslärmspezifische Expositions-Wirkungs-Beziehungen: Bei den bisherigen Studien zu den externen Kosten des Verkehrs wurde für die Berechnung der lärmbedingten Gesundheitsauswirkungen für alle drei Verkehrsträger die gleiche Expositions-Wirkungs-Beziehung verwendet. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich die Expositions-Wirkungs-Beziehungen für ein bestimmtes Krankheitsbild innerhalb der verschiedenen Verkehrsträger unterscheiden:

- Zum Beispiel gibt es aus SiRENE Hinweise, dass die Lärmcharakteristik wie der Tongehalt und die Impulshaftigkeit eine modifizierende Rolle spielen.<sup>153</sup>
- Zudem ist der Tagesverlauf der Lärmexposition je nach Lärmquelle unterschiedlich (z.B. Nachtflugverbot), was in Bezug auf den 24-Stunden  $L_{den}$ -Wert zu anderen Expositions-Wirkungs-Beziehungen führen kann.

Auch bei den Evidenzbewertungen der WHO und nachfolgender Meta-Analysen wurden teilweise für verschiedene Verkehrsträger unterschiedliche Expositions-Wirkungs-Beziehungen gefunden. Teilweise unterscheidet sich die Evidenzbewertung für die verschiedenen Verkehrsträger sogar deutlich. Dies reflektiert in erster Linie die Verfügbarkeit. Jedoch ist es weniger plausibel, dass bestimmte Krankheitsbilder nur von bestimmten Lärmarten verursacht werden, wenn die Höhe und Dauer der Exposition vergleichbar sind. Insofern kann bei dünner Studienlage das Fehlen von Evidenz nicht als Evidenz für die Abwesenheit eines Effekts interpretiert werden. Diese Problematik zeigt sich ausgeprägt beim Bahnlärm. Die WHO schätzt dort die Evidenz für die *Abwesenheit* eines Zusammenhanges mit Blutdruck als tief ein und mit Diabetes als moderat. Diese Einschätzung rührt daher, dass jeweils eine einzige Kohortenstudie aus Dänemark zu Bahnlärm vorhanden war, welche keine Zusammenhänge fand. Diese war prospektiv und von guter Qualität, hatte aber nur einen geringen Anteil von Bahnlärm-exponierten Personen eingeschlossen. Insofern erstaunt es nicht, dass keine Zusammenhänge gefunden wurden. In der SAPALDIA-Studie war die Exposition gegenüber Bahnlärm höher und der Zusammenhang zwischen arterieller Steifheit, einem klinischen Marker für Bluthochdruck, war für Bahnlärm ausgeprägter als für Strassen- und Fluglärm.<sup>154</sup>

Für kardiovaskuläre Erkrankungen ist die Datenlage gut und es werden nach Verkehrsträgern differenzierte Belastungs-Wirkungs-Beziehungen verwendet. Für Diabetes und Depressionen werden zwar auch unterschiedliche Expositions-Wirkungs-Beziehungen beobachtet, aber die Datenlage ist zum Teil sehr dünn und zufällige Studienergebnisse hätten einen grossen Einfluss auf die jeweiligen Schätzer (v.a. Bahn- und Fluglärm). Auf

---

<sup>153</sup> Rösli; Wunderli.; Brink; u. a. (2019)

<sup>154</sup> Foraster; Eze; Schaffner; u. a. (2017a)

der Basis biologisch-medizinischer Überlegungen wird daher bei der Herleitung von quellen-spezifischen Expositions-Wirkungs-Beziehungen bei Krankheitsbildern und Lärmquellen mit geringer Datenlage die Expositions-Wirkungs-Beziehung über alle Lärmquellen verwendet, wie dies bisher generell gemacht wurde.

4. **Schwellenwert:** In epidemiologischen Studien wird die Expositions-Wirkungs-Beziehung häufig als Risikozunahme pro 10 dB  $L_{den}$  quantifiziert. In diesem Fall wird kein expliziter Schwellenwert angenommen, sondern implizit liegt die Effektschwelle bei den tiefsten modellierten Lärmwerten bzw. einem angenommenen Hintergrundgeräusch. Bei der Nationalen Kohortenstudie lagen die tiefsten Werte für Strassenlärm bei einem  $L_{den}$  von 35 dB(A) und für Bahn- und Fluglärm bei einem  $L_{den}$  von 30 dB(A). Bei älteren Studien liegt diese Schwelle aufgrund der geringeren Sensitivität der Lärmmodelle teilweise auch höher. Das führte dazu, dass beispielsweise bei den WHO Richtlinien unterschiedliche Schwellenwerte für den  $L_{den}$  vorgeschlagen wurden: 45 dB (Fluglärm), 53 dB Strassenlärm und 54 dB (Bahnlärm) (Nachtlärm: 40-45 dB). Es ist zu betonen, dass es sich dabei um die Werte handelt, bei denen das akzeptierbare Risiko überschritten wurde. Zum Beispiel war in Bezug auf Belästigung das akzeptierbare Risiko dort wo 10% der Bevölkerung stark durch den Lärm gestört war, und bei den ischämischen Herzerkrankungen wurde ein 5% erhöhtes Erkrankungsrisiko als akzeptierbar erachtet. Es wurden also auch unterhalb der WHO-Schwellenwerte lärmbedingte Gesundheitseffekte beobachtet. Bisher konnte weder für kardiovaskuläre Erkrankungen noch für Diabetes und Depressionen ein Schwellenwert bestimmt werden, unterhalb dessen mit grosser Wahrscheinlichkeit keine gesundheitlichen Wirkungen zu erwarten sind. Kategoriale und nicht-parametrische Analysen finden in den meisten Studien relativ lineare Expositions-Wirkungs-Beziehungen. Auf Basis dieser Ausführungen gibt es eigentlich keinen Grund, einen Schwellenwert für die Expositions-Wirkungs-Beziehung anzuwenden. Dennoch ist es wenig plausibel, dass bei Lärmexpositionen, die sich kaum vom Hintergrundgeräusch in einer ruhigen Wohnumgebung abheben, gesundheitliche Effekte zu erwarten sind. Deshalb wird der Schwellenwert bei einem Pegel gesetzt, der deutlich wahrnehmbar höher liegt als eine ruhige Hintergrundsituation. Für die durchschnittliche Lärmexposition ist dies bei einem  $L_{den}$  von 45 dB(A) der Fall.

#### **b) Herz-Kreislaufkrankungen**

In der Schweizerischen Nationalen Kohortenstudie ist der Zusammenhang zwischen kardiovaskulärer Sterblichkeit und Strassen-, Bahn- und Fluglärm quantifiziert.<sup>155</sup> Entsprechend werden diese Expositions-Wirkungs-Beziehungen verwendet, um die Sterbefälle für alle kardiovaskulären Diagnosen gesamthaft zu berechnen. Die Zusammenhänge sind relativ linear ohne erkennbaren Schwellenwert. Am stärksten ausgeprägt ist der Zusammenhang mit Strassenlärm, gefolgt von Bahnlärm. Am wenigsten stark ist der Zusammenhang mit Fluglärm. Das

---

<sup>155</sup> Vienneau; Saucy; Schäffer; u. a. (2021)

könnte daran liegen, dass in der Schweiz ein Nachtflugverbot gilt und der Nachtlärm als besonders kritisch eingeschätzt wird.<sup>156</sup> Der Zusammenhang war bei Strassen- und Bahnlärm stärker bei Männern, während beim Fluglärm Frauen tendenziell stärker betroffen waren. Sehr ausgeprägt war die Veränderung des relativen Risikos mit dem Alter. Je älter desto kleiner das relative Risiko lärmbedingt einen Herz-/Kreislauftod zu erleiden (siehe Abbildung 5-5).<sup>157</sup>

**Abbildung 5-5: Zusammenhang zwischen kardiovaskulärer Sterblichkeit mit Strassen-, Bahn- und Fluglärm in der Schweizerischen Nationalen Kohortenstudie für drei Altersgruppen von Vienneau et al, 2021. Dargestellt ist die Zunahme des relativen Risikos pro 10 dB L<sub>den</sub> (inkl. 95% KI)**

Quelle	Altersgruppe (Jahre)			p-Trend <sup>1)</sup>
	30-64	65-79	80+	
Strasse	8.6% (7.3 bis 9.9%)	2.7% (2.0 bis 3.4%)	0.8% (0.0 bis 1.6%)	<0.0001
Bahn	2.4% (1.5 bis 3.3%)	1.7% (1.1 bis 2.2%)	0.4% (-0.2 bis 1.0%)	0.0001
Flug	1.8% (0.1 bis 3.5%)	0.4% (-0.6 bis 1.4%)	-0.5% (-1.7 bis 0.7%)	0.031

<sup>1)</sup> p-Trend ist ein Mass für die statistische Wahrscheinlichkeit, dass die Altersunterschiede zufällig sind.

Altersbedingte Veränderungen der relativen Risiken haben einen grossen Einfluss bei der Ermittlung der verlorenen Lebensjahre, da die Lebenserwartung in die Berechnungen einfliesst. Aus diesem Grund werden für die Berechnungen altersstratifizierte relative Risiken verwendet wie in Abbildung 5-5 dargestellt. Bei den über 80-Jährigen ist kein Zusammenhang mit Fluglärm (bzw. ein statistisch nicht signifikantes reduziertes Risiko) beobachtet worden. Entsprechend wird für diese Altersgruppe keine Fluglärmwirkungen angenommen.

Theoretisch könnte man die Effektschätzer zusätzlich nach Geschlecht stratifizieren. Dies würde jedoch zu deutlich grösseren Konfidenzintervallen führen und der diesbezügliche Einfluss auf die Berechnung der verlorenen Lebensjahre ist von geringerer Bedeutung als der Alterseffekt. Darum wird dies nicht umgesetzt.

Zur Inzidenz von kardiovaskulären Erkrankungen gibt es im Gegensatz zur Sterblichkeit keine Schweizer Daten. In der internationalen epidemiologischen Literatur wurden die Expositions-Wirkungs-Beziehungen in erster Linie diagnosespezifisch hergeleitet und kaum je für alle kardiovaskulären Erkrankungen gemeinsam. Entsprechend gibt es dazu auch keine Meta-Analyse.

Für die Inzidenz von ischämischen Herzerkrankungen liegt eine aktuelle Meta-Analyse zu allen drei Verkehrsträgern vor.<sup>158</sup> Für Bluthochdruck, Herzinsuffizienz und Schlaganfälle ist dies nicht der Fall. Die vorhandenen Meta-Analysen sind heterogen und haben teilweise nur Studien zu Strassenlärm berücksichtigt oder fatale und nicht fatale Fälle gemischt. Grundsätzlich gibt es aus diesen Übersichtsarbeiten keine Hinweise, dass sich die Expositions-Wirkungs-

<sup>156</sup> Münzel; Kroeller-Schon; Oelze; u. a. (2020)

<sup>157</sup> Man beachte, dass das Risiko für kardiovaskuläre Sterblichkeit mit dem Alter stark zunimmt. Das bedeutet, dass in absoluten Zahlen, lärmbedingte kardiovaskuläre Todesfälle generell zunehmen, auch wenn die relativen Risiken abnehmen (Vienneau; Saucy; Schäffer; u. a. (2021))

<sup>158</sup> Vienneau; Eze; Probst-Hensch; u. a. (2019)

Beziehung für fatale und nicht-fatale kardiovaskuläre Fälle unterscheiden. So nahm in einer Meta-Analyse zu ischämischen Herzerkrankungen das Risiko für Sterblichkeit um 5% (95% KI: 1 bis 10%) pro 10 dB ( $L_{den}$ ) zu und das Risiko für nicht fatale Erkrankungen (Inzidenz) um 7% (5 bis 9%) zu.<sup>159</sup> Unter der Annahme der gleichen Expositions-Wirkungs-Beziehung für fatale und nicht-fatale Fälle wird daher die Expositions-Wirkungs-Beziehung der Nationalen Kohortenstudie für die Morbidität von kardiovaskulären Erkrankungen auch für nichttödliche Erkrankungen herangezogen. Diese Generalisierung der Expositions-Wirkungs-Beziehung beinhaltet zwar eine gewisse Unsicherheit. Dafür handelt es sich um Schweizer Daten und die Unsicherheit bei der Übertragung von internationalen Daten wird minimiert.

### c) Diabetes

Die neueste Meta-Analyse zum Zusammenhang zwischen Diabetes vom Typ 2 und Verkehrslärm hat alle publizierten Studien bis Februar 2019 eingeschlossen.<sup>160</sup> Gemittelt über alle Verkehrsquellen nimmt das Erkrankungsrisiko um 8% (95%-KI: 2 bis 15%) pro 10 dB  $L_{den}$  zu. Seither ist noch eine grosse prospektive Kohortenstudie aus Toronto<sup>161</sup> zu Strassenverkehrslärm publiziert worden, welche eine ähnliche Expositions-Wirkungs-Beziehung findet. Für die Bestimmung der Expositions-Wirkungs-Beziehung wird deshalb eine neue Meta-Analyse inklusive der kanadischen Studie durchgeführt. Als Schätzmethode wird angesichts der grossen Heterogenität die Methodik zufälliger Effekte (random effects) verwendet. Nicht berücksichtigt wird eine neue dänische Studie zu Schwangerschaftsdiabetes, da diese Resultate nicht unbedingt als repräsentativ für alle Arten von Typ 2 Diabetes Erkrankungen gelten kann. Auf der Basis von allen verfügbaren Studien nimmt das Diabetes-Erkrankungsrisiko statistisch signifikant um 9% pro 10 dB Strassenlärm ( $L_{den}$ ) zu (Abbildung 5-6). Für Flug- und Bahnlärm gibt es weniger Studien. Für Fluglärm nimmt das Risiko statistisch nicht signifikant um 20% (95%-KI: -12 bis 63%) zu. Für Bahnlärm wurde in den zwei vorhandenen Studien im Rahmen der Unsicherheit kein erhöhtes Risiko beobachtet. Wie oben erläutert, gibt es grundsätzlich keine wissenschaftlich soliden Argumente, dass Bahn- und Fluglärm nicht mit Diabetes assoziiert sein sollten, da grundsätzlich die gleichen biologischen Prozesse involviert sind wie beim Strassenlärm. Angesichts der grossen Unterschiede für die drei Verkehrsträger, welche zumindest teilweise durch die dünne Studienlage beim Flug- und Bahnlärm bedingt sind, wird für alle drei Verkehrsträger die gleiche Expositions-Wirkungs-Beziehung verwendet. Der Zusammenhang zwischen Lärm und Diabetes begründet sich mit den konsistenten Ergebnissen von mehreren prospektiven Studien zu Strassenlärm.

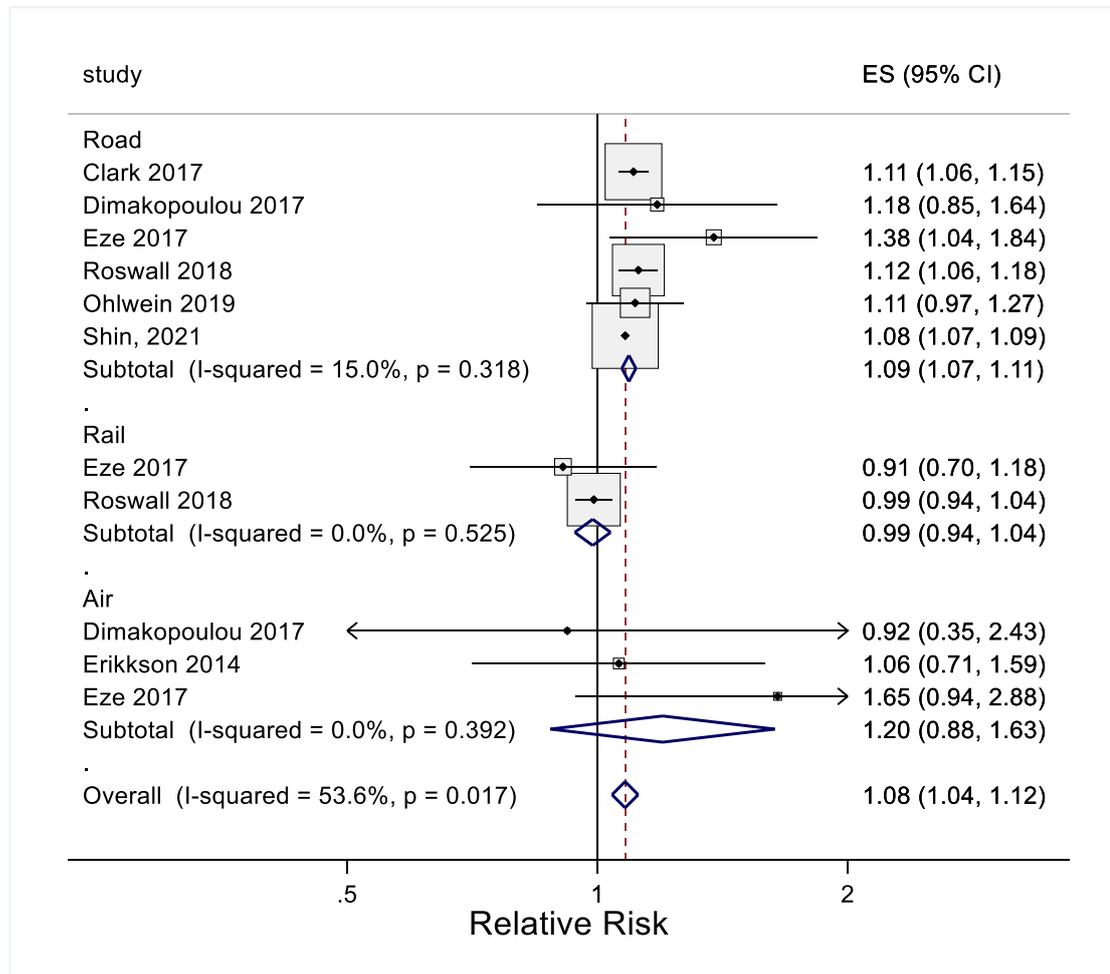
---

<sup>159</sup> Vienneau; Schindler; Perez; u. a. (2015)

<sup>160</sup> Vienneau; Eze; Probst-Hensch; u. a. (2019)

<sup>161</sup> Shin; Bai; Oiamo; u. a. (2020)

**Abbildung 5-6: Zusammenhang zwischen Diabetes vom Typ 2 und Strassen-, Flug- und Bahnlärm auf der Basis der bis Juli 2021 publizierten Studien**



ES (95% CI) entspricht dem Effektschätzer ausgedrückt als relatives Risiko (inklusive 95%-Konfidenzintervall, auch dargestellt mit den horizontalen schwarzen Linien). Die kleinen schwarzen Rauten entsprechen dem Punktschätzer; die Grösse der grauen Kästen ist proportional zur Gewichtung bei der Berechnung des mittleren Effektschätzers; der Mittelpunkt der blauen Rauten sind die mittleren Effektschätzer pro Verkehrsquelle bzw. «Overall» und die Ecken links und rechts markieren das 95%-Konfidenzintervall.

#### d) Depressionen

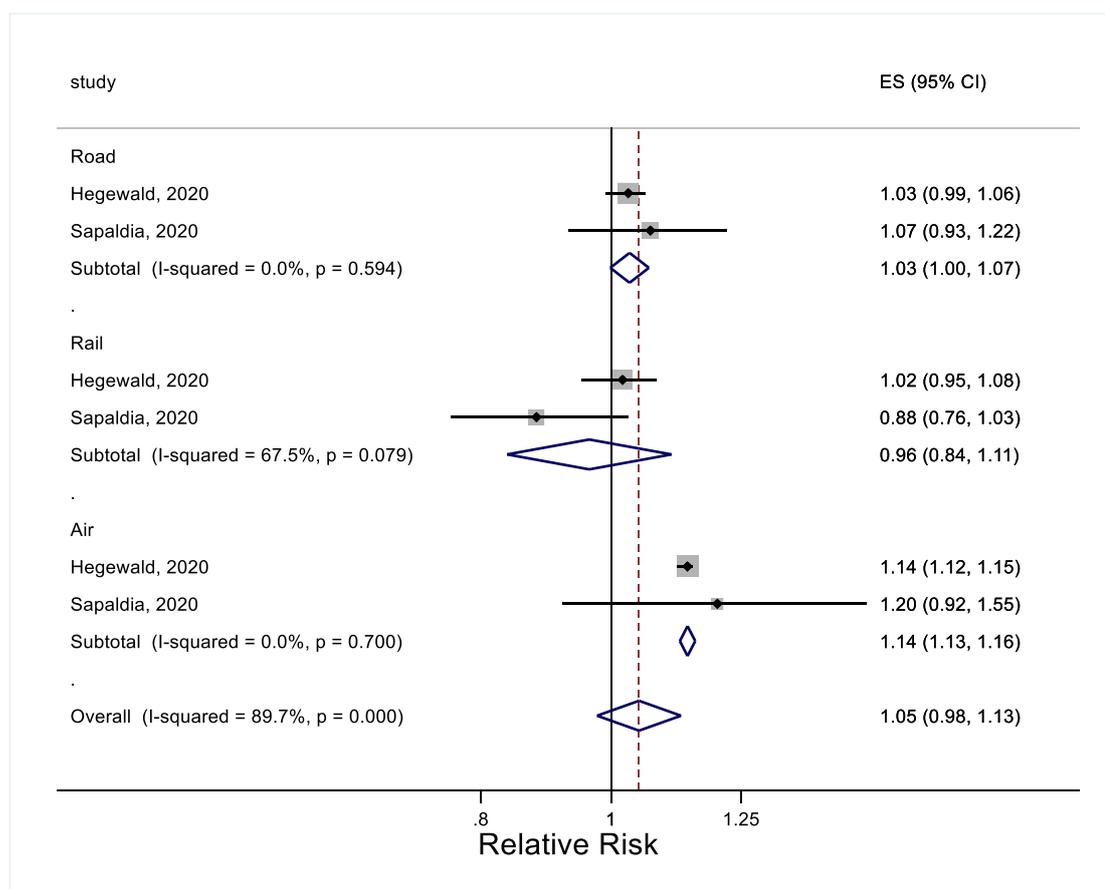
Für Depressionen im Zusammenhang mit Verkehrslärm liegt eine neue Meta-Analyse vor, welche alle Studien bis 11. Dezember 2019 miteingeschlossen hat.<sup>162</sup> Damit sind praktisch alle neuen Studien berücksichtigt. Nicht berücksichtigt, sind jedoch die Ergebnisse der Schweizer SAPALDIA Studie, welche erst 2020 publiziert wurde.<sup>163</sup> Da es sich um Schweizer Daten und um eine für die Evidenzbeurteilung wichtige prospektive Kohortenstudie handelt, wird sie für die Herleitung des Effektschätzers zusammen mit der neuesten Meta-Analyse berücksichtigt.

<sup>162</sup> Hegewald; Schubert; Freiberg; u. a. (2020)

<sup>163</sup> Eze; Foraster; Schaffner; u. a. (2020)

Dabei werden für jede Verkehrsquelle die Effektschätzer der beiden Datenquellen meta-analytisch kombiniert. Das heisst, es wird ein mittlerer Effektschätzer, gewichtet für die jeweiligen Unsicherheiten mit der Methode der zufälligen Effekte, berechnet. Die Schweizer Punktschätzer der Expositions-Wirkungs-Beziehung stimmen sehr gut mit den internationalen Ergebnissen überein, auch wenn das Konfidenzintervall in den Schweizer Daten aufgrund der kleineren Fallzahlen grösser ist (Abbildung 5-7). Am stärksten ist der Zusammenhang mit Fluglärm. Der meta-analytische Effektschätzer von Hegewald et al. (2020) ist jedoch massgeblich von einer Fall-Kontrollstudie und nicht von einer prospektiven Kohortenstudie beeinflusst worden. Es ist zu beachten, dass dieses Studiendesign unzuverlässiger ist als prospektive Kohortenstudien, auch wenn das Ergebnis auf Grund der hohen Fallzahlen statistisch hoch-signifikant ausfällt. Für Strassenlärm ergibt sich aus den SAPALDIA-Ergebnissen und den Resultaten von Hegewald et al. (2000) eine Zunahme des Erkrankungsrisikos um 3% (95%-KI: 0% bis 7%). Für

**Abbildung 5-7: Zusammenhang zwischen Depression und Strassen-, Flug- und Bahnlärm auf der Basis der neuesten Meta-Analyse von Hegewald et al (2020) und der Schweizer SAPALDIA-Studie.**



ES (95% CI) entspricht dem Effektschätzer ausgedrückt als relatives Risiko (inklusive 95%-Konfidenzintervall, auch dargestellt mit den horizontalen schwarzen Linien). Die kleinen schwarzen Rauten entsprechen dem Punktschätzer; die Grösse der grauen Kästen ist proportional zur Gewichtung bei der Berechnung des mittleren Effektschätzers; der Mittelpunkt der blauen Rauten sind die mittleren Effektschätzer pro Verkehrsquelle bzw. «Overall» und die Ecken links und rechts markieren das 95%-Konfidenzintervall.

Bahnlärm wird basierend auf einer sehr dünnen Datenlage, kein Zusammenhang beobachtet. Wie für Diabetes wird die Studienlage für die einzelnen Verkehrsträger als zu dürrig eingeschätzt, um quellenspezifischen Expositions-Wirkungs-Beziehungen herzuleiten. Aus diesem Grund wird für alle drei Lärmarten der mittlere Effektschätzer über alle Verkehrsquellen verwendet (5%, Unsicherheitsbereich: 0 bis 13%). Das untere Konfidenzintervall wird beim Nullwert zensiert.

#### 5.2.4 Verwendete Expositions-Wirkungs-Beziehungen

Abbildung 5-8 gibt einen Überblick über die hergeleiteten Expositions-Wirkungs-Beziehungen (inklusive Unsicherheitsbereich) und die entsprechenden Datenquellen für die verschiedenen Krankheitsbilder und Verkehrsträger.

**Abbildung 5-8: Expositions-Wirkungs-Beziehungen für die verschiedenen Krankheitsbilder: Zunahme des Erkrankungsrisikos pro 10 dB(A) Zunahme des  $L_{den}$  (in Klammer ist der Unsicherheitsbereich angegeben)**

Krankheitsbild	Altersgruppe	ICD-10	Strassenlärm	Bahnlärm	Fluglärm	Quelle
kardiovaskuläre Erkrankungen und Todesfälle	≥18 Jahre bis <65 Jahre	I00-I99	8.6% (7.3% bis 9.9%)	2.4% (1.5% bis 3.3%)	1.8% (0.1% bis 3.5%)	SNC-SIRENE
	≥65 Jahre bis <80 Jahre		2.7% (2.0% bis 3.4%)	1.7% (1.1% bis 2.2%)	0.4% (0% bis 1.4%) <sup>1)</sup>	SNC-SIRENE
	≥80 Jahre	I00-I99	0.8% (0.0% bis 1.6%)	0.4% (0% bis 1.0%) <sup>1)</sup>	0% (0% bis 0.7%) <sup>2)</sup>	SNC-SIRENE
Diabetes Typ 2	≥18 Jahre	E11	8.0% (4.1% - 11.9%)	8.0% (4.1% - 11.9%)	8.0% (4.1% - 11.9%)	Vienneau, 2019 und Shin et al, 2021
Depression	≥18 Jahre	F32-F33	4.9% (0% bis 12.7%) <sup>1)</sup>	4.9% (0% bis 12.7%) <sup>1)</sup>	4.9% (0% bis 12.7%) <sup>1)</sup>	Hegewald, 2020 und Sapaldia

<sup>1)</sup> Für die weitere Berechnungen wurde die untere Grenze des Konfidenzintervalls auf den Wert 0 gesetzt, da protektive Effekte des Lärms nicht plausibel sind.

<sup>2)</sup> In altersstratifizierten Modellen wurde für über 80-Jährige kein Zusammenhang beobachtet. Bei Sensitivitätsberechnungen wird berücksichtigt, dass das obere Konfidenzintervall in dieser Altersgruppe bei 0.7% liegt.

SNC = Schweizerische Nationale Kohortenstudie (Vienneau et al, 2021)

Für kardiovaskuläre Erkrankungen und Sterblichkeit variieren die altersspezifischen Effektschätzer für Strassenlärm zwischen 0.8 und 8.6%, für Bahnlärm zwischen 0.4 und 2.4% und für Fluglärm zwischen 0.0 und 1.8% pro 10 dB Zunahme des  $L_{den}$ . Sowohl für **Depressionen** wie auch für **Diabetes** erlaubt die Studienlage nicht, quellenspezifische Effektschätzer zu verwenden. Einerseits wären solche Schätzer angesichts der dünneren Studienlage mit grosser Unsicherheit behaftet. Andererseits haben die wenigsten Studien altersspezifische Auswertungen vorgenommen. Für Diabetes beträgt der Effektschätzer für alle Verkehrsträger 8.0% pro 10 dB  $L_{den}$  und für Depressionen 4.9%. Grundsätzlich werden die Effektschätzer von

Studien bei Erwachsenen für die Berechnung der Gesundheitsauswirkungen bei der erwachsenen Bevölkerung ab 18 Jahren herangezogen, auch wenn unter Umständen in den ursprünglichen Studien andere Einschlusskriterien für das Alter verwendet wurden. Zumindest für kardiovaskuläre Sterblichkeit gibt es Hinweise, dass das relative Risiko mit abnehmendem Alter zunimmt, auch wenn das absolute Risiko bei den unter 30-Jährigen aufgrund des geringen Basiserkrankungsrisiko praktisch nicht ins Gewicht fällt.

### 5.2.5 Krankheitshäufigkeiten

Die beobachteten Krankheitshäufigkeiten fliessen in die Berechnungen der Gesundheitsauswirkungen ein. Die Hospitalisationsdaten für kardiovaskuläre Erkrankungen (ICD-10: I00-I99), Diabetes (ICD 10: E11) und für Depressionen (ICD-10: F32-F33) stammen von der Spitalstatistik 2015<sup>164</sup> des Bundesamts für Statistik. Die Anzahl Spitaltage ergeben sich aus der Multiplikation der Anzahl Hospitalisationen pro Diagnosecode mit der mittleren Aufenthaltsdauer (Abbildung 5-9).

Die Anzahl kardiovaskulären Todesfälle entsprechen dem Mittelwert von 2014-2018 (letzte 5 verfügbaren Jahre). Für die Abschätzung der lärmbedingten Todesfälle bei Erwerbstätigen wurde die geschlechtsspezifischen Erwerbsquoten für jedes Lebensjahr mit der Anzahl beobachteter Todesfälle multipliziert und für die Gesamtzahl summiert. Man beachte, dass die Erwerbsquote oberhalb von 65 Jahren nicht null ist und daher auch dort noch kardiovaskuläre Todesfälle bei Erwerbstätigen auftreten.

Abbildung 5-9: Überblick über die beobachteten Anzahl Krankheits- und Todesfälle

Krankheitsbild	ICD Code	Krankheitsbild	alle Altersgruppen	≥18 Jahre	18-64 Jahre	65-79 Jahre	≥80 Jahre
Alle kardiovaskulären Erkrankungen	I00-I99	Hospitalisierungen	152'139	151'191	46'003	58'772	46'416
	I00-I99	Spitaltage	1'329'805	1'321'519	402'100	513'710	405'709
Alle kardiovaskulären Todesfälle	I00-I99	Todesfälle	20'983	20'974	1'370	3'927	15'678
kardiovaskuläre Todesfälle Erwerbstätige	I00-I99	Todesfälle	1'545	1'545	1'054	309	182
Diabetes Typ 2	E11	Hospitalisierungen	4'668	4'288	1'860	1'517	911
	E11	Spitaltage	55'656	51'128	22'171	18'093	10'864
Depression	F32-F33	Hospitalisierungen	23'083	22'150	17'856	3'205	1'089
	F32-F33	Spitaltage	790'175	758'239	611'252	109'707	37'280

Hospitalisationen und Spitaltage: Daten für das Jahr 2015. Todesfälle: Durchschnitt der Jahre 2014 – 2018.

<sup>164</sup> Es wird das Jahr 2015 verwendet, damit in allen Bereichen der externen Effekte von denselben Zahlen ausgegangen wird, so dass konsistente Ergebnisse resultieren. Mit der Aktualisierung der übrigen Bereiche der externen Effekte werden auch diese Daten aktualisiert.

Der Berechnung der verlorenen Lebensjahre liegt die beobachtete alters- und geschlechtsspezifische Sterblichkeit zugrunde. Dazu werden die Sterbetafeln von 2011<sup>165</sup> verwendet. Zusätzlich fliesst die mittlere kardiovaskuläre Sterblichkeit von 2014-2018 pro Geschlecht und Altersjahr in die Berechnungen mit ein. Ein Mittelwert von mehreren Jahren verhindert, dass das Ergebnis zu stark durch zufällige jährliche Schwankungen beeinflusst wird, wie das besonders bei den jungen Altersklassen mit geringen Fallzahlen zu erwarten ist.

### 5.2.6 Lärmbedingte Morbidität und Mortalität

Im Folgenden sind die Ergebnisse pro 10 dB Lärm dargestellt. Für 2023 / 2024 sind alle Tabellen zu ersetzen mit den Ergebnissen für die jeweiligen Lärmbelastungen, die momentan noch nicht vorliegen.

Die Berechnung der lärmbedingten Krankheitsfälle erfolgt nach der Methode der attributablen Fälle.<sup>166</sup> Dabei wird anhand der Expositions-Wirkungs-Beziehung und der mittleren Lärmexposition der Bevölkerung der Anteil lärmbedingter Erkrankungen bzw. Todesfälle abgeschätzt. Entsprechend wird dann zurückgerechnet, wie viel weniger Krankheits- und Todesfälle ohne die entsprechende Lärmexposition beobachtet worden wären. Die Differenz entspricht den lärmbedingten Gesundheitsauswirkungen.<sup>167</sup>

Die Anzahl Todesfälle wird anhand eines Vergleichs von Sterbetafeln mit den beobachteten Überlebenswahrscheinlichkeiten und den adaptierten Überlebenswahrscheinlichkeiten ohne Lärmexposition ermittelt. Die Anzahl lärmbedingte Todesfälle entspricht der Summe der im Bezugsjahr 2019 verlorenen Lebensjahre.

Abbildung 5-10 zeigt die Anzahl lärmbedingter Krankheitsfälle pro 10 dB(A) Zunahme des  $L_{den}$  im Jahr 2019. Für kardiovaskuläre Erkrankungen hat der Strassenlärm die grössten Auswirkungen. Pro 10 dB(A) Zunahme der durchschnittlichen Strassenlärmbelastung sind in der Schweiz rund 5'800 kardiovaskuläre Spitaleintritte bzw. 50'600 Spitaltage zu erwarten. Für Bahn- und Fluglärm werden für die gleiche Lärmexposition knapp 2'400 bzw. knapp 1'100 Spitaleintritte erwartet, was 20'600 (Bahn) bzw. 9'500 (Flug) Spitaltagen entspricht. In Bezug auf Diabetes und Depressionen sind die Auswirkungen pro 10 dB(A) für alle Verkehrsträger gleich, da die Effektschätzer nicht quellenspezifisch sind. Pro 10 dB(A) Zunahme des  $L_{den}$  erwartet man für die ganze Schweiz rund 330 Spitaleintritte wegen Diabetes und 1'100 Spitaleintritte wegen Depressionen bzw. 3'900 Spitaltage wegen Diabetes und 36'700 wegen Depressionen.

---

<sup>165</sup> Gleiche Sterbetafeln, die auch in den anderen Bereichen der externen Effekte verwendet werden, um konsistente Ergebnisse zu erhalten.

<sup>166</sup> Perez; Künzli (2009)

<sup>167</sup> Die Ergebnisse für 2015 werden mit der Entwicklung der Bevölkerung (nach Altersklassen) auf 2019 hochgerechnet – wie bei den Berechnungen der externen Effekte üblich.

**Abbildung 5-10: Anzahl lärmbedingter Spitaleintritte und Spitaltage für kardiovaskuläre Erkrankungen, Diabetes und Depressionen sowie Aufteilung nach Verkehrsträger pro 10 dB(A)  $L_{den}$  im Jahr 2019**

Krankheitsfälle	Strassenverkehr	Schiienenverkehr	Luftverkehr
<b>Herz- / Kreislauferkrankungen</b>			
Hospitalisationen (stationär)	5'789	2'358	1'084
Anzahl Spitaltage (stationär)	50'600	20'611	9'479
<b>Diabetes</b>			
Hospitalisationen (stationär)	329	329	329
Anzahl Spitaltage (stationär)	3'924	3'924	3'924
<b>Depression</b>			
Hospitalisationen (stationär)	1'072	1'072	1'072
Anzahl Spitaltage (stationär)	36'693	36'693	36'693

In Abbildung 5-11 sind die attributablen kardiovaskulären Todesfälle pro 10 dB(A)  $L_{den}$  für die drei Verkehrsträger dargestellt. Strassenlärm verursacht 386 Todesfälle pro 10 dB(A)  $L_{den}$ , Bahnverkehr 184 und Flugverkehr 48 Todesfälle. Beim Strassenverkehr sind die lärmbedingten Todesfälle relativ gleichmässig auf die drei Alterskategorien verteilt. Das heisst, dass sich das mit dem Alter abnehmende relative Risiko für Lärmefekte mit der altersbedingt zunehmenden kardiovaskulären Sterblichkeit kompensiert. Beim Bahnlärm sind die älteren Personen etwas stärker betroffen als die 18- bis 64-Jährigen, während es beim Flugverkehr umgekehrt ist. Die geschätzte Anzahl Todesfälle bei Erwerbstätigen liegen bei 112 (Strasse), 37 (Bahn) und 24 (Flug) pro 10 dB(A)  $L_{den}$ .

**Abbildung 5-11: Anzahl lärmbedingter kardiovaskulärer Todesfälle nach Verkehrsträger pro 10 dB(A)  $L_{den}$  im Jahr 2019**

Todesfälle über 18-Jährige	Strassen- verkehr	Schiienen- verkehr	Luft- verkehr
<b>Herz- / Kreislauferkrankungen Total</b>	<b>386</b>	<b>184</b>	<b>48</b>
18- bis 64-Jährige	130	38	29
65- bis 79-Jährige	122	78	19
≥80-Jährige	134	67	-

Für die Berechnung der verlorenen Lebensjahre wird analog wie bei der attributablen Fallberechnung die Anzahl Todesfälle für das Bezugsjahr 2019 mit und ohne Lärmexposition berechnet. Anhand der Sterbetafeln und den beobachteten Überlebenswahrscheinlichkeiten werden diese Auswirkungen in die Zukunft extrapoliert. Die verlorenen Lebensjahre entsprechen der

Differenz der beiden Szenarien, wobei die in Zukunft verlorenen Lebensjahre unter Berücksichtigung eines jährlichen Lohnwachstums von 1% mit einem Diskontsatz von 2% pro Jahr reduziert werden.<sup>168</sup>

In Abbildung 5-12 sind die lärmbedingten abdiskontierten verlorenen **Lebensjahre** pro 10 dB(A)  $L_{den}$  für die drei Verkehrsträger dargestellt. Strassenlärm verursacht ca. 5'200 verlorenen Lebensjahre pro 10 dB(A)  $L_{den}$ , Bahnverkehr 2'200 und Flugverkehr 900 verlorenen Lebensjahre. Bei der Altersverteilung werde die verlorenen Lebensjahre dem Alter beim Todeszeitpunkt angerechnet. Entsprechend verschieben sich die verlorenen Lebensjahre in Richtung der jüngeren Altersgruppe, da diese eine längere Lebenserwartung gehabt hätten.

**Abbildung 5-12: Abdiskontierte verlorene *Lebensjahre* wegen kardiovaskulärer Sterblichkeit nach Verkehrsträger pro 10 dB(A)  $L_{den}$  im Jahr 2019**

Verlorene Lebensjahre (nach Alter beim Tod)	Strassen- verkehr	Schiene- verkehr	Luft- verkehr
<b>Herz- / Kreislauferkrankungen Total</b>	<b>5'239</b>	<b>2'189</b>	<b>916</b>
18- bis 64-Jährige	3'100	917	692
65- bis 79-Jährige	1'474	937	223
≥80-Jährige	665	334	-

Die abdiskontierten verlorenen **Erwerbsjahre** pro 10 dB(A)  $L_{den}$  betragen für den Strassenlärm ca. 1'000, für den Bahnlärm 300 und für den Fluglärm 200 (Abbildung 5-13).

**Abbildung 5-13: Abdiskontierte verlorene *Erwerbsjahre* wegen kardiovaskulärer Sterblichkeit nach Verkehrsträger pro 10 dB(A)  $L_{den}$  im Jahr 2019**

Verlorene Erwerbsjahre (nach Alter beim Tod)	Strassen- verkehr	Schiene- verkehr	Luft- verkehr
<b>Herz- / Kreislauferkrankungen Total</b>	<b>1'002</b>	<b>316</b>	<b>219</b>
18- bis 64-Jährige	943	279	211
65- bis 79-Jährige	53	34	8
≥80-Jährige	6	3	-

<sup>168</sup> Verluste in der Zukunft werden weniger stark gewichtet als Verluste heute. Man trägt diesem Umstand in der Ökonomie mit der Diskontierung Rechnung. Dabei wird eine Diskontrate von 2% (VSS 41 821 (2006)) verwendet. Gleichzeitig wird eine reale Wachstumsrate von 1% berücksichtigt (gemäss VSS 41 821 (2006) und Forschungsbericht dazu: Rapp Trans AG (2006), S. 31) beträgt die Wachstumsrate des Konsums 0.9% bis 1.6% – das durchschnittliche jährliche Wachstum des realen BIP pro Kopf betrug in Jahren 2009 bis 2019 1.01% (Daten BFS). Dies führt zu einer korrigierten Diskontrate von 0.99% (=  $1.02 / 1.01 - 1$ ).

## 6 Wertgerüst

### 6.1 Belästigungen

Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt wird die lärmbedingte Abnahme der Wohnungspreise als Indikator für die monetäre Bewertung von Belästigungen (inkl. Schlafstörungen) durch Lärm verwendet. Hierzu wird einerseits die Höhe des Abschlags pro dB(A) ermittelt sowie das verwendete Lärmmass und der Schwellenwert festgelegt, ab dem Lärmeffekte berücksichtigt werden (vgl. Schritt 3 in Abbildung 4-3). Andererseits gilt es, das durchschnittliche Mietzinsniveau zu bestimmen (Schritt 2 in Abbildung 4-3). Auf diese Punkte wird nachstehend eingegangen.

Die Berechnung beschränken sich auf die Lärmkosten am Wohnort. Auf den Einbezug von Büro-, Verkaufs- und Gastronomieflächen wird verzichtet, da für diese einzeln untersuchten Flächen keine statistisch signifikanten Zusammenhänge zwischen dem Lärm und den Mieten sowie zwischen Lärm und dem Marktwert von Geschäftsimmobilien gefunden wurden.<sup>169</sup> Die Mieten von Geschäftliegenschaften reagieren offenbar nicht oder viel weniger auf eine Lärmbelastung. Die Gründe hierfür können vielfältig sein: Einerseits geht es am Arbeitsplatz selbstverständlich nicht um Erholung, andererseits hält man sich am Arbeitsplatz (meist) nur tagsüber auf und zudem kann man sich während des Aufenthalts durch geschlossene Fenster, Schallisolationen an Gebäudehülle und Fenstern in Kombination mit einer Lüftung oder Klimatisierung vor dem Lärm schützen. Diese Vorkehrungen haben tendenziell höhere eigentümerseitige Kosten zur Folge. Ein Zusammenhang zwischen den eigentümerseitigen Kosten und der Lärmbelastung konnte jedoch statistisch ebenfalls nicht nachgewiesen werden (ausser im Luftverkehr).

#### 6.1.1 Abnahme Wohnungspreise

Für die Arbeiten 2023 / 2024 soll mit den neuen Lärmdaten eine neue Studie zur Abnahme der Wohnungspreise erstellt werden. Mit dieser Studie (und allfälligen weiteren neuen Studien / Ergebnissen) müssen die folgenden Ausführungen in Kapitel 6.1.1 dann aktualisiert werden.

##### a) Grundlagestudien für die Schweiz

In der folgenden Abbildung werden diverse Studien zur lärmbedingten Abnahme der Wohnungspreise in der Schweiz aufgeführt – einerseits Studien, die für die bisherige Festlegung der Abnahme der Wohnungspreise in Ecoplan, Infras (2014) von Bedeutung waren und andererseits neuere Studien, die für die Überarbeitung wichtig sein könnten. Die Studien für Mietwohnungen kommen alle zu einem **Abschlag** zwischen 0.15% und 0.55%. Bedeutsam ist aber nicht nur dieser prozentuale Abschlag, sondern auch das verwendete **Lärmmass** und der **Schwellenwert**, ab dem Mietzinsreduktionen betrachtet werden. Bei einem tieferen Schwellenwert ist mit einer geringeren Steigung der Kurve zu rechnen. Die ZKB<sup>170</sup> führte vor knapp

<sup>169</sup> FPRE Fahrländer Partner AG Raumentwicklung (2014); Fahrländer; Gerfin; Lehner (2015)

<sup>170</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2011); (2012)

10 Jahren mit dem sogenannten ZKB-Lärmass ein neues Lärmass ein, das in den ZKB-Studien die beste statistische Erklärungskraft für den Einfluss des Lärms auf die Wohnungspreise aufweist. Es ist wie folgt definiert:

- Anzahl Dezibel über 40 dB(A) Nachtlärm bzw. falls Nachtlärm unter 40 dB(A),
- Anzahl Dezibel über 50 dB(A) Taglärm

Dieses Lärmass wurde in der Folge auch von Wüest & Partner übernommen, wobei Wüest & Partner auch heute noch mit diesem Lärmass arbeitet. Die ZKB selbst hat in ihrer neusten Studie (ZKB 2019) einen Wechsel vorgenommen und verwendet neu das Lärmass  $L_{den}$  (vgl. Kapitel 4.1.2).<sup>171</sup> Der verwendete Schwellenwert in der neusten ZKB-Studie wird auf 50 dB(A)  $L_{den}$  festgelegt. In der «Ergänzung zum Schlussbericht 2019»<sup>172</sup> hat die ZKB nebst den Ergebnissen für den  $L_{den}$  zusätzlich auch die Effektschätzer für das bisher verwendete ZKB-Lärmass ausgewiesen.

Werden die Ergebnisse aus den ZKB-Studien von 2012 und 2019<sup>173</sup> für das ZKB-Lärmass verglichen, fällt auf, dass die Koeffizienten für die Abnahme der Wohnungspreise in der neuen Studie für den Strassen- und Schienenverkehrslärm gesunken sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in ZKB (2020) der energieäquivalenter Dauerschallpegel  $L_{eq}$  als Grundlage verwendet wurde, in ZKB (2012) hingegen der Beurteilungspegel  $L_r$ .<sup>174</sup> Gemäss Auswertungen mit sonBASE<sup>175</sup> ist die Lärmbelastung mit dem  $L_r$  tiefer als mit dem  $L_{eq}$ , entsprechend sind die Koeffizienten beim  $L_r$  höher. Dies lässt sich damit erklären, dass bei Verwendung des  $L_{eq}$  anstelle des  $L_r$  die Bonusabzügen bei kleinen Verkehrsmengen (Strasse und Schiene) sowie insbesondere der generelle Schienenbonus (Abzug von 5 dB(A)) entfallen (vgl. Fussnote 174).

---

<sup>171</sup> Der  $L_{den}$  hat Ähnlichkeiten mit dem bisherigen ZKB-Lärmass, aber auch Unterschiede: Beim ZKB-Lärmass wird primär nur der Nachtlärm betrachtet und erst wenn dieser unter 40 dB(A) fällt, wird auch Taglärm ab 50 dB(A) miteinbezogen. Massgeblich für die Ermittlung der Lärmbelastung, welche in die ökonomische Schätzung der ZKB einfließt, ist bei dieser Festlegung fast immer der Nachtlärm. Im untersuchten Sample der ZKB sind insgesamt 72% aller Mietwohnungen von Strassenlärm gemäss ZKB-Lärmass betroffen – bei 71.6% aller Mietwohnungen ist dabei der Nachtlärm (>40dB) massgebend und nur bei 0.4% der Taglärm (>50dB bei Nachtlärm < 40dB) (ZKB 2020, S. 2). Beim  $L_{den}$  wird zwar von denselben Schwellenwerten ausgegangen wie im ZKB-Lärmass, nämlich 50 dB(A)  $L_{eq}$  Taglärm und 40 dB(A)  $L_{eq}$  Nachtlärm (was aufgrund des Zuschlages von 10 dB(A) beim Nachtlärm einem  $L_{den}$  von 50 dB(A) entspricht). Jedoch werden im  $L_{den}$  beide Schwellenwerte in gewichteter Form gleichzeitig berücksichtigt. Der Taglärm spielt im  $L_{den}$  damit eine viel grössere Rolle als im ZKB-Lärmass. Zudem wird im  $L_{den}$  der Abendlärm mit 5 dB(A) belastet, was auch Auswirkungen auf den Schwellenwert hat.

<sup>172</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2020)

<sup>173</sup> In ZKB Zürcher Kantonalbank (2020)

<sup>174</sup> Beim Dauerschallpegel wird ein energieäquivalenter Durchschnitt des Lärms gebildet, in dem Lärmspitzen und Ruhephasen in einen durchschnittlichen Dauerschallpegel umgerechnet werden. Der Beurteilungspegel  $L_r$  geht vom  $L_{eq}$  aus, berücksichtigt aber diverse Pegelkorrekturen, insbesondere einen sogenannten Schienenbonus bzw. Abzug von 5 dB(A) vom  $L_{eq}$ . Hintergrund dieses Abzugs bei der damaligen Festlegung der Lärmschutzverordnung war die Einschätzung, dass der Bahnlärm als weniger lästig empfunden wird als der Strassenlärm und mit dem Bonus bzw. Abzug von mindestens 5 dB(A) die Lärmstörung des Schienenverkehrs besser abgebildet wird.

<sup>175</sup> Mail des BAFU vom 5.10.2020.

**Abbildung 6-1: Vergleich des Lärmeinflusses in verschiedenen Hedonic-Pricing-Studien für die Schweiz (Ergebnisse für Mietwohnungen grau hinterlegt)**

Autor	Ort	Anzahl Beobachtungen	Abnahme Wohnungspreis pro dB		Schwellenwert	
			Tageslärm	Nachtlärm	Tageslärm	Nachtlärm
ZKB (2005), MIFLU <sup>1</sup>	Flughafen Zürich	Eigentumswohnungen	Luftfahrt: 1.2%		50 dB(A)	
		Einfamilienhäuser	Luftfahrt: 0.87%		50 dB(A)	
Scognamiglio (2011) <sup>2</sup>	Schweiz	ca. 2'000 Transaktionen von Renditeliegenschaften	Luftfahrt: 1.2%		45 dB (A)	
			Luftfahrt: 1.8%		50 dB (A)	
ZKB 2012	Schweiz 2002 - 2011	855'693 Mietwohnungen	Strasse: 0.21% Schiene: 0.24%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB	
		83'856 Stockwerkeigentumswohnungen	Strasse: 0.59% Schiene: 0.47%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB	
Wüest & Partner 2013 <sup>3</sup>	Schweiz 2009 - 2012	850'000 Mietwohnungen	Strasse: 0.15% Schiene: 0.15% Luft: 0.18%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB bzw. 45 dB(A) Luft	
		78'000 Stockwerkeigentumswohnungen	Strasse: 0.22% Schiene: 0.35% Luft: 0.35%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB bzw. 45 dB(A) Luft	
		67'000 Einfamilienhäuser	Strasse: 0.72% Schiene: 0.71%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB	
ZKB 2019	Schweiz 2013 - 2018	819'435 Mietwohnungen	Strasse: 0.16% Schiene: 0.16% Luft: 0.23%		L <sub>den</sub> ab 50 dB(A) 50 dB(A)	
		65'626 Stockwerkeigentumswohnungen	Strasse: 0.43% Schiene: 0.46% Luft: 0.18%		L <sub>den</sub> ab 50 dB(A) 50 dB(A)	
ZKB 2019 (in ZKB 2020)	Schweiz 2013 - 2018	819'435 Mietwohnungen	Strasse: 0.17% Schiene: 0.15%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB	
		65'626 Stockwerkeigentumswohnungen	Strasse: 0.44% Schiene: 0.39%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB	
Wüest & Partner 2020 <sup>4</sup>	Schweiz 2015 Q3 - 2019 Q2	ca. 120'000 Mietwohnungen	Strasse: 0.40% Schiene: 0.55% Luft: 0.02%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB bzw. 50 dB(A) Luft	
		ca. 55'000 Stockwerkeigentumswohnungen	Strasse: 0.55% Schiene: 0.70% Luft: 0.13%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB bzw. 50 dB(A) Luft	
		ca. 45'000 Einfamilienhäuser	Strasse: 0.70% Schiene: 0.90% Luft: 0.23%		50 dB(A), falls Nachtlärm < 40 dB bzw. 50 dB(A) Luft	

<sup>1</sup> MIFLU = Minderwert Fluglärm, zitiert in SIV infos (2006), S. 10, bzw. ZKB Zürcher Kantonalbank (2011), S. 37.

<sup>2</sup> Bundesverwaltungsgericht. Urteil vom 19. Januar 2011 (A 2684/2010). Unklar, ob die Koeffizienten für Tag- oder Nachtlärm gelten.

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Resultate, die wir direkt von Wüest & Partner erhalten haben. Sie beruhen auf einer Weiterentwicklung des Modells in Wüest & Partner (2013), insbesondere wurde neu das ZKB-Lärmass gemäss ZKB-Studie (2012) verwendet.

<sup>4</sup> Unveröffentlichte Resultate, die wir direkt von Wüest & Partner erhalten haben.

Interessant ist zudem, dass innerhalb der jeweiligen Studien für die Eigentumswohnungen und Einfamilienhäuser – im Vergleich zu Mietwohnungen – meist deutlich höhere Effektschätzer (Verminderungen des Preises) resultieren (vgl. Abbildung 6-1). Möglicherweise kann dies dadurch erklärt werden, dass die Lärmempfindlichkeit bei Eigentumswohnungen und Einfamilienhäusern durch die längere und intensivere Bindung sowie die höheren Ansprüche an das

Wohnobjekt gegenüber Mietwohnungen zunimmt.<sup>176</sup> Deshalb wird die Berechnung der Lärmkosten differenziert nach Mietwohnungen, Stockwerkeigentum und Einfamilienhäusern vorgenommen.<sup>177</sup>

## b) Festlegung der Preisabnahme

Für die Berechnung der Preisreduktion wird mehrheitlich von ZKB (2019) ausgegangen: Diese Studie basiert auf sehr umfassenden, schweizweiten und aktuellen Datengrundlagen. Die Ergebnisse der ZKB beruhen auf Inseraten des Immobilienportals Homegate aus den Jahren 2013 – 2018: Beim Stockwerkeigentum sind es 65'626 Inserate und bei den Mietwohnungen 819'435 Inserate. Zudem erreicht die ZKB-Studie einen hohen Erklärungsgehalt: Das Mietmodell erzielt ein  $R^2$ <sup>178</sup> von 81%, das Stockwerkeigentumsmodell erreicht ein  $R^2$  von 79%.<sup>179</sup>

Als mögliche Alternative liegen unveröffentlichte Ergebnisse von Wüest & Partner (2020) vor. Wir ziehen aber die Ergebnisse der ZKB für die weiteren Berechnungen aus folgenden Gründen vor:

- Erstens wurde die Studie der ZKB speziell für die Abschätzung des Lärmeffektes durchgeführt, bei den Ergebnissen von Wüest & Partner wurde demgegenüber der Lärmeinfluss nur zur Beschreibung der Mikrolage einer Wohnung betrachtet, als ein Faktor unter vielen.
- Zweitens ist die Stichprobe von Wüest & Partner deutlich kleiner, vor allem bei den Mietwohnungen (Faktor 7 – vgl. Abbildung 6-1).
- Drittens wurden die Ergebnisse von Wüest & Partner nicht publiziert und somit auch nicht einem wissenschaftlichen Review unterzogen.

Die Ergebnisse von Wüest & Partner werden jedoch zur Abschätzung des Effekts für Einfamilienhäuser verwendet (vgl. unten), für welche die ZKB keine Ergebnisse herleitet.

Für die Berechnung der lärmbedingten Kosten im Wohnbereich werden gemäss den Studienergebnissen für die Preisreduktionen, das Lärmass und die Schwellenwerte die in Abbildung 6-2 ausgewiesenen Werte verwendet. Die einzelnen Werte werden nachfolgend erläutert.

---

<sup>176</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2011), S. 37 und ZKB Zürcher Kantonalbank (2010), S. 17. Eine andere Erklärung ist, dass sich in den Mietpreisen nicht die gesamten Kosten des Lärms reflektieren (beispielsweise Vernachlässigung von erhöhtem Leerstandrisiko bei Lärm, erhöhtem Mieterwechsel und in der Folge höheren Unterhalts- / Reparaturaufwendungen usw. (vgl. hierzu FPRE Fahrländer Partner AG (2013)). Diesem zweiten Erklärungsansatz wird im Sinne des at least Ansatzes in den weiteren Berechnungen nicht Rechnung getragen.

<sup>177</sup> Es kann als störend erscheinen, dass die Reduktion der Wohnungspreise für Mietwohnungen, Stockwerkeigentum und Einfamilienhäuser differenziert wird, obwohl die (physikalische) Lärmbelastung für alle gleich ist. Entsprechend werden etwa bei der Ermittlung der Gesundheitsschäden tatsächlich alle Personen gleichbehandelt, die dem gleichen Lärmniveau ausgesetzt sind. Bei der Reduktion der Wohnungspreise spielt jedoch die subjektive Belästigung eine wichtige Rolle. Die Belästigungswirkung des Lärms wird subjektiv anders empfunden, was die individuelle Zahlungsbereitschaft für eine ruhige Wohnung beeinflusst. Dabei zeigt sich, dass die Einfamilienhauseigentümer offenbar höhere Ansprüche bezüglich Ruhe haben als Mieter.

<sup>178</sup>  $R^2$  ist ein Mass für den erklärten Anteil in der Variabilität einer abhängigen Variablen (hier Wohnungspreis) durch ein statistisches Modell.

<sup>179</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2019), S. 21

**Abbildung 6-2: Abnahme der Wohnungspreise pro dB(A), berücksichtigte Schwellenwerte und Lärmmasse**

Verkehr	Lärmass	Miet- wohnungen	Stockwerk- eigentum	Einfami- lienhaus	Durchschnitt Eigentumswohnung	Durchschnitt alle Wohnungen
Strassenverkehr	$L_{den} > 50 \text{ dB(A)}$	0.16%	0.43%	0.55%	0.51%	0.27%
Gewichtung: Anteile			32.2%	67.8%	100.0%	
Gewichtung: Anteile		68.6%			31.4%	100.00%
Schienenverkehr	$L_{den} > 50 \text{ dB(A)}$	0.16%	0.46%	0.59%	0.55%	0.26%
Gewichtung: Anteile			32.2%	67.8%	100.0%	
Gewichtung: Anteile		73.4%			26.6%	100.00%
Luftverkehr	Tageslärm $> 50 \text{ dB(A)}$	0.23%	0.20%	0.35%	0.30%	0.26%
Gewichtung: Anteile			32.2%	67.8%	100.0%	
Gewichtung: Anteile		64.4%			35.6%	100.00%
<b>Berechneter Wert.</b>						

Quelle: ZKB (2019), Auswirkungen von Verkehrslärm auf den Preis von Mietwohnungen und Stockwerkeigentum, S. 25 bzw. Herleitung auf Basis von ZKB (2019) und Wüest & Partner (2020)

## Strassen- und Schienenlärm

### Berücksichtigtes Lärmass

Sowohl im Strassen- als auch im Schienenverkehr liegen Ergebnisse für den  $L_{den}$  und für das ZKB-Lärmass vor. Die Ergebnisse der ZKB in Abbildung 6-1 zeigen, dass die Schätzwerte für die beiden Lärmass sehr ähnlich sind. Die verwendeten Schwellenwerte sind jedoch unterschiedlich, wie Auswertungen der ZKB zeigen<sup>180</sup>: Die Schwelle beim ZKB-Lärmass (40 dB(A) Nachtlärm bzw. 50 dB(A) Taglärm, wobei bei 99.4% der belärmten Wohnungen der Nachtlärm relevant ist) liegt im Durchschnitt um ca. 2 dB(A) tiefer als die Schwelle von 50 dB(A)  $L_{den}$ . Dies zeigt auch die folgende Auswertung von sonBASE in Abbildung 6-3: Die durchschnittliche Lärmbelastung über dem Schwellenwert ist beim Nachtlärm<sup>181</sup> um gut 30% (Strasse) bzw. gut 70% (Schiene) höher als beim  $L_{den}$ . Entsprechend fallen auch die Lärmkosten wegen verminderter Wohnungspreise mit dem ZKB-Lärmass höher aus als mit dem  $L_{den}$ . Im Schienenverkehr sind die Unterschiede grösser, was u.a. darauf zurückzuführen sein dürfte, dass im Schienenverkehr der Nachtlärm wegen des Güterverkehrs ebenfalls hoch ist.

<sup>180</sup> Mail vom 28.9.2020.

<sup>181</sup> In der Auswertung des BAFU wurde nur der Nachtlärm berücksichtigt, d.h. das tatsächliche ZKB-Lärmass würde im Vergleich zu den ausgewiesenen Werten noch leicht höher ausfallen, weil in der BAFU-Auswertung jene rund 0.6% Wohnungen fehlen, die eine Nachtlärmbelastung unter 40 dB(A) aufweisen, aber einem Taglärm von über 50 dB(A) unterliegen. Grundlage der Auswertung bilden 1.6 Mio. Gebäude mit 4.0 Mio. Etagen. Davon enthalten allerdings ca. 0.3 Mio. Gebäude keine Wohnungen. Das bedeutet, dass die definitiven Auswertungen mit sonBASE für das ZKB-Lärmass und den  $L_{den}$  von diesen Zahlen abweichen werden.

**Abbildung 6-3: Durchschnittliche Lärmbelastung in Anzahl dB(A) über Schwellenwert (bei einer Auswertung des durchschnittlichen Lärms ( $L_{eq}$ ) pro Etage in sonBASE)**

	Strasse	Schiene
$L_{den}$	2.57	0.21
Nachtlärm	3.38	0.36
Nachtlärm / $L_{den}$	132%	171%

Quelle: Auswertung durch das BAFU vom 2.10.2020.

Es ist also zu entscheiden, welches Lärmmass in den Berechnungen verwendet werden soll. Folgende **Gründe** sprechen für den  $L_{den}$ :

- Der  $L_{den}$  berücksichtigt den Tag-, Abend- und Nachtlärm, wobei der Abend- und Nachtlärm höher gewichtet werden. Der  $L_{den}$  kann damit die reale Lärmsituation besser abbilden als das ZKB-Lärmass, das fast ausschliesslich auf dem Nachtlärm beruht (bei 99.4% der belärmten Wohnungen ist der Nachtlärm entscheidend).
- Der  $L_{den}$  ist ein international anerkanntes und oft verwendetes Lärmass. Das ZKB-Lärmass wird hingegen nur von ZKB sowie Wüest & Partner, d.h. nur in der Schweiz verwendet. Die internationale Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird deshalb erhöht, wenn der  $L_{den}$  verwendet wird.
- Bei Unsicherheit befolgen wir bei der Abschätzung der Lärmkosten den at least Ansatz. Deshalb steht der  $L_{den}$  im Vordergrund, der aufgrund des höheren Schwellenwertes zu tieferen Lärmkosten führt.
- Auch bei der Bewertung der Auswirkungen auf die Gesundheit wird der  $L_{den}$  verwendet. Somit würde überall das gleiche Lärmass eingesetzt.
- Sowohl das BAFU als auch die ZKB (Mail vom 24.9.20) empfehlen aufgrund der obigen Gründe die Verwendung des  $L_{den}$ .

Es gibt jedoch auch **Gründe**, welche für das ZKB-Lärmass sprechen:

- Die ZKB hat in ihren ursprünglichen Berechnungen<sup>182</sup> verschiedene Lärmassse und Schwellenwerte (z.B. nur Tageslärm über 50 oder 55 dB(A), nur Nachtlärm oder Kombinationen von Tag- und Nachtlärm) getestet und dabei festgestellt, dass das ZKB-Lärmass den höchsten Erklärungsgehalt (bzw. das höchste  $R^2$ ) aufweist. Auch in der neusten Studie (ZKB 2019 inkl. ZKB 2020) ist das  $R^2$  mit dem ZKB-Lärmass etwas höher als mit dem  $L_{den}$ . Der Unterschied ist allerdings nur marginal (0.016% bzw. 0.046% höher bei Miet- bzw. Stockwerkeigentumswohnungen).
- Mit dem ZKB-Lärmass wird ein tieferer Schwellenwert verwendet. Wie das  $R^2$  zeigt, gibt es offenbar auch unterhalb des Schwellenwertes des  $L_{den}$  noch Lärmefekte.

Aufgrund der obigen Ausführungen wird der  $L_{den}$  **verwendet**. Die Berechnungen sollen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse aber auch mit dem ZKB-Lärmass durchgeführt werden. Die

<sup>182</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2011)

definitive Wahl des Lärmmasses erfolgt nach Vorliegen beider Ergebnisse. –  $L_{den}$  vorbehältlich neuer Erkenntnisse aus dem Ergebnisvergleich zwischen  $L_{den}$  und ZKB-Lärmmass.

### **Schwellenwert**

Mit der Festlegung von  $L_{den}$  als anzuwendendes Lärmmass ist auch der zu verwendende Schwellenwert von 50 dB(A)  $L_{den}$  bestimmt, ab dem Lärmkosten zu berücksichtigen sind. Dieser Schwellenwert entspricht in der Schweizer Lärmschutzverordnung in etwa dem Planungswert für die Empfindlichkeitsstufe I (Erholung) von 50 dB(A) Taglärm bzw. 40 dB(A) Nachtlärm. Für Immissionsgrenzwerte bzw. für Wohnzonen (Empfindlichkeitsstufe II) liegen die Grenzwerte in der Lärmschutzverordnung um je 5 dB(A) höher. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Immissionsgrenzwerte jenes Lärmniveau festlegen, «ab welchem der Lärm die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden **erheblich** stört». <sup>183</sup> Kosten entstehen aber bereits unterhalb dieser Grenzwerte, da auch Störungen, die noch nicht als erheblich eingestuft werden, Kosten verursachen, wie z.B. durch die ZKB-Studien belegt wird.

### **Abnahme Wohnungspreise für Miet- und Eigentumswohnungen**

Die für die Berechnungen vorgeschlagene Abnahme der Wohnungspreise wird in der Abbildung 6-2 dargestellt. Im Strassen- und Schienenverkehr können die Werte für Miet- und Stockwerkeigentumswohnungen direkt aus ZKB (2019) bzw. Abbildung 6-1 übernommen werden.

Die ZKB-Studie enthält jedoch keine Ergebnisse für Einfamilienhäuser (inkl. Doppel-Einfamilienhäuser und Reiheneinfamilienhäuser). Hier stützen sich die Abschätzungen deshalb teilweise auf die unveröffentlichten Werte von Wüest & Partner (2020, vgl. Abbildung 6-1) ab, welche auch Ergebnisse für Einfamilienhäuser ausweisen – mit einer grossen Stichprobe von ca. 45'000 Einfamilienhäusern. Wie die Ergebnisse von Wüest & Partner (2020) in Abbildung 6-1 zeigen, ist die Preisabnahme für Einfamilienhäuser etwas höher als die Abnahme für Stockwerkeigentumswohnungen – und zwar um durchschnittlich 28% im Strassen- und Schienenverkehr. <sup>184</sup> Der Schätzwert der ZKB für Stockwerkeigentumswohnungen wird deshalb mit dem Faktor 1.28 multipliziert, um den Schätzwert für Einfamilienhäuser zu bestimmen (vgl. Abbildung 6-1). Mit den offiziellen Zahlen des BFS für die Anzahl Wohnungen im Stockwerkeigentum und für die Anzahl Einfamilienhäuser kann daraus ein gewichteter Mittelwert für alle Eigentumswohnungen berechnet werden. Dieser beläuft sich gemäss den Berechnungen in Abbildung 6-1 für den Strassenverkehr auf 0.51% pro dB(A) und im Schienenverkehr auf 0.55% pro dB(A).

<sup>183</sup> BAFU Bundesamt für Umwelt (2019)

<sup>184</sup> Die Gründe dürften dieselben sein, wie bei der Frage, warum der Schätzwert der Stockwerkeigentumswohnungen höher ist als der Schätzwert der Mietwohnungen: Die Lärmempfindlichkeit nimmt bei Einfamilienhäusern durch die längere und intensivere Bindung sowie die höheren Ansprüche an das Wohnobjekt gegenüber Stockwerkeigentumswohnungen zu.

### **Durchschnittlicher Abschlag für alle Wohnungen**

Als Datengrundlage zur Ermittlung der Lärmbelastung in der Schweiz wird die Lärmdatenbank sonBASE verwendet. Leider kann sonBASE nicht zwischen Miet- und Eigentumswohnungen unterscheiden, da dazu keine Daten vorliegen. Weil gemäss den vorherigen Ausführungen aber Unterschiede bei der Abnahme der Wohnungspreise zwischen den beiden Segmenten bestehen, wäre für eine exakte Bewertung eine Differenzierung bei der Abnahme der Wohnungspreise notwendig. Als Lösung bilden wir aus den Abschlägen für Miet- und Eigentumswohnungen einen durchschnittlichen Abschlag für alle Wohnungen.

Grundlage dazu bildet die kantonale Wohneigentumsquote 2019 des BFS von 36.4% (aufgrund der kantonal stark unterschiedlichen Wohneigentumsquoten (16% in BS bis 57% in AI) und Wohnungspreise wird eine kantonal differenzierte Betrachtung durchgeführt, vgl. dazu den folgenden Exkurs). Dieser Wert muss für die Verwendung in den Lärmberechnungen noch um den Umstand korrigiert werden, dass sich Eigentumswohnungen aufgrund der höheren Ansprüche tendenziell an ruhigerer Lage befinden als Mietwohnungen. So zeigt sich, dass 66%<sup>185</sup> der Mietwohnungen in der ZKB-Stichprobe vom Strassen-, Schienen- oder Flugverkehr belärmt werden, aber nur 53% der Eigentumswohnungen.<sup>186, 187</sup> Daraus folgt, dass 32% (je nach Kanton 13% (BS) bis 52% (AI)) aller belärmten Wohnungen Eigentumswohnungen sind.

Folglich muss die Abnahme der Wohnungspreise pro Dezibel kantonal differenziert werden. Es ist zu betonen, dass grundsätzlich für die ganze Schweiz von derselben Abnahme der Wohnungspreise ausgegangen wird (d.h. es werden keine regionalen Unterschiede betreffend Präferenzen für ruhiges Wohnen gemacht) und dass nur die unterschiedlich hohe Eigentumsquote zu Differenzen führt. Wie die letzte Spalte von Abbildung 6-2 zeigt, wird in der Schweiz also durchschnittlich mit einer Abnahme der Wohnungspreise von 0.27% (Strasse, je nach Kanton 0.21% bis 0.34%) bzw. 0.26% (Schiene, je nach Kanton 0.20% bis 0.34%) gerechnet. Aufgrund des höheren Anteils von belärmten Eigentumswohnungen im Strassenverkehr als im Schienenverkehr (31% versus 27%), ist der gemittelte Wert im Strassenverkehr leicht höher als im Schienenverkehr, obwohl die Eigentumswohnungen im Schienenverkehr eigentlich einen stärkeren Wertverlust erleiden.

---

<sup>185</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2020), S. 9 und ergänzende Informationen der ZKB per Mail.

<sup>186</sup> Für die belärmten Anteile von Mietwohnungen und Eigentumswohnungen liegen differenzierte Daten nach Strassen-, Schienen- und Luftverkehr vor, welche für die Berechnungen verwendet werden (vgl. Abbildung 6-2). Eine weitergehende Differenzierung nach Kantonen kann nicht vorgenommen werden, da die entsprechenden Grundlagen fehlen.

<sup>187</sup> Hinweis zum Vergleich mit bisher verwendetem Anteil der belärmten Wohnungen: In den bisherigen Berechnungen (in Ecoplan; Infrac 2014) ging man davon aus, dass 63% der Mietwohnungen und 15% der Eigentumswohnungen belärmt sind. Der Anteil der belärmten Eigentumswohnungen ist also gemäss den neusten Angaben der ZKB deutlich höher (53% statt 15%). Gemäss ZKB (2020, S. 8) lag der tatsächliche Anteil der Eigentumswohnungen bereits im Sample aus dem Jahr 2012 bei 49%. Der in Ecoplan; Infrac (2014) verwendete Anteil von 15% beruht auf einer missverständlichen Formulierung in ZKB (2012). Die eigentliche Zunahme von 49% auf 53% ist auch darauf zurückzuführen, dass 2012 noch mit dem  $L_r$  gearbeitet wurde, 2019 hingegen mit dem  $L_{eq}$ . Für die bisherigen Ergebnisse im Jahr 2015 führt die Erhöhung des Anteils der belärmten Eigentumswohnungen zu einer Zunahme der Reduktion der Wohnungspreise um ca. einen Drittel. 2023 / 2024 zu aktualisieren mit aktuellen Ergebnissen.

### Exkurs: Differenzierung der Berechnungen nach Kantonen

Die Berechnungen werden differenziert nach Kantonen vorgenommen, um die beiden folgenden Unterschiede abbilden zu können:

- Unterschiedliche **Eigentumsquoten**: Es wird zwar mit schweizweit identischen prozentualen Abschlägen pro dB(A) gerechnet, doch unterscheiden sich diese zwischen Miet- und Eigentumswohnungen deutlich (mehr als Faktor 3 im Strassen- und Schienenverkehr – vgl. Abbildung 6-2 oben). In Kantonen mit hoher Eigentumsquote (bis Faktor 3.6 Unterschiede) ist also die durchschnittliche prozentuale Reduktion der Wohnungspreise höher als in Kantonen mit tiefer Eigentumsquote.
- Unterschiedliches **Mietpreisniveau**: Die durchschnittlichen Mietpreise pro Wohnung und Kanton weisen erhebliche Unterschiede auf. Der günstigste und teuerste Kanton liegen um ca. den Faktor 1.8 auseinander (vgl. Kapitel 6.1.1b) unten).

Bei der Herleitung von Lärmkostensätzen für Kosten-Nutzen-Analysen wurde hingegen auf die Differenzierung nach Kantonen verzichtet. Folgende Gründe führten zu diesem Vorgehen:<sup>188</sup>

- Das Arbeiten mit Schweizer Mittelwerten erlaubt eine möglichst breite und einfache Anwendung der Norm.
- Die Lärmempfindlichkeit der Bevölkerung in Städten dürfte geringer sein als diejenige auf dem Land. Hingegen sind die Wohnungspreise in den Städten meist höher als in ländlichen Gebieten. Mit diesen beiden gegenläufigen Effekten lässt es sich vertreten, auf eine kantonale Differenzierung des Kostensatzes zu verzichten.
- Zum Teil wird für diese Vereinfachung auch aus einem Fairness-Standpunkt argumentiert, wenn es um die Errichtung von Lärmschutzmassnahmen geht: Unterschiedliche Personen, die dem gleichen Lärmniveau ausgesetzt sind, sollen aus einer Fairnessperspektive den gleichen Schutz gegen Lärm erhalten. Vor diesem Hintergrund soll auf eine Differenzierung der Zahlungsbereitschaft verzichtet werden und für alle – unabhängig von ihrer Wohnkanton – der gleiche Kostensatz bzw. die gleiche Reduktion der Wohnungspreise verwendet werden.<sup>189</sup>

<sup>188</sup> Ecoplan (2020), S. 31–32

<sup>189</sup> Zusätzlich wurde auch die Frage untersucht, ob die Höhe des Abschlags pro dB(A) von der Höhe des Wohnungspreises abhängt (als Prozentsatz) oder ob sie unabhängig von der Höhe des Wohnungspreises ist und eher einem absoluten Betrag pro dB(A) entspricht. Dies wurde auftragsgemäss mit der ZKB diskutiert (Antwort per Email vom 24.9.2020): Die ZKB hat bisher nie Modelle untersucht, in denen der Einfluss des Lärms unabhängig von der Höhe des Wohnungspreises implementiert wird und sie hält dies auch nicht für einen sinnvollen Ansatz: Eine Logarithmierung des Preises hat gegenüber einer absoluten Betrachtung diverse Vorteile. Zum einen können grössere Schwankungen um den Mittelwert des Preises reduziert werden, zum anderen wird das statistische Problem der Heteroskedastizität erheblich reduziert. Ausserdem können dadurch nicht-lineare Zusammenhänge in eine lineare Form überführt werden. Aufgrund dieser Vorteile hat sich diese sogenannte Semi-Log Form bei hedonischen Modellen in der Praxis und Forschung durchgesetzt. Zudem haben reichere Leute tendenziell eine höhere Zahlungsbereitschaft für Lärm (bzw. Ruhe), wobei der Reichtum der Leute in den höheren Wohnungspreisen approximativ abgebildet wird.

Mehrere Gründe sprechen jedoch dafür, für die Berechnungen der lärmbedingten Kosten beim Abschlag der Wohnungspreise eine Differenzierung nach Kantonen vorzunehmen:

- Das Hauptargument ist die ökonomische Rationalität: Es geht um die Frage, welchen Nutzenverlust die Leute erleiden. Das Ausmass dieses Nutzenverlusts quantifiziert in Geldeinheiten ist abhängig vom verfügbaren Einkommen: Personen mit einem höheren Einkommen haben meist eine höhere Zahlungsbereitschaft und können sich eine teurere Wohnung leisten. Mit einer Differenzierung der Berechnungen nach dem kantonalen Mietpreisniveau wird diesem Umstand Rechnung getragen. Auch die Eigentumsquote hat einen Einfluss auf den lärmbedingten Nutzenverlust, da die Abnahme der Wohnungspreise bei Eigentumswohnungen höher ist als bei Mietwohnungen.
- Bei der Berechnung von Schweizer Lärmkosten macht es Sinn, die Berechnungen möglichst genau und damit möglichst differenziert durchzuführen, soweit differenzierte Datengrundlagen zur Verfügung stehen.<sup>190</sup>
- Schliesslich wird in den Berechnungen im Zweifelsfall der at last Ansatz verfolgt, d.h. dass konservative Annahmen getroffen werden, die eher zu einer Unterschätzung der externen Kosten führen. Würden die Berechnungen mit Schweizer Durchschnittswerten anstatt mit kantonal differenzierten Werten durchgeführt, so würden die Kosten im Strassenverkehr um 21 Mio. CHF und im Schienenverkehr um 2.5 Mio. CHF höher ausfallen. Somit würden sich die lärmbedingte Wohnungspreisreduktionen um 3.7% bzw. 2.6% erhöhen. Die gesamten Lärmkosten unter Berücksichtigung der lärmbedingten Gesundheitsschäden (mehr als XXX% der gesamten Lärmkosten) wären um XXX% angestiegen. 2023 / 2024 zu aktualisieren, da momentan mit provisorischen Zahlen gerechnet
- Zudem ist die Differenzierung der Berechnungen nach Kantonen einfach umsetzbar.

### **Sensitivitätsanalyse**

Wie erläutert bestehen bei der Berechnung der Lärmwirkung auf die Wohnungspreise diverse Unsicherheiten. Diesen Unsicherheiten wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse Rechnung getragen. Hierzu wurde bisher von einer Bandbreite von  $\pm 30\%$  auf die festgelegten Abschläge ausgegangen.

Neu soll für die Sensitivitätsanalyse von den 95%-Konfidenzintervallen zum  $L_{den}$  in der ZKB-Studie (2019) ausgegangen werden. Dadurch schwanken die Schätzwerte für den Durchschnitt aller Wohnungen

- im Strassenverkehr zwischen 0.25% und 0.30% (statt 0.27%), d.h. +/-9%
- im Schienenverkehr zwischen 0.19% und 0.33% (statt 0.26%), d.h. +/-26%

<sup>190</sup> Nach Kantonen differenzierte Kostensätze würden in Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) dazu führen, dass dieselben Lärmbelastungen an unterschiedlichen Orten unterschiedlich bewertet würden. In der Begleitgruppe wurde die Meinung vertreten, dass es sich das ASTRA nicht leisten kann, «reiche» und «arme» Kantone unterschiedlich zu behandeln. Aus ökonomischer Sicht wäre es durchaus auch in KNA sinnvoll, nach Kantonen zu differenzieren. Die Gleichbehandlung aller kann aber in KNA höher gewichtet werden als ökonomische Überlegungen.

Ergänzend wird wie oben erläutert im Rahmen der Sensitivitätsanalyse anstatt des  $L_{den}$  auch das ZKB-Lärmass als Grundlage für die Berechnungen verwendet (wobei die Effektschätzer aus ZKB (2020) verwendet werden). Wie erläutert, wird dadurch der Schwellenwert reduziert, ab dem Lärmeffekte auftreten.

## Luftverkehrslärm

### **Lärmass und Schwellenwert**

In den bisherigen Berechnungen wurde für die Lärmkosten im Schweizer Luftverkehr immer der **Taglärm** als Lärmass verwendet. Dies bleibt so, da alle verfügbaren Studien sich auf den Taglärm abstützen. Als Schwellenwert für den Tageslärm hat sich dabei der Wert von **50 dB(A)** etabliert, wobei vereinzelt in Studien auch ein Schwellenwert von 45 dB(A) verwendet wurde. In den neuesten Schweizer Studien der ZKB und in den Modellen von Wüest & Partner (vgl. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-4) wird ebenfalls ein Schwellenwert von 50 dB(A) Tageslärm ( $L_{eq}$  von 6-22 Uhr) zugrunde gelegt.

### **Abnahme Wohnungspreise**

Beim Luftverkehr war bisher die Dichte an Studien, die für die Schweiz repräsentativ sind, deutlich geringer als beim Strassen- und Schienenverkehr. In der bisherigen Methodik zur Ermittlung der Lärmkosten wurde auf die MIFLU-Studie (Minderwert Fluglärm<sup>191</sup>) der ZKB (2005) verwiesen, in der nur Abschläge für Stockwerkeigentum (1.2%) und Einfamilienhäuser (0.87%) nicht aber für Mietwohnungen bestimmt wurden (vgl. Abbildung 6-1).<sup>192</sup> Beim Mietmarkt wurde der Schätzer approximiert. Es wurde für Mietwohnungen unterstellt, dass die Abnahme der Wohnungspreise durch Fluglärm um den Faktor 2 höher sei als der gewichtete durchschnittliche Abschlag für Mietwohnungen beim Strassen- und Schienenverkehr, was 0.45% pro dB(A) ergab.<sup>193 194</sup>

Aus damaliger Sicht handelte es sich bei den für Zürich ausgewiesenen Werten aus der MIFLU-Studie (ZKB 2005) für Wohneigentum in Kombination mit dem eben erwähnten «Faktor 2» für Mietwohnungen um die besten für die Schweiz verfügbaren Annahmen. Heute muss diese Situation neu beurteilt werden, denn seit 2019 liegen beim Fluglärm erstmals auch für den Mietmarkt Ergebnisse aus hedonischen Modellen für die Flughäfen Zürich und Genf vor. Sowohl die ZKB (2019) als auch Wüest & Partner (2020) haben auf Basis ihrer hedonischen Modelle den Einfluss des Fluglärms (neben anderen Lärmquellen) auf die Mietpreise untersucht. Beide Quellen enthalten auch neuere Schätzungen zum Einfluss des Fluglärms auf die

---

<sup>191</sup> Unveröffentlicht, zitiert in SIV infos (2006), S. 10.

<sup>192</sup> ZKB Zürcher Kantonalbank (2011), S. 56 weist zwar Ergebnisse für den Mietmarkt aus, doch raten die Autoren dringend davon ab, dieses Ergebnis zu verwenden, da der Luftverkehr nicht der Fokus der Studie war und deshalb das Ergebnis für den Luftverkehr verzerrt und unbrauchbar sei.

<sup>193</sup> Die Resultate von ZKB (2005) und ZKB (2012) zeigten, dass beim Luftverkehr der Abschlag bei Eigentumswohnungen (gemäss ZKB 2005) in Zürich doppelt so hoch ist wie der gewichtete Durchschnitt aus dem Schweizer Abschlag bei Eigentumswohnungen im Strassen- und Schienenverkehr (gemäss ZKB 2012).

<sup>194</sup> Dieses Vorgehen wurde mit den Autoren der ZKB-Studie 2013 besprochen und von diesen als plausibel erachtet.

Preise von Eigentumswohnungen. Wüest & Partner kann zudem auch einen signifikanten Schätzer für Einfamilienhäuser ausweisen.

Die ZKB (2020) weist in der Ergänzung zum Schlussbericht 2019 darauf hin, dass in ihrem aktuellen hedonischen Modell der Fluglärm einfluss nur dort quantifiziert wird, wo auch tatsächlich Fluglärm vorkommt. Die übrigen Faktoren des Modells – unter anderem auch jene zum Strassen- und Schienenlärm – wurden im Vergleich zu früheren Studien deutlich verfeinert. Bezüglich Datengrundlagen und Modellspezifikation sind somit die neuesten Studien nicht mehr direkt mit den ZKB-Luftverkehrslärmstudien 2005 und 2012 (grösstenteils auf Basis von Hektardaten) vergleichbar.

Die folgende Abbildung zeigt die wichtigsten Grundlagen und Ergebnisse der drei erwähnten Studien im Vergleich.

**Abbildung 6-4: Relevante Studien zum Einfluss des Luftverkehrslärms**

	Miet- wohnungen (MWG)	Stockwerk- eigentum (SWE)	Einfamilien- häuser (EFH)	Datengrundlagen / Samplegrösse
<b>ZKB (MIFLU) 2005</b>	-	1.20% (nur Zürich)	0.87% (nur Zürich)	– nur ZH: 8'000 SWE / EFH (Transaktionen) Zeitraum: 1995-2005
<b>ZKB 2019</b>	0.23% (0.26% Genf, 0.20% Zürich) <sup>2</sup>	0.18% <sup>1</sup> (nur Zürich)	-	– CH: 820'000 MWG (Inserate) – CH: 65'000 SWE Zeitraum: 2013-2018
<b>Wüest &amp; Part- ner 2020</b>	0.02% (nur Zürich)	0.13% (nur Zürich)	0.23% (nur Zürich)	– CH: 120'000 Mietabschlüsse – CH: 55'000 SWE / 45'000 EFH Zeitraum: Q3 2015-Q2 2019

<sup>1</sup> Gemäss ZKB (2019) ist der Schätzer für Stockwerkeigentum knapp nicht signifikant. Für Genf konnte aufgrund eines zu kleinen Samples beim Stockwerkeigentum kein Ergebnis ausgewiesen werden.

<sup>2</sup> Es ist darauf hinzuweisen, dass in Zürich der  $L_{eq}$  verwendet wurde, in Genf hingegen der  $L_r$ . Dieser Unterschied ist jedoch nicht bedeutsam, da gemäss Auskunft des BAFU die beiden Lärmmasse  $L_{eq}$  und  $L_r$  bei Grossflugzeugen zu identischen Werten führen.

Auf den ersten Blick kann festgestellt werden, dass der Effekt des Luftverkehrs deutlich geringer ausfällt als er noch im Jahr 2005 auf Basis der bisherigen Modelle geschätzt wurde (ZKB 2005). Dies gilt sowohl für Stockwerkeigentumswohnungen wie auch für Mietwohnungen:

- Für **Mietwohnungen** weist die ZKB eine Abnahme von durchschnittlich 0.23% pro dB(A) für Zürich und Genf aus, Wüest & Partner eine Abnahme von 0.02% für Zürich. Bisher wurde von 0.45% ausgegangen (Basis ZKB 2005, siehe Erläuterung weiter oben). Die ZKB verwendete 2019 ein Sample von 820'000 Inseraten für Mietwohnungen, Wüest & Partner 2020 ein Sample von rund 120'000 Mietabschlüssen.
- Für **Stockwerkeigentum / Eigentumswohnungen** schätzt die ZKB eine Abnahme von 0.18% pro dB(A), wobei der Effekt knapp nicht signifikant ist. Wüest & Partner ermittelt eine signifikante Abnahme von 0.13% (Konfidenzintervall gibt Wüest & Partner nicht bekannt). Die Samplegrösse beim Stockwerkeigentum sind für beide Modelle vergleichbar (ca. 65'000

resp. ca. 55'000 Wohnungen). Bisher wurde von einem Abschlag von 1.20% ausgegangen (Basis ZKB 2005).

- Für **Einfamilienhäuser** ging man bisher von einer Abnahme um 0.87% aus (Basis ZKB 2005). Neuere Ergebnisse liegen nur aus dem Modell von Wüest & Partner (2020) vor, auf Basis eines Samples an 45'000 Einfamilienhäusern. Das Modell weist auf einen deutlich geringeren Effekt hin (0.23%).

Einer direkten Verwendung der neuen Werte von Wüest & Partner (2020) steht entgegen, dass die Ergebnisse nicht publiziert und das verwendete Modell nicht einem kritischen wissenschaftlichen Review unterzogen wurde sowie das Modell nicht spezifisch auf den Lärmeffekt ausgerichtet wurde (vgl. hierzu auch die Ausführungen zu Beginn des Kapitels 6.1.1b). Der für Mietwohnungen und Stockwerkeigentum ausgewiesene Wert für Zürich ist im Vergleich zu den übrigen Schweizer Studien (aus verschiedenen Quellen) sehr tief. Ohne die Konfidenzintervalle zu kennen, und ohne dass die Spezifikation des Modells überprüft und einem wissenschaftlichen Review unterzogen wurde, können diese Werte nicht als neuen Standard vorgeschlagen werden. Dennoch sollen die vorliegenden Ergebnisse nicht ignoriert werden. Gerade weil auch ZKB (2005) und ZKB (2019) nicht für alle benötigten Schätzer überhaupt eine Angabe zur Verfügung stellen bzw. einen signifikanten Wert liefern, muss teilweise auf Wüest & Partner (2020) zurückgegriffen werden.

Auf dieser Grundlage werden die folgenden Abschläge für den Luftverkehrslärm verwendet:

- Für **Mietwohnungen** kommt ein Abschlag von 0.23% gemäss ZKB (2019) zur Anwendung. Es handelt sich um einen signifikanten Schätzer für die Flughäfen Zürich und Genf. Das Modell und die Ergebnisse der ZKB (2019) wurden zudem einem vertieften Review durch das BAFU unterzogen und publiziert.
- Für **Stockwerkeigentum / Eigentumswohnungen** beträgt der Abschlag 0.20%. Wir stützen uns dabei im Grundsatz auf ZKB (2019) und den für Zürich berechneten Wert von 0.18%. Weil der Schätzer bei den Mietwohnungen für Genf um den Faktor 1.3 höher ist als in Zürich (vgl. Abbildung 6-4, multiplizieren wir den Zürcher Wert mit diesem Faktor und erhalten für Genf 0.23%. Durchschnittlich ergibt dies für Zürich und Genf rund 0.21%. Im Wissen, dass Wüest & Partner (2020) einen signifikanten, aber tieferen Einfluss des Fluglärms in Zürich von 0.13% finden und es sich beim Ausgangswert in ZKB (2019) für Zürcher Eigentumswohnungen um einen knapp nicht signifikanten Schätzer handelt, runden wir den Wert grob auf 0.2% ab.
- Für **Einfamilienhäuser** benutzen wir einen Abschlag von 0.35%. Da in ZKB (2019) für Einfamilienhäuser kein Schätzwert vorliegt, stützen wir uns für die Herleitung des Abschlags wie im Strassen- und Schienenverkehr auf die in Wüest & Partner ausgewiesene Relation zwischen Einfamilienhäuser und Stockwerkeigentum ab. Diese beläuft sich im Flugverkehr auf den Faktor 1.77<sup>195</sup>. Wir multiplizieren deshalb den bei Eigentumswohnungen grob festgelegten Abschlag von 0.2% mit diesem Faktor und erhalten 0.35%.

---

<sup>195</sup> In der bisher verwendeten MIFLU-Studie der ZKB (2005) fielen die Abschläge für Einfamilienhäuser deutlich tiefer aus als bei Eigentumswohnungen (Faktor 0.73). Die (signifikanten) Modellergebnisse von Wüest & Partner weisen

Der durchschnittliche Wert für **Wohneigentum** von 0.30% (vgl. Abbildung 6-2) ergibt sich aus der Gewichtung von 0.2% und 0.35% mit den Anteilen von 32.2% für Eigentumswohnungen und 67.8% für Einfamilienhäuser. Der Durchschnittswert über alle Wohnungen bei einem Mietwohnungsanteil von 64% beträgt 0.26% und liegt damit gleich hoch wie im Schienen- (und Strassen-)verkehr.

### Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse werden die folgenden Werte verwendet: Für Mietwohnungen wird ausgehend vom Konfidenzintervall in ZKB (2019) in Genf und Zürich eine Bandbreite von  $\pm 25\%$  für die hohe und tiefe Sensitivität berücksichtigt. Weil für den verwendeten Schätzer bei Eigentumswohnungen und Einfamilienhäusern keine Angabe zum Konfidenzintervall vorliegt, verwenden wir hier eine Bandbreite von  $\pm 50\%$ . Innerhalb dieser Bandbreite liegt auch der von Wüest und Partner (2020) ermittelte Wert von 0.13% bei Eigentumswohnungen und von 0.23% bei Einfamilienhäusern.

**Abbildung 6-5: Verwendete Abnahme der Wohnungspreise im Basisszenario und in den Sensitivitäten**

	Mietwoh- nungen	Stockwerkeigen- tumswohnungen	Einfamilien- häuser	Eigentums- wohnungen	Alle Woh- nungen
<b>Basisszenario</b>	<b>0.23%</b>	<b>0.20%</b>	<b>0.35%</b>	<b>0.30%</b>	<b>0.26%</b>
Hohe Sensitivität	0.29%	0.30%	0.53%	<b>0.46%</b>	<b>0.35%</b>
Tiefe Sensitivität	0.17%	0.10%	0.18%	<b>0.15%</b>	<b>0.17%</b>

## 6.1.2 Festlegung der Preisniveaus von Wohnungen

Das Kapitel 6.1.2 muss 2023 / 2024 aktualisiert werden (wohl auf das Jahr 2021).

Um die Abnahme einer bestimmten Prozentzahl des Wohnungspreises pro dB(A) in Geldeinheiten ausdrücken zu können, muss das Preisniveau für Wohnungen bekannt sein bzw. ermittelt werden (vgl. Schritt 2 in Abbildung 4-3).

Für die Mietwohnungen können die regelmässig vom BFS publizierten durchschnittlichen Mietpreise verwendet werden.<sup>196</sup> Wie im Exkurs oben erläutert, werden dabei kantonal differenzierte Mietpreise verwendet.

sowohl 2013 als auch 2020 auf eine umgekehrte Rangfolge hin (Faktor 1.77 (Jahr 2020) beim Luftverkehrslärm, Faktor 3.27 (Jahr 2013) bzw. 1.27 (2020) beim Strassenlärm und Faktor 2.03 / 1.29 beim Schienenlärm).

<sup>196</sup> Dabei handelt es sich um sogenannte Bestandesmieten, nicht um Marktmieten. Die Marktmiete ergibt sich auf dem Markt, wenn Wohnungen neu vermietet werden. Bleibt ein Mieter aber lange in seiner Wohnung, so gibt das Schweizer Mietrecht vor, wie die Mieten bei bestehenden Mietverhältnissen angepasst werden können. Deshalb liegt die Bestandesmiete – insbesondere bei langer Mietdauer – unter der Marktmiete. Mit der Verwendung der Bestandesmiete werden die Zahlungsbereitschaften bzw. die Lärmkosten eher unterschätzt.

Für Eigentumswohnungen gibt es verständlicherweise keine offiziellen Mietpreise, sondern nur Angaben zum Eigenmietwert. Diese für die Steuerbemessung erhobene Grundlage unterschätzt aber den wahren Wert je nach Kanton in unterschiedlichem Ausmass.<sup>197</sup> Auch beim BFS sind keine Daten zu durchschnittlichen Preisen von Eigentumswohnungen verfügbar.<sup>198</sup> Um den Preis von Eigentumswohnungen dennoch approximativ bestimmen zu können, wird wie folgt vorgegangen (die Berechnung erfolgt wiederum differenziert nach Kantonen):

- Das BFS publiziert die Mietpreise für Mietwohnungen differenziert nach der Anzahl Zimmer der Wohnung.
- Zudem publiziert das BFS das Gesamttotal aller Wohnungen nach Anzahl Zimmer der Wohnung.<sup>199</sup>
- Aus diesen beiden Datensätzen kann der durchschnittliche Preis aller Wohnungen berechnet werden,<sup>200</sup> der deutlich über dem durchschnittlichen Mietpreis der Mietwohnungen liegt (im Jahr 2019 im Durchschnitt um 11%, je nach Kanton um -1% (GE) bis 18% (JU)).
- Wird zudem die Wohneigentumsquote des BFS (im Jahr 2019) mitberücksichtigt (36.4%, je nach Kanton 16% (BS) bis 57% (AI)), kann aus dem Preis der Mietwohnung und dem Preis aller Wohnungen der Preis der Eigentumswohnungen abgeschätzt werden, der im Durchschnitt um 30% (je nach Kanton um -5% (GE) bis 49% (VD)<sup>201</sup>) über dem Durchschnittspreis der Mietwohnungen liegt.

Mit dieser Abschätzung wird der Preis von Eigentumswohnungen eher unterschätzt, da Eigentumswohnungen im Durchschnitt besser ausgestattet sind als Mietwohnungen (höhere Ansprüche an Eigentumswohnungen). In die Abschätzung flossen jedoch nur die unterschiedliche Zimmerzahl nicht aber Unterschiede in der Ausstattung ein.

Die sich ergebenden Wohnungspreise nach Kantonen im Jahr 2019 sind in der folgenden Abbildung in der zweiten bis vierten Spalte dargestellt: Die Mietpreise pro Monat liegen bei 1'362 CHF (je nach Kanton 939 (JU) bis 1'818 CHF (ZG)). Der Durchschnittspreis aller Wohnungen liegt bei 1'512 CHF (je nach Kanton 1'104 (JU) bis 1'971 CHF (ZG)), derjenige der Eigentumswohnungen gar bei 1'774 CHF (je nach Kanton 1'273 (JU) bis 2'286 CHF (ZG)).

Wie oben erwähnt, kann aber in sonBASE nicht zwischen Miet- und Eigentumswohnungen differenziert werden. Deshalb ist wie bei der Abnahme der Wohnungspreise ein Durchschnitt aus Miet- und Eigentumswohnungen zu bilden. Dabei wird wie bei der Abnahme der Wohnungspreise berücksichtigt, dass 66% der Mietwohnungen belärmt sind (gemäss ZKB), aber

---

<sup>197</sup> FPRE Fahrländer Partner AG (2013).

<sup>198</sup> Das BFS publiziert zwar seit November 2020 einen Preisindex für Eigentumswohnungen und Einfamilienhäuser. Auf Nachfrage beim BFS wird ausschliesslich ein Immobilienpreisindex publiziert, die Daten zur Ermittlung eines Durchschnittspreises liegen dem BFS aber nicht vor.

<sup>199</sup> Die Anzahl Wohnungen nach Anzahl Zimmer und differenziert nach Eigentums- und Mietwohnungen sind nicht verfügbar.

<sup>200</sup> Dabei muss vereinfachend angenommen werden, dass Miet- und Eigentumswohnungen bei gleicher Zimmerzahl den gleichen Preis erzielen.

<sup>201</sup> GE erreicht als Ausreisser -3%.

nur 53% der Eigentumswohnungen.<sup>202</sup> Der Durchschnittspreis einer belärmten Wohnung beträgt somit 1'492 CHF (je nach Kanton 1'086 (JU) bis 1'949 CHF (ZG) – vgl. fünfte Spalte in Abbildung 6-6).

**Abbildung 6-6: Durchschnittliche Wohnungspreise in CHF pro Monat im Jahr 2019**

Kanton	Miet- wohnungen	Alle Wohnungen	Eigentums- wohnungen	Belärmte Wohnungen	Belärmte Wohnung ohne Lärm
Zürich	1'592	1'751	2'164	1'727	1'744
Bern	1'223	1'346	1'540	1'330	1'339
Luzern	1'368	1'507	1'773	1'488	1'499
Uri	1'210	1'316	1'456	1'303	1'314
Schwyz	1'552	1'758	2'074	1'732	1'748
Obwalden	1'347	1'411	1'482	1'404	1'411
Nidwalden	1'480	1'589	1'755	1'575	1'587
Glarus	1'169	1'275	1'407	1'262	1'269
Zug	1'818	1'971	2'286	1'949	1'963
Freiburg	1'227	1'378	1'585	1'360	1'368
Solothurn	1'183	1'359	1'554	1'339	1'351
Basel-Stadt	1'322	1'418	1'928	1'402	1'409
Basel-Landschaft	1'411	1'613	1'869	1'589	1'605
Schaffhausen	1'178	1'350	1'592	1'329	1'338
Appenzell A.Rh.	1'200	1'378	1'580	1'357	1'370
Appenzell I.Rh.	1'277	1'426	1'539	1'412	1'422
St.Gallen	1'235	1'393	1'625	1'373	1'385
Graubünden	1'247	1'323	1'419	1'314	1'320
Aargau	1'367	1'553	1'761	1'532	1'548
Thurgau	1'245	1'392	1'569	1'375	1'385
Tessin	1'179	1'310	1'524	1'293	1'307
Waadt	1'367	1'569	2'043	1'539	1'553
Wallis	1'133	1'238	1'325	1'227	1'235
Neuenburg	1'002	1'140	1'458	1'120	1'129
Genf	1'453	1'440	1'382	1'442	1'465
Jura	939	1'104	1'273	1'086	1'091
<b>Total (Schweiz)</b>	<b>1'362</b>	<b>1'512</b>	<b>1'774</b>	<b>1'492</b>	<b>1'505</b>

Schliesslich ist noch zu berücksichtigen, dass die Daten des BFS zu den tatsächlichen Mietpreisen die Abnahme der Mietpreise aufgrund des Lärms bereits beinhalten. Ausgangsbasis

<sup>202</sup> In den bisherigen Berechnungen ging man davon aus, dass 63% der Mietwohnungen und 15% der Eigentumswohnungen belärmt sind. Der Anteil der belärmten Eigentumswohnungen ist also gemäss den neusten Ergebnissen der ZKB deutlich höher als bisher (53% statt 15%). Für die bisherigen Ergebnisse im Jahr 2015 führt diese Erhöhung zu einer Zunahme der Reduktion der Wohnungspreise um ca. einen Drittel. Gemäss ZKB Zürcher Kantonalbank (2020, S. 8) war die bisherige Zahl von 15% jedoch falsch, was auf eine missverständliche Formulierung der ZKB zurückzuführen war. Tatsächlich waren es bisher 49%.

für die Ermittlung des Minderwertes einer belärmten Wohnung muss jedoch der Wohnungspreis ohne Lärm sein.<sup>203</sup> Der lärmfreie Wohnungspreis liegt im Durchschnitt um **0.86%** über jenem einer belärmten Wohnung (je nach Kanton beläuft sich die Differenz auf **0.4% (JU)** bis **1.6% (GE)** – vgl. letzte Spalte in Abbildung 6-6).<sup>204</sup> Damit würde sich der durchschnittliche Wohnungspreis einer belärmten Wohnungen bei Wegfall des Lärms auf **1'505 CHF** pro Monat belaufen (je nach Kanton auf **1'091 (JU)** bis **1'963 CHF (ZG)**).

## 6.2 Gesundheitskosten

Das gesamte Kapitel 6.2 muss 2023 / 2024 aktualisiert werden (wohl auf das Jahr 2021).

### 6.2.1 Allgemeines

Für die Kostensätze zu den Gesundheitskosten (vgl. Schritt 6 in Abbildung 4-4) ist darauf zu achten, dass in den verschiedenen Bereichen von externen Effekten (Gesundheitskosten durch Lärm- und Luftbelastung sowie Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs) mit methodisch gleichwertigen Kostensätzen gerechnet wird. Werden in den verschiedenen Bereichen dieselben Krankheitsbilder betrachtet, so sind auch dieselben Kostensätze zu verwenden. Deshalb können die Kostensätze teilweise direkt aus den bisherigen Arbeiten für das ARE<sup>205</sup> übernommen werden und müssen ansonsten nach derselben Methodik wie bisher erhoben werden.

### 6.2.2 Medizinische Heilungskosten

Die Spitalkosten (ausser für Depression) beruhen in den anderen Bereichen der externen Effekte auf offiziellen BFS-Daten, konkret der „Statistik diagnosebezogener Fallkosten“ nach APDRG (All Patient Diagnosis Related Groups).<sup>206</sup> Das BFS weist die Spitalkosten sowie die durchschnittlichen Aufenthaltsdauern im Spital (Grundlage: 455'967 Fälle) und die Anzahl Fälle (Grundlage: 1'322'786 Fälle) für 878 verschiedene Diagnosen aus.<sup>207</sup> Gemäss Auskunft des BFS enthalten die Kostenzahlen nur die Kosten in der allgemeinen Abteilung. Um auch die

<sup>203</sup> In den hedonischen Modellen, die für die Ermittlung der Abnahme des Wohnungspreises durch den Lärm verwendet werden, ist die Ausgangsbasis ein Wohnungspreis ohne Lärm.

<sup>204</sup> Dabei stammen **0.67% (0.4% (UR) bis 1.3% (GE))** aus dem Strassenverkehr, **0.12% (0.01% (JU) bis 0.5% (UR))** aus dem Schienenverkehr und **0.06% (0.00% (viele Kantone) bis 0.25% (GE))** aus dem Luftverkehr. – *berechnet mit provisorischen Daten zum Lärm – nicht belastbar*

<sup>205</sup> Ecoplan; Infrac (2014); Infrac; Ecoplan (2019)

<sup>206</sup> Diese Daten stammen aus dem Jahr 2010 und konnten für das Berichtsjahr 2015 nicht aktualisiert werden (in Infrac, Ecoplan 2019), weil seit 2011 die Datengrundlagen vom BFS nicht mehr nach APDRG ermittelt werden. Bei der Aktualisierung auf das Berichtsjahr 2021 müssen diese Zahlen umfassend aktualisiert werden. Für die jetzigen Berechnungen muss aus Konsistenzgründen zu den anderen Bereichen der externen Effekte darauf verzichtet werden.

<sup>207</sup> Spitalkosten: BFS (2013), Statistik diagnosebezogener Fallkosten. Aufenthaltsdauer und Anzahl Fälle: BFS (2012), Medizinische Statistik der Krankenhäuser.

Kosten der Halbprivat- und Privatabteilung zu berücksichtigen, müssen die Kostenzahlen gemäss APDRG mit einem Faktor 1.11 hochgerechnet werden.<sup>208</sup> Ausgehend von den relevanten Krankheitsbildern für lärmbedingte Gesundheitsschäden wurden die durchschnittlichen Spitalkosten pro Spitaltag ermittelt.

Für die Depression muss auf andere Daten zurückgegriffen werden, da die APDRG-Daten auf 50 Spitälern ohne Rehabilitation und Psychiatrie beruhen. Für Depressionen sind jedoch psychiatrische Kliniken von Bedeutung. Deshalb werden die Daten verwendet, die im Bereich Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs hergeleitet wurden: Die Daten basieren auf einer Spezialauswertung der Medizinischen Statistik der Krankenhäuser.<sup>209</sup>

Die Ergebnisse werden in der folgenden Abbildung dargestellt: Pro Spitalaufenthalt liegen die Kosten im Jahr 2019<sup>210</sup> je nach Krankheitsbild zwischen 8'400 CHF und 40'000 CHF. Umgelegt auf den Spitaltag belaufen sich die Kosten auf 900 bis 1'450 CHF. Sie variieren deutlich weniger stark als die Kosten pro Spitalaufenthalt. Dies ergibt sich aufgrund der Aufenthaltsdauer, die je nach Krankheitsbild deutliche Unterschiede aufweist (zwischen 9.2 und 33.4 Tagen).

**Abbildung 6-7: Spitalkosten durch lärmbedingte Krankheitsbilder**

Fälle und Aufenthaltsdauern im Jahr 2010 Kostensätze für das Jahr 2019	HerzKreis- lauferkran- kungen	Diabe- tes	Depres- sion
Anzahl relevante Krankheitsbilder	84	3	n.a.
Anzahl relevante Fälle	143'074	3'411	23'083
<b>Durchschnittliche Kosten pro Spitalaufenthalt in CHF</b>	<b>13'268</b>	<b>8'373</b>	<b>39'961</b>
Durchschnittliche Aufenthaltsdauer in Tagen	9.16	9.34	33.43
<b>Kosten pro Spitaltag in CHF</b>	<b>1'448</b>	<b>896</b>	<b>1'196</b>

n.a. = not available (nicht verfügbar)

<sup>208</sup> BFS (2017), Kosten und Finanzierung des Gesundheitswesens 2015: Hochrechnung der Spitalkosten ohne Leistungen von Privatversicherungen auf die gesamten Spitalkosten. Der verwendete Faktor von 1.11 wurde mit den BFS-Fachleuten abgesprochen.

<sup>209</sup> Ecoplan; Infrac (2014), S. 499. Für Details siehe dort.

<sup>210</sup> Die Hochrechnung auf 2019 erfolgt über die Kostenentwicklung der Spitalleistungen (BAG, Statistik der obligatorischen Krankenversicherungen).

### 6.2.3 Produktionsausfall

Der Bruttoproduktionsausfall im Jahr 2019 wird wie folgt ermittelt:<sup>211</sup> Ausgangslage bilden das verfügbare Bruttoeinkommen (438'668 Mio. CHF) im Jahr 2019<sup>212</sup> sowie die Zahl der Erwerbstätigen (ab Alter 15: 4'506'078 Erwerbstätige<sup>213</sup>). Daraus ergibt sich ein Bruttoproduktionsausfall von 91'605 CHF pro erwerbstätige Person und Jahr (zu Faktorpreisen<sup>214</sup>). Dazu ist noch die Zunahme der betrieblichen Vorsorgeansprüche (36'746 Mio. CHF) zu rechnen, die sich pro Erwerbstätigen auf 7'673 CHF belaufen. Dies ergibt einen Bruttoproduktionsausfall (inkl. Vorsorgeansprüche) von insgesamt 99'278 CHF pro Jahr und Erwerbstätigen oder 272 CHF pro Tag und Erwerbstätigen.

Neben dem Kostensatz pro Jahr (bzw. Tag) muss auch die Anzahl der verlorenen Erwerbsjahre bei Todesfällen bzw. der Dauer des Erwerbsausfalls bei Hospitalisationen bestimmt werden:

- Verlorene Erwerbsjahre: Bei der Berechnung der verlorenen Lebensjahre wird gleichzeitig auch die Anzahl der verlorenen Erwerbsjahre genau bestimmt.
- Hospitalisationen: Für die Bestimmung der Ausfalltage durch Spitalaufenthalte wird die amerikanische "Official Disability Guideline" verwendet.<sup>215</sup> Diese enthält die Anzahl der Ausfalltage pro Erwerbstätigen sehr detailliert für verschiedene Krankheitsbilder nach ICD10-Codes.<sup>216</sup> Aus dieser Datengrundlage können die Ausfalltage eines Erwerbstätigen für Diabetes (19 Tage) und Depression (35 Tage) abgelesen werden. Für Herz- / Kreislaufkrankungen wird ein gewichteter Durchschnitt pro Hospitalisation bestimmt (65 Tage).

Viele Spitaltage betreffen jedoch nicht Erwerbstätige, sondern z.B. Senioren, bei denen kein Produktionsausfall entsteht. Der Anteil der Spitaltage bei Erwerbstätigen beläuft sich bei Herz- / Kreislaufkrankungen auf 33%, bei Diabetes auf 36% und bei Depression auf 64%.<sup>217</sup> Die Kostensätze pro Hospitalisation betragen folglich

– Herz- / Kreislaufkrankungen	5'777 CHF
– Diabetes	1'832 CHF
– Depression	5'977 CHF

<sup>211</sup> Der Berechnungshergang ist identisch mit den bisherigen Berechnungen.

<sup>212</sup> Von BFS-Homepage: Tabelle T 4.2.4: Verfügbares Einkommen und Ersparnis der privaten Haushalte und PöoE.

<sup>213</sup> Spezialauswertung durch das BFS aus bisherigen Arbeiten übernommen, um Konsistenz zu anderen Bereichen der externen Effekte zu wahren.

<sup>214</sup> Es werden Faktorpreise berechnet, bei denen die indirekten Steuern herausgerechnet werden. Dazu wird durch 1.063 dividiert (aus Input-Output-Tabelle des BFS). Also: 91'605 CHF = 438'668 \* 1'000'000 / 4'506'078 / 1.063.

<sup>215</sup> Work Loss Data Institute (2013)

<sup>216</sup> Die Übertragung der Daten von der USA auf die Schweiz ist natürlich mit Unsicherheiten verbunden, doch führt sie gemäss Angabe einer grösseren Krankenkasse im Jahr 2013 – welche die Datenquelle ihren eigenen Berechnungen zugrunde legt – eher zu einer Unterschätzung der Ausfalltage, weil in den USA mit weniger guten Sozialversicherungen der Druck, wieder zu arbeiten, höher ist als in der Schweiz.

<sup>217</sup> Für die drei Altersklassen 15-39 Jahre, 40-69 Jahre und ≥70 Jahre wird einerseits die Zahl der Hospitalisationen und andererseits der Anteil der Erwerbstätigen an der Bevölkerung bestimmt. Daraus lässt sich ein Durchschnitt über alle Altersklassen bilden. Dieser liegt bei Depressionen mit 64% deutlich höher, weil es bei den Senioren nur noch relativ wenige Hospitalisationen wegen Depressionen gibt.

Entsprechend dem at least Ansatz wird nicht berücksichtigt, dass die Arbeitsproduktivität vor oder nach der Arbeitsabwesenheit kleiner sein könnte.

#### 6.2.4 Wiederbesetzungskosten

Nach Todesfällen von Erwerbstätigen müssen deren Stellen neu besetzt werden. Aus einer Umfrage ist bekannt, dass die Wiederbesetzungskosten ca. 50% des Jahreslohnes ausmachen.<sup>218</sup> Zusammen mit dem durchschnittlichen Jahreseinkommen (gemäss BFS) folgt daraus, dass die Wiederbesetzungskosten für erwerbstätige Männer / Frauen 40'227 / 33'687 CHF betragen (zu Faktorpreisen).<sup>219</sup>

Wiederbesetzungskosten entstehen nur, wenn jemand dauerhaft nicht mehr arbeiten kann. Im Bereich der hier betrachteten Krankheitsbilder ist dies nur bei den Todesfällen der Fall. Im Rahmen der Berechnung der verlorenen Lebensjahre wird auch bestimmt, wie viele Todesfälle von Erwerbstätigen zu beklagen sind (differenziert nach Geschlecht). Die dort ermittelte Zahl der Todesfälle kann direkt mit den hier hergeleiteten Kostensätzen multipliziert werden.

#### 6.2.5 Immaterielle Kosten

Wiederum ist darauf zu achten, dass die Berechnungen konsistent sind zu den anderen Bereichen der externen Kosten. So wird für die verlorenen Lebensjahre von demselben Kostensatz ausgegangen wie in den anderen Bereichen: 248'200 CHF (im Jahr 2019 – VLYL value of life year lost).<sup>220</sup>

Auch die immateriellen Kosten von Hospitalisationen von einigen Krankheitsbildern können bzw. müssen von den Arbeiten in den Bereichen der externen Effekte übernommen werden: Für die drei Krankheitsbilder **Herz- / Kreislauferkrankungen, Diabetes und Depression** wird in den anderen Bereichen ein Kostensatz von **860 CHF pro Spitaltag** (für 2019) verwendet, der aus Konsistenzgründen auch hier angewendet wird.<sup>221</sup> Auf eine Differenzierung nach den drei Krankheitsbildern wird verzichtet, da hierzu keine spezifischen Kostensätze vorliegen. Deshalb wurde – entsprechend dem at least Ansatz – dasjenige Krankheitsbild verwendet mit den geringsten Kosten pro Spitaltag.<sup>222</sup> Dieser Kostensatz wurde ursprünglich für Atemwegs- und Herz- / Kreislauferkrankungen erhoben.<sup>223</sup>

---

<sup>218</sup> Ecoplan (2002), S. 42

<sup>219</sup> Diese Kostensätze werden auch in den anderen Bereichen der externen Effekte verwendet.

<sup>220</sup> Im Rahmen einer Sensitivität wird auch der Wert eines frühzeitigen Todesfalles von 6.91 Mio. CHF (VOSL value of statistical life) verwendet. Beide Werte wurden für 2015 in Infrac; Ecoplan (2019) hergeleitet und gemäss der dort beschriebenen Methodik auf 2019 fortgeschrieben.

<sup>221</sup> Ob und wie diese Kostensätze zu überarbeiten sind, ist in der Gesamtüberarbeitung aller externen Effekte für das Berichtsjahr 2021 zu überprüfen.

<sup>222</sup> Derselbe Kostensatz wurde für elf verschiedene Krankheitsbilder – mit derselben Begründung – auch bereits bei der Bewertung der Gesundheitskosten des Passivrauchens angewendet (ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin am Schweizerischen Tropeninstitut Basel); Ecoplan; Lungenliga Schweiz (2009)).

<sup>223</sup> Thayer; Chestnut; Lazo; u. a. (2003), S. 59 und xi

## 6.2.6 Zusammenfassung der verwendeten Kostensätze

Die folgende Abbildung fasst die verwendeten Kostensätze zusammen. Dabei ist zu beachten, dass die Kostensätze nicht immer auf die gleiche Einheit zurückgreifen (Kosten pro Lebensjahr oder Erwerbsjahr bzw. pro Hospitalisation oder Spitaltag).

Abbildung 6-8: Übersicht über die verwendeten Kostensätze (in CHF im Jahr 2019)

	CHF pro	Medizinische Behandlungskosten	Bruttproduktions- ausfall	Widerbesetzungs- kosten	Immaterielle Kosten	Total
Verlorenes Lebensjahr	Lebensjahr	-	-	-	248'229	248'229
Verlorenes Erwerbsjahr	Erwerbsjahr	-	99'278	-	-	99'278
Pro Todesfall einer erwerbstätigen Person (Mann / Frau)	Todesfall	-	-	40227 / 33687	-	40227 / 33687
<b>Herz- / Kreislauferkrankungen</b>						
- Hospitalisationen	Hospitalisation	-	5'777	-	-	5'777
- Anzahl Spitaltage	Spitaltag	1'448	-	-	858	2'306
<b>Diabetes</b>						
- Hospitalisationen	Hospitalisation	-	1'832	-	-	1'832
- Anzahl Spitaltage	Spitaltag	896	-	-	858	1'754
<b>Depression</b>						
- Hospitalisationen	Hospitalisation	39'961	5'977	-	-	45'939
- Anzahl Spitaltage	Spitaltag	-	-	-	858	858

## 6.3 Internalisierungsbeiträge

Bei den Internalisierungsbeiträgen im Lärmbereich gilt es zu unterscheiden zwischen Lärmschutzwänden, Schallschutzfenstern und den Lärmabgaben im Flugverkehr. Der Umgang mit diesen Massnahmen wird nachstehend kurz erläutert:

- **Lärmschutzwände:** Die im Strassen- und Schienenverkehr erstellten Lärmschutzwände sind in den Grunddaten von sonBASE enthalten. Die Anzahl belärmter Wohnungen bzw. Personen wird dementsprechend unter Berücksichtigung dieser Lärmschutzmassnahmen ermittelt. Folglich entsprechen die Lärmkosten aus Belästigungen und Gesundheitsschäden den verbleibenden Restkosten, nach Berücksichtigung der ergriffenen Lärmschutzmassnahmen.  
Dieses Vorgehen ergibt ein konsistentes Ergebnis, da die Erstellung der Lärmschutzwände bei der Ermittlung der Infrastrukturkosten in die Berechnungen für die Verkehrsträger Strassen- und Schienenverkehr einfließt (vgl. auch Kapitel 3.1).<sup>224</sup>
- **Schallschutzfenster:** Der Einbau von Schallschutzfenstern führt dazu, dass der Verkehrslärm weniger störend wirkt. Die Wirkung von Schallschutzfenstern sind im Effektschätzer enthalten (sowohl in Bezug auf die Wohnungspreise als auch auf die Gesundheitsschäden), weil Wohnungen mit und ohne Schallschutzfenster in die Erhebung einfließen und in den

<sup>224</sup> Rein theoretisch könnten die Lärmkosten in einem ersten Schritt nach dem Bruttoprinzip (also ohne Beachtung der Lärmschutzwände) ermittelt und anschliessend den verbleibenden Lärmkosten unter Beachtung der Lärmschutzwände gegenübergestellt werden. Dieses Vorgehen wäre jedoch auf Seite sonBASE mit einem sehr hohen Aufwand verbunden, ohne dass sich am Nettoergebnis der verbleibenden externen Lärmkosten etwas ändern würde.

Schätzungen nicht zwischen Wohnungen mit bzw. ohne Schallschutzfenster differenziert werden kann.<sup>225</sup> Die eingebauten Schallschutzfenster führen deshalb dazu, dass die Effektschätzer tendenziell geringer ausfallen. Folglich werden die Kosten für Schallschutzfenster bei der Ermittlung der Lärmkosten nicht in Abzug gebracht, da es sonst (aufgrund des tendenziell bereits verminderten Effektschätzer) zu einer doppelten Anrechnung dieser Internalisierungsmassnahme käme.

- **Lärmabgabe im Flugverkehr:** Lärmabgaben (lärmabhängige Landegebühren, insbesondere in Zürich und Genf) werden als Internalisierungsbeitrag berücksichtigt. Mittels einer Umfrage bei allen Landesflughäfen und allen Regionalflugplätzen (über das BAZL) wurde ermittelt, dass die Einnahmen aus den lärmabhängigen Landegebühren im Jahr 2019 insgesamt **21.4 Mio. CHF** betragen.<sup>226</sup>

Schliesslich ist zu erwähnen, dass die LSVA bei der Berechnung der externen Effekte erst ganz am Schluss abgezogen wird, da sie nicht einfach auf Luftbelastung, Lärm etc. verteilt werden kann.<sup>227</sup> Im vorliegenden Bericht wird deshalb auf den Abzug der LSVA verzichtet. Die LSVA wird aber berücksichtigt, wenn das ARE die gesamten externen Effekte im Jahr 2019 berechnet.

---

<sup>225</sup> Sowohl die Auswertungen in sonBASE als auch alle Lärmstudien beruhen auf dem Aussenlärm. Dies bedeutet, dass die Dosis-Wirkungs-Beziehungen auf Basis des Aussenlärms und der im Gebäudeinnern auftretenden Störungen / Krankheiten ermittelt werden.

<sup>226</sup> Dabei werden in Basel die gesamten lärmabhängigen Landegebühren von 1.2 Mio. CHF vollumfänglich als Internalisierungsbeitrag berücksichtigt, obwohl ein Grossteil des Lärms nicht in den Berechnungen zu den externen Lärmkosten enthalten ist, weil die Lärmbelastung nicht in der Schweiz anfällt und daher nicht in den sonBASE-Daten enthalten ist.

<sup>227</sup> Infrac; Ecoplan (2019), S. Kapitel 16

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Überblick Gesamtverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

### 7.2 Strassenverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

### 7.3 Schienenverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

### 7.4 Luftverkehr

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

### 7.5 Ergebnisse pro Leistungseinheit

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

## 8 Sensitivitätsanalyse

### 8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Für die Ermittlung der Lärmkosten ist es unumgänglich, bei verschiedenen Berechnungsschritten Annahmen zu treffen. Dies vor allem weil die Modellberechnungen / Erhebungen mit Unsicherheiten verbunden sind (z.B. Auswertungen sonBASE, Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, Höhe der Zahlungsbereitschaft).

Wie in Kapitel 2 erläutert, verwenden wir bei Unsicherheiten wo möglich und sinnvoll eine best-mögliche Schätzung (best guess). Ansonsten beruht der Wert auf einer vorsichtigen Schätzung (at least Ansatz). In der Abbildung 8-1 fassen wir die wesentlichen Unsicherheiten im Lärmbereich zusammen:

Abbildung 8-1: Übersicht über Inputdaten, Annahmen und Bandbreiten bei den Lärmkosten

Bereich / Annahme	Wissenstand	Vorgehen	Bandbreite
<b>Lärmbelastung</b>			
Fahrleistungen pro Fahrzeugtyp	Gesichertes Wissen	Datenauswertung	
Strassenverkehr ZKB-Lärmass ( $\pm 4.2$ dB(A))	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-XX% / +YY%
Schieneverkehr ZKB-Lärmass ( $\pm 3.0$ dB(A))	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-XX% / +YY%
Luftverkehr Taglärm Wohnungen ( $\pm 2.5$ dB(A))	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-XX% / +YY%
Strassenverkehr $L_{DEN}$ ( $\pm 4.2$ dB(A))	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-XX% / +YY%
Schieneverkehr $L_{DEN}$ ( $\pm 3.0$ dB(A))	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-XX% / +YY%
Luftverkehr $L_{DEN}$ ( $\pm 2.5$ dB(A))	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-XX% / +YY%
<b>Belastung-Wirkungs-Beziehungen</b>			
Reduktion Wohnungspreise pro dB(A) Strassen- / Schienen- / Luftverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	$\pm 9\%$ $\pm 26\%$ $\pm 36\%$
Wohnungspreise: ZKB-Lärmass statt $L_{den}$ , Faktor 2 im Luftverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Herz- / Kreislaufkrankheiten	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	$\pm XXX\%$
Diabetes	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-49% / +49%
Depression	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-100% / +159%
<b>Wertgerüst Gesundheitskosten</b>			
Immaterielle Kosten bei verlorenen Lebensjahren	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	$\pm 50\%$
Immaterielle Kosten für Krankheiten	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	$\pm 50\%$
Übriges Wertgerüst	Wissen mit Unsicherheiten	at least	
2023 / 2024 noch anpassen			

- Die Unsicherheit in der Lärmbelastung ergibt sich aus den Modellunsicherheiten in der Lärmdatenbank sonBASE (vgl. Kapitel 5.1.5). Im Strassenverkehr liegen die Unsicherheiten in der Grössenordnung von gut  $\pm XX\%$ , im Schienenverkehr bei knapp  $\pm YY\%$  und im Luftverkehr lediglich bei  $\pm ZZ\%$ .
- Die Unsicherheiten in der Reduktion der Wohnungspreise können aufgrund verschiedener Studien auf ca.  $\pm 10\%$  im Strassenverkehr sowie  $\pm 25\%$  bzw.  $\pm 35\%$  Schienen- und Luftverkehr festgelegt werden (vgl. Kapitel 6.1.1). **Erläuterung Sensitivität ZKB-Lärmass folgt 2023 / 2024**
- Die Unsicherheiten bei den Belastungs-Wirkungsbeziehungen zu den lärmbedingten Krankheiten leiten sich von den 95%-Konfidenzintervallen der meta-analytischen Effektschätzer ab.<sup>228</sup> Die Unsicherheiten liegen hier je nach Effektschätzer in einer Bandbreite von  $-50\%$  bis  $+50\%$ , sie können aber zum Teil auch deutlich grösser sein und eine Spannweite von  $-100\%$  bis  $+160\%$  umfassen.
- Bei den immateriellen Kosten, die auf Umfrageergebnissen zu Zahlungsbereitschaften beruhen, sind ebenfalls grössere Unsicherheiten vorhanden: Der VLYL (value of life year lost) und die übrigen immateriellen Kosten schwanken um je  $\pm 50\%$ .

## 8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

**Erläuterungen folgen 2023 / 2024**

## 8.3 Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen

Es ist nochmals zu betonen, dass in dieser Studie **nur** die Auswirkungen des **Lärms am Wohnort** ermittelt werden. **Weitere Lärmkosten** werden **nicht berücksichtigt**. Dazu zählen gemäss der Zusammenstellung in Kapitel 3 insbesondere folgende Kosten:

- Auswirkungen des Lärms in Schutz- und Erholungsgebieten
- Auswirkungen des Lärms am Arbeitsplatz sowie in der Schule (eine Grobschätzung zeigt, dass Lernschwierigkeiten zu zusätzlichen Lärmkosten im Umfang von ca. 290 Mio. CHF führen könnten<sup>229</sup>)
- Verluste durch Auszonung oder Nicht-Einzonung von Grundstücken
- Kosten von Schallschutzmassnahmen<sup>230</sup>

---

<sup>228</sup> Nicht berücksichtigt sind individuelle Adaptionenmassnahmen wie Schallschutzfenster, das Schliessen von Fenstern oder das Tragen von Ohrstöpseln. Es ist zu beachten, dass solche Massnahmen in den Originalstudien implizit mitberücksichtigt sind.

<sup>229</sup> Basierend auf Ergebnissen der WHO World Health Organisation (2011) wurde berechnet, dass der Strassenverkehr im Jahr 2010 durch Lernschwierigkeiten bei Kindern 915 DALY (disability adjusted life years) verursachte, der Schienenverkehr 212 DALY und der Luftverkehr 30 DALY, insgesamt also 1'157 DALY (Ecoplan (2014)). Wird dies mit dem VLYL (value of life year lost) von 2019 von 252'000 CHF umgerechnet ergibt sich eine Grobschätzung von ca. 290 Mio. CHF für den Gesamtverkehr.

<sup>230</sup> Die staatlich getragenen Kosten für Lärmschutzwände, Flüsterbeläge und Schallschutzfenster werden in der Strassenrechnung des BFS berücksichtigt. Privat getragene Kosten (z.B. für Schallschutzfenster) fehlen hingegen.

- Lärmfluchtkosten
- Baulärm
- Lärm auf dem Flugplatz
- Kosten in Freizeit und Tourismus
- Auswirkungen auf die Fauna

**Deshalb unterschätzen die ausgewiesenen Lärmkosten die tatsächlich durch den Lärm verursachten externen Kosten klar.**

Ausserdem werden in einigen Bereichen gemäss dem at least Ansatz konservative Annahmen getroffen, die zu einer **weiteren Unterschätzung der Lärmkosten** führen. Folgende Faktoren sprechen für diese Einschätzung:

### **Lärmbelastung**

- Zumindest einige Personen fühlen sich auch durch **Lärm unterhalb des Schwellenwertes** (45 bzw. 50 dB(A)  $L_{den}$  bzw. 50 dB(A) Taglärm) gestört. Die **Störwirkung** (die langfristig auch gesundheitliche Auswirkungen haben kann) tritt insbesondere bei einem Aufenthalt im Garten / auf dem Balkon auf. Auch seltene Ereignisse wie ein Flugzeug oder eine Zugsdurchfahrt (deren durchschnittliches Lärmniveau aufgrund der Seltenheit tief ist) führen zu Belästigungen und damit zu einer Zahlungsbereitschaft für deren Vermeidung.
- Beim Flughafen Basel wird nur der Lärm auf Schweizer Territorium (kleiner Teil des Lärms) berücksichtigt (weil nur Daten für die Schweiz vorhanden sind).
- Gewisse Gebäude bzw. Personen werden von **mehreren Lärmquellen** (Strassen-, Schienen- und Luftverkehr) gleichzeitig belastet. Es gibt epidemiologische Studien, die darauf hinweisen, dass die gesundheitsschädigenden Effekte bei diesen Mehrfachbelasteten grösser sein dürften, als wenn – wie in dieser Studie durchgeführt – nur jeweils die Lärmbelastung der einzelnen Lärmquellen separat berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.3).

### **Belästigungen**

- Neben der Reduktion der Wohnungspreise dürfte es auch noch andere lärmbedingte Mehrkosten geben wie z.B. **erhöhter Leerstand** der Wohnung wegen Lärm oder **erhöhte Mieterfluktuationen**. Diese zusätzlichen Effekte sind hier nicht berücksichtigt.
- Bezüglich der **Schlafstörungen** wird vereinzelt die Meinung vertreten, dass die Reduktion der Wohnungspreise nur die Belästigung widerspiegle, nicht aber die Schlafstörungen. Wäre dies korrekt, so müssten die Kosten der Schlafstörungen noch zum jetzigen Ergebnis dazugezählt werden.<sup>231</sup>
- Die **tiefe Leerwohnungsziffer** bzw. der Nachfrageüberhang in der Schweiz (insbesondere in grösseren Städten) könnte Grund dafür sein, dass sich die wahren Präferenzen der Mieter für Ruhe nicht vollständig in den Mietpreisen widerspiegeln bzw. dass die **Reduktion der Wohnungspreise unterschätzt** wird (vgl. Kapitel 6.1).

---

<sup>231</sup> Vgl. dazu die Erläuterungen zur Umfrage unter Experten in Kapitel 3.2 bzw. Anhang A.

- Die Herleitung der „Mietpreise“ für Eigentumswohnungen dürfte tendenziell eher zu einer Unterschätzung führen, da **Eigentumswohnungen** im Durchschnitt **besser ausgestattet** sind als Mietwohnungen (höhere Ansprüche an Eigentumswohnungen).
- Als Preisgrundlage dienen sogenannte **Bestandesmieten**, die – insbesondere bei langer Mietdauer – unter der Marktmiete liegt (vgl. Fussnote 196). Damit werden die Lärmkosten eher unterschätzt.

### Gesundheitskosten

- Berücksichtigt werden Todesfälle und Hospitalisationen durch Herz-Kreislauf-Krankheiten sowie Hospitalisationen durch Diabetes und Depression. Bevor jemand ins Spital eingeliefert wird (oder gar stirbt), treten jedoch bereits Kosten auf für **ambulante Behandlungen, Arztbesuche, Konsum von Medikamenten etc.** Diese zusätzlichen Kosten werden nicht berücksichtigt. Insbesondere bei Diabetes und Depressionen sind Arztkonsultationen deutlich häufiger als Spitaleintritte.
- Der **Schwellenwert** für Gesundheitseffekte wurde bei einem  $L_{DEN}$  von 45 dB(A) gesetzt. Es ist aber zu betonen, dass insbesondere Studien mit guter Expositionsmodellierung auch unterhalb dieser Schwelle Effekte auf das kardiovaskuläre System beobachtet haben. Nach heutigem Kenntnisstand gibt es keine Schwelle unterhalb deren mit grosser Sicherheit keine gesundheitlichen Wirkungen zu beobachten sind. Würde eine Schwelle von 40 statt 45 dB(A) verwendet, wären die Gesundheitsauswirkungen deutlich höher. **Ausmass der Erhöhung der Lärmkosten bei Schwellenwert 40 dB(A) wird mit Lärmdaten noch berechnet.**
- **Für Personen bis 18 Jahre** werden keine verlorenen Lebensjahre ermittelt. Die Berücksichtigung der jüngeren Personen würde die verlorenen Lebensjahre jedoch lediglich um 0.8% / 0.6% / 1.0% (Strassen- / Schienen- / Luftverkehr) erhöhen.
- Für **weitere Krankheiten**, die durch den Lärm verschlimmert werden dürften (wie z.B. Übergewicht, erhöhte Blutfettwerte, kognitive Funktionen bei Kindern), gibt es einen begründeten Verdacht für einen Zusammenhang mit Lärm. Für andere Krankheitsbilder wie niedriges Geburtsgewicht, Frühgeburten, Krebs und neurodegenerative Erkrankungen gibt es zumindest vereinzelte Hinweise. All diese Krankheitsbilder werden in den Berechnungen **vernachlässigt**.
- Bei den verlorenen Lebensjahren wird nicht berücksichtigt, dass die **Lebenserwartung** der Bevölkerung in Zukunft weiter zunehmen könnte.
- Die Gesundheitseffekte von Lärm und Luftverschmutzung beeinflussen sich gegenseitig: Kommt der Lärm zur Luftbelastung hinzu, so wirkt sich der Lärm nur noch auf die durch die Luftbelastung verminderte Bevölkerung aus. Die Berechnung erfolgt jedoch vereinfachend vollständig unabhängig für Luftbelastung und Lärm. Dies führt tendenziell zu einer Unterschätzung der Kosten.
- Die **administrativen Kosten** der Gesundheitsschäden werden nicht miteinbezogen, dürften aber weniger als 0.5% der Kosten ausmachen.<sup>232</sup>

---

<sup>232</sup> Ecoplan (1996), S. 71–74

- Auch die **Lärmfluchtkosten** (oder Vermeidungskosten: z.B. Freizeitaufenthalt in wenig belärmten Gebieten, Wechsel des Wohnorts usw.) werden vernachlässigt, dürften aber ebenfalls klein sein (vgl. Kapitel 3.1).
- Bei der Bestimmung der **Kostensätze** wurden gemäss dem at least Ansatz ebenfalls **vorsichtige Werte** verwendet).<sup>233</sup>

Als gegenläufigen Effekt zur Unterschätzung muss beachtet werden, dass 3 von 21 Experten in der Umfrage<sup>234</sup> nicht ausschliessen konnten, dass durch die Berücksichtigung der Reduktion der Wohnungspreise und der Gesundheitskosten ein gewisse **Doppelzählung** entsteht. Falls tatsächlich vorhanden, würde die Doppelzählung und damit die **Überschätzung** von den Experten nur als **gering** eingestuft.

Zudem könnte es in der epidemiologischen Literatur einen Publikationsbias geben, wenn Studien mit nachgewiesenen Zusammenhängen zwischen Lärmexposition und Gesundheitsschäden eher publiziert werden als solche, die keine solchen Zusammenhänge finden. Es ist jedoch zu beachten, dass gerade bei grossen und qualitativ guten Studien der Publikationsdruck hoch ist und die Resultate, welche einen grossen Einfluss auf die Meta-Analyse haben, mit grosser Wahrscheinlichkeit unabhängig vom Resultat publiziert werden.

Schliesslich wird für die Dauer der Hospitalisationen von kardiovaskulären Krankheiten mit Schweizer Durchschnittswerten gerechnet. Es ist jedoch zu vermuten, dass eine Hospitalisation bei älteren Personen länger dauert als bei jüngeren Personen. Da gemäss unseren Berechnungen bei jüngeren Personen mehr Hospitalisationen auftreten als bei Älteren, dürfte dies zu einer gewissen Überschätzung führen. Allerdings sind weniger als **9% (zu aktualisieren)** der Krankheitskosten auf Hospitalisationen von Herz-Kreislaufkrankheiten zurückzuführen.

Gesamthaft sind die **Gründe für eine Unterschätzung** der Lärmkosten jedoch **klar dominant**.

---

<sup>233</sup> Dies zeigt sich z.B. in folgenden Annahmen:

- Die Kostensätze für die Hospitalisierungen dürften eine Unterschätzung darstellen, da die Kosten weiterer medizinischer Nachfolgeuntersuchungen, die gemäss einer amerikanischen Untersuchung bis zu 2'300 CHF betragen könnten, und der mögliche Medikamentenkonsum nicht betrachtet werden (Ecoplan; Planteam; Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (IHA-ETH) (2004), S. 106–107). Auch bei Todesfällen werden keine Behandlungskosten unterstellt, obwohl vor dem Eintritt des Todes durchaus noch Kosten anfallen können. Die Bestattungskosten sind ebenfalls nicht berücksichtigt.
- Die Abschätzung der Ausfalltage über das amerikanische "Official Disability Guideline" dürfte die Ausfalltage tendenziell unterschätzen, weil in den USA mit weniger guten Sozialversicherungen der Druck, wieder zu arbeiten, gemäss einer grösseren Krankenkasse höher sei als in der Schweiz.
- In einer englischen Studie werden neben den Produktionsausfällen zusätzliche indirekte Kosten der Produktionsausfälle bestimmt, die diese übersteigen: Der Ausfall führt zu einer verminderten Zufriedenheit bei den Kunden mit der Qualität der Produkte oder Dienstleistungen und damit zu einem Verlust an künftigen Geschäften (Ecoplan; Infrac; ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004), S. 94).

<sup>234</sup> Vgl. Kapitel 3.2 bzw. Anhang A.

## 9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

## **10 Zeitreihe der Lärmkosten 2010 bis 2019**

### **10.1 Methodik zur Herleitung der Zeitreihe**

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

### **10.2 Ergebnisse für die Zeitreihe 2010 – 2019**

Erläuterungen folgen 2023 / 2024

## Anhang A: Expertenumfrage

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde im Juli / August 2020 eine Umfrage bei 21 nationalen und internationalen Expertinnen und Experten durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2). Den Befragten wurde eine etwas ältere Version des Textes vor dem Exkurs in Kapitel 3.2 gesendet (auf Englisch übersetzt) der sich insbesondere auf die Frage bezieht, ob über Mietzinsausfälle ermittelte Zahlungsbereitschaften für die Vermeidung von Belästigung und Schlafstörung mit den Gesundheitsschäden additiv verknüpft werden dürfen oder ob dies zu Doppelzählungen führt. In der Umfrage haben wir die ExpertInnen mit unserem Fazit bedient, dass nach unserer Einschätzung die MieterInnen und HauskäuferInnen kurzfristige und akut wahrnehmbare Beeinträchtigungen wie Lärmbelastung und Schlafstörung bei der Bildung ihrer Zahlungsbereitschaft für Wohnobjekte berücksichtigen. Demgegenüber die erst in ferner Zukunft und für den Einzelnen mit kleiner Wahrscheinlichkeit auftretenden Gesundheitsauswirkungen keine (wesentliche) Rolle spielen. Zu diesen Ausführungen haben wir folgende Fragen gestellt (hier auf Deutsch übersetzt):

- Sind Sie mit unserer Argumentation einverstanden?
- Wenn nicht, was sollten wir sonst noch in Betracht ziehen?
- Ist Ihnen (empirische) Evidenz bekannt, die unsere Annahme stützen oder widerlegen? Wenn ja, würden wir den Literaturhinweis sehr zu schätzen wissen. Kennen Sie z.B. Erhebungen, in denen gefragt wurde, ob Lärm gesundheitliche Auswirkungen hat oder ob die Befragten sich der gesundheitlichen Auswirkungen bewusst sind?
- Haben Sie eigene Überlegungen, die unsere Annahme stützen oder ihr widersprechen?

Auch wenn Sie der Meinung sein sollten, dass Sie keinen Beitrag zu den gestellten Fragen leisten können, wären wir Ihnen für Ihre Meinung zur ersten Frage dankbar.

In der Umfrage wurden die folgenden ExpertInnen befragt (vgl. Abbildung 10-1).

**Abbildung 10-1: In der Umfrage befragte Personen**

Befragte Personen	Institution
Adar Sara	University of Michigan the Regents of the University of Michigan, USA
Albin Maria	Lunds Universitet, Schweden
Ancona Carla und Forastiere Francesco	Azienda Sanitaria Locale Roma, Italien
Brown Lex	Griffith University, Australien
Delhaye Eef	Transport & Mobility Leuven, Leuven, Belgien
Doll Claus	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Deutschland
Foraster Maria	IS Global, Barcelona, Spanien
Höin Reto	Sinus AG, Sempach, Schweiz
Köpfli Micha	n-Sphere AG, Zürich, Schweiz
Link Heike	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, Deutschland

<b>Befragte Personen</b>	<b>Institution</b>
Mackie Peter	Institut für Transportstudien, Leeds, Grossbritannien
Malmqvist Ebba	Lunds Universitet, Schweden
Nash Chris	Institut für Transportstudien, Leeds, Grossbritannien
Navrud Stale	School of Economics and Business, Norwegian University of Life Sciences (NMBU), Ås, Norwegen
Pershagen Göran	Karolinska Institutet (KI), Stockholm, Schweden
Ricci Andrea	ISIS Istituto dei Studi per l'Integrazione dei Sistemi, Rom, Italien
Rousseau Sandra	Faculty of Economics and Business, KU Leuven, Brüssel, Belgien
Schreckenberg Dirk	ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung, Hagen, Deutschland
Schroten Arno	Ce Delft, Delft, Niederlande
Sedlacek Norbert	HERRY Consult GmbH, Wien, Österreich

## Literaturverzeichnis

- Abouee-Mehrizi, A.; Rasoulzadeh, Y.; Kazemi, T. und Mesgari-Abbasi, M. (2020): Inflammatory and immunological changes caused by noise exposure: A systematic review. In: *J Environ Sci Health C Toxicol Carcinog*, 38, 1, 61–90.
- An, R. P.; Wang, J. J.; Ashrafi, S. A.; Yang, Y. und Guan, C. H. (2018): Chronic Noise Exposure and Adiposity: A Systematic Review and Meta-analysis. In: *American Journal of Preventive Medicine*, 55, 3, 403–411.
- Andersen, Z. J.; Jorgensen, J. T.; Elsborg, L.; Lophaven, S. N.; Backalarz, C.; Laursen, J. E.; Pedersen, T. H.; Simonsen, M. K.; Brauner, E. V. und Lyngø, E. (2018): Long-term exposure to road traffic noise and incidence of breast cancer: a cohort study. In: *Breast Cancer Res*, 20, 1, 119.
- Andersson, E. M.; Ogren, M.; Molnar, P.; Segersson, D.; Rosengren, A. und Stockfelt, L. (2020): Road traffic noise, air pollution and cardiovascular events in a Swedish cohort. In: *Environmental Research*, 185, 109446.
- Argys, L. M.; Averett, S. L. und Yang, M. Z. (2020): Residential noise exposure and health: Evidence from aviation noise and birth outcomes. In: *Journal of Environmental Economics and Management*, 103.
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2009): Lärmbelastung in der Schweiz. Ergebnisse des nationalen Lärmmonitorings SonBase. URL [https://www.mobilservice.ch/admin/data/files/news\\_section\\_file/file/2237/ergebnisse-des-nationalen-laermmonitorings-sonbase.pdf?lm=1418801166](https://www.mobilservice.ch/admin/data/files/news_section_file/file/2237/ergebnisse-des-nationalen-laermmonitorings-sonbase.pdf?lm=1418801166), abgerufen am 7. September 2020.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2018): Lärmbelastung in der Schweiz. Ergebnisse des nationalen Lärmmonitorings SonBase, Stand 2015. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-laerm/laerm--publikationen/publikationen-laerm/laermbelastung-in-der-schweiz-sonbase.html>, abgerufen am 3. September 2020.
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2019): Belastungsgrenzwerte für Lärm. URL <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-laerm/laerm--fachinformationen/laermbelastung/grenzwerte-fuer-laerm/belastungsgrenzwerte-fuer-laerm.html>, abgerufen am 9. September 2020.
- Bai, L.; Shin, S.; Oiamo, T. H.; Burnett, R. T.; Weichenthal, S.; Jerrett, M.; Kwong, J. C.; Copes, R.; Kopp, A. und Chen, H. (2020): Exposure to Road Traffic Noise and Incidence of Acute Myocardial Infarction and Congestive Heart Failure: A Population-Based Cohort Study in Toronto, Canada. In: *Environ Health Perspect*, 128, 8, 87001.
- Banfi, S.; Filippini, M.; Horehájová, A. und Pióro, D. (2007): Zahlungsbereitschaft für eine verbesserte Umweltqualität am Wohnort. Schätzungen für die Städte Zürich und Lugano für die Bereiche Luftverschmutzung, Lärmbelastung und Elektromog von Mobilfunkantennen. In: *Umwelt-Wissen Nr. 0717*.
- Beutel, M. E.; Brahler, E.; Ernst, M.; Klein, E.; Reiner, I.; Wiltink, J.; Michal, M.; Wild, P. S.; Schulz, A.; Munzel, T.; Hahad, O.; König, J.; Lackner, K. J.; Pfeiffer, N. und Tibubos, A. N. (2020): Noise annoyance predicts symptoms of depression, anxiety and sleep disturbance 5 years later. Findings from the Gutenberg Health Study. In: *Eur J Public Health*, 30, 3, 516–521.
- Bickel, Peter; Hunt, Alistair; de Jong, Gerard; Laird, James; Lieb, Christoph; Lindberg, Gunnar; Mackie, Peter; Navrud, Ståle; Odgaard, Thomas; Shires, Jeremy und Tavasszy,

- Lori (2006): HEATCO D5: Proposal for Harmonized Guidelines. Deliverable 5 of HEATCO (Developing Harmonized European Approaches for Transport Costing and Project Assessment).
- Breyer, Friedrich; Zweifel, Peter und Kifmann, Mathias (2005): Gesundheitsökonomik. Springer-Verlag.
- Cai, Y.; Ramakrishnan, R. und Rahimi, K. (2021): Long-term exposure to traffic noise and mortality: A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence between 2000 and 2020. In: *Environmental Pollution*, 269, 116222.
- Cai, Y.; Zijlema, W. L.; Sorgjerd, E. P.; Doiron, D.; de Hoogh, K.; Hodgson, S.; Wolffenbuttel, B.; Gulliver, J.; Hansell, A. L.; Nieuwenhuijsen, M.; Rahimi, K. und Kvaloy, K. (2020): Impact of road traffic noise on obesity measures: Observational study of three European cohorts. In: *Environmental Research*, 191, 110013.
- Cao, Z. W.; Zhao, F. und Mulugeta, H. (2019): Noise exposure as a risk factor for acoustic neuroma: a systematic review and meta-analysis. In: *International Journal of Audiology*, 58, 9, 525–532.
- CEDR Conference of European Directors of Roads (2017): State of the art in managing road traffic noise: cost-benefit analysis and cost-effectiveness analysis. Technical Report 2017-03.
- Chen, F.; Fu, W.; Shi, O.; Li, D.; Jiang, Q.; Wang, T.; Zhou, X.; Lu, Z. und Cao, S. (2021): Impact of exposure to noise on the risk of hypertension: A systematic review and meta-analysis of cohort studies. In: *Environmental Research*, 195, 110813.
- Choe, S. A.; Kim, S.; Im, C.; Kim, S. Y.; Kim, Y. S.; Yoon, T. K. und Kim, D. K. (2020): Nighttime environmental noise and semen quality: A single fertility center cohort study. In: *PLoS One*, 15, 11, e0240689.
- Clark, C.; Crumpler, C. und Notley, H. (2020): Evidence for Environmental Noise Effects on Health for the United Kingdom Policy Context: A Systematic Review of the Effects of Environmental Noise on Mental Health, Wellbeing, Quality of Life, Cancer, Dementia, Birth, Reproductive Outcomes, and Cognition. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 2.
- Clark, C. und Paunovic, K. (2018): WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health. In: *Int J Environ Res Public Health*, 15, 11.
- Cramer, J.; Jorgensen, J. T.; Hoffmann, B.; Loft, S.; Brauner, E. V.; Prescott, E.; Ketzel, M.; Hertel, O.; Brandt, J.; Jensen, S. S.; Backalarz, C.; Simonsen, M. K. und Andersen, Z. J. (2020): Long-Term Exposure to Air Pollution and Incidence of Myocardial Infarction: A Danish Nurse Cohort Study. In: *Environ Health Perspect*, 128, 5, 57003.
- Dzhambov, A. M. und Dimitrova, D. D. (2016): Exposure-response relationship between traffic noise and the risk of stroke: a systematic review with meta-analysis. In: *Arhiv Za Higijenu Rada I Toksikologiju-Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 67, 2, 136–151.
- Dzhambov, A. M. und Dimitrova, D. D. (2017): Children's blood pressure and its association with road traffic noise exposure - A systematic review with meta-analysis. In: *Environmental Research*, 152, 244–255.

- Dzhambov, A. M. und Dimitrova, D. D. (2018): Residential road traffic noise as a risk factor for hypertension in adults: Systematic review and meta-analysis of analytic studies published in the period 2011-2017. In: *Environmental Pollution*, 240, 306–318.
- Dzhambov, A. M. und Lercher, P. (2019a): Road Traffic Noise Exposure and Birth Outcomes: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 14.
- Dzhambov, A. M. und Lercher, P. (2019b): Road Traffic Noise Exposure and Depression/Anxiety: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 21.
- Ecoplan (1996): Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten. Synthesebericht, GVF-Auftrag Nr. 272.
- Ecoplan (2002): Unfallkosten im Strassen- und Schienenverkehr der Schweiz 1998. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- Ecoplan (2014): Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit. Berechnung von DALY für die Schweiz. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt.
- Ecoplan (2019): Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit: Berechnung von DALY für die Schweiz. Studie im Auftrag im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Bern.
- Ecoplan (2020): Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr: Grundlagen für die Durchführung einer Kosten- Nutzen-Analyse. Forschungsprojekt VSS 2015/115 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- Ecoplan und Infras (2014): Externe Effekte des Verkehrs 2010. Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE). Bern, Zürich und Altdorf.
- Ecoplan; Infras; und ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004): Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2000. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Gesundheit.
- Ecoplan; Planteam; und Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (IHA-ETH) (2004): Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz: Aktualisierung für das Jahr 2000. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL sowie des Bundesamtes für Gesundheit BAG.
- EEA European Environment Agency (2020a): Environmental noise in Europe — 2020. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>, abgerufen am 9. Juli 2020.
- EEA European Environment Agency (2020b): Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. Copenhagen.
- EEA European Environment Agency (2020c): Switzerland noise fact sheet 2019 — European Environment Agency. URL <https://www.eea.europa.eu/themes/human/noise/noise-fact-sheets/noise-country-fact-sheets-2019/switzerland-noise-fact-sheet-2018>, abgerufen am 21. September 2021.

- EU (2002): Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=DE>, abgerufen am 18. September 2020.
- European Commission (2019): Handbook on the external costs of transport: version 2019. URL [http://publications.europa.eu/publication/manifestation\\_identifier/PUB\\_MI0518051ENN](http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_MI0518051ENN), abgerufen am 9. Juli 2020.
- Eze, I. C.; Foraster, M.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Heritier, H.; Pieren, R.; Thiesse, L.; Rudzik, F.; Rothe, T.; Pons, M.; Bettschart, R.; Schindler, C.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Brink, M.; Röösli, M. und Probst-Hensch, N. (2018): Transportation noise exposure, noise annoyance and respiratory health in adults: A repeated-measures study. In: *Environ Int*, 121, Pt 1, 741–750.
- 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.; Röösli, M. und Probst-Hensch, N. (2017): Long-term exposure to transportation noise and air pollution in relation to incident diabetes in the SAPALDIA study. In: *Int J Epidemiol*, 46, 4, 1115–1125.
- Eze, I. C.; Foraster, M.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Pieren, R.; Imboden, M.; Wunderli, J. M.; Cajochen, C.; Brink, M.; Röösli, M. und Probst-Hensch, N. (2020): Incidence of depression in relation to transportation noise exposure and noise annoyance in the SAPALDIA study. In: *Environ Int*, 144, 106014.
- Fahrländer, Stefan; Gerfin, Michael und Lehner, Manuel (2015): The influence of noise on net revenue and values of investment properties: Evidence from Switzerland. In: Discussion Papers 15-02 Universität Basel.
- Foraster, M.; Eze, I. C.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Heritier, H.; Endes, S.; Rudzik F.; Thiesse L.; Pieren R.; Schindler C.; Schmidt-Trucksäss A.; Brink, M.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Röösli, M. und Probst-Hensch, N. (2017a): Exposure to road, railway, and aircraft noise and arterial stiffness in the SAPALDIA study: annual average noise levels and temporal noise characteristics. In: *Environmental Health Perspectives*, 125, 9, 097004.
- Foraster, M.; Eze, I. C.; Schaffner, E.; Vienneau, D.; Heritier, H.; Endes, S.; Rudzik F.; Thiesse L.; Pieren R.; Schindler C.; Schmidt-Trucksäss A.; Brink, M.; Cajochen, C.; Wunderli, J. M.; Röösli, M. und Probst-Hensch, N. (2017b): Exposure to road, railway, and aircraft noise and arterial stiffness in the SAPALDIA study: annual average noise levels and temporal noise characteristics. In: *Environmental Health Perspectives*, 125, 9, 097004.
- 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.; Röösli, M. und Probst-Hensch, N. (2018): Long-term exposure to transportation noise and its association with adiposity markers and development of obesity. In: *Environ Int*, 121, Pt 1, 879–889.
- FPRE Fahrländer Partner AG (2013): Berechnungsmodell für die LAN (Spezialgesetzliche Ausgleichsnorm für übermässige Lärmbelastung). Unveröffentlichte Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Zürich.
- FPRE Fahrländer Partner AG Raumentwicklung (2014): Lärm und Renditeigenschaften. Untersuchung des Lärmeinflusses auf Renditeigenschaften (Wohnen, Büro, Verkauf, Gastronomie). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU.

- Hahad, O.; Beutel, M. E.; Gilan, D. A.; Michal, M.; Daiber, A. und Munzel, T. (2020): Impact of environmental risk factors such as noise and air pollution on mental health: What do we know? In: *Dtsch Med Wochenschr*, 145, 23, 1701–1707.
- He, S.; Smargiassi, A.; Low, N.; Bilodeau-Bertrand, M.; Ayoub, A. und Auger, N. (2019): Residential noise exposure and the longitudinal risk of hospitalization for depression after pregnancy: Postpartum and beyond. In: *Environmental Research*, 170, 26–32.
- Hegewald, J.; Schubert, M.; Freiberg, A.; Romero Starke, K.; Augustin, F.; Riedel-Heller, S. G.; Zeeb, H. und Seidler, A. (2020): Traffic Noise and Mental Health: A Systematic Review and Meta-Analysis. In: *Int J Environ Res Public Health*, 17, 17.
- IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (2012): Sachstandspapier zu Lärm. Unveröffentlichte Studie für die UBA Methodenkonvention 2.0: Schätzung externer Umweltkosten und Vorschläge zur Kosteninterialisierung in ausgewählten Politikfeldern.
- Infras und Ecoplan (2019): Externe Effekte des Verkehrs 2015, Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE). URL <https://www.aren.admin.ch/kosten-nutzen>, abgerufen am 8. Juli 2020.
- IRENE und Ecosys (2013): L'integration de la navigation dans le compte des transports. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Statistik und des Bundesamtes für Raumentwicklung. IRENE (Institut de recherches économiques, Université de Neuchâtel).
- Ising, H. und Kruppa, B. (2004): Health Effects caused by Noise: Evidence in the Literature from the Past 25 Years. In: *Noise & Health* 22, 5–13.
- ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin am Schweizerischen Tropeninstitut Basel); Ecoplan; und Lungenliga Schweiz (2009): Gesundheitskosten des Passivrauchens in der Schweiz. Studie im Auftrag des Tabakpräventionsfonds.
- Khosravipour, M. und Khanlari, P. (2020): The association between road traffic noise and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis. In: *Sci Total Environ*, 731, 139226.
- Kupcikova, Z.; Fecht, D.; Ramakrishnan, R.; Clark, C. und Cai, Y. S. (2021): Road traffic noise and cardiovascular disease risk factors in UK Biobank. In: *Eur Heart J*, 42, 21, 2072–2084.
- Lan, Y.; Roberts, H.; Kwan, M. P. und Helbich, M. (2020): Transportation noise exposure and anxiety: A systematic review and meta-analysis. In: *Environmental Research*, 191, 110118.
- Li, W.; Ruan, W.; Yi, G.; Chen, Z. und Wang, D. (2021): Association of noise exposure with risk of metabolic syndrome: Evidence from 44,698 individuals. In: *Diabetes Res Clin Pract*, 178, 108944.
- Liu, S.; Lim, Y. H.; Pedersen, M.; Jorgensen, J. T.; Amini, H.; Cole-Hunter, T.; Mehta, A. J.; So, R.; Mortensen, L. H.; Westendorp, R. G. J.; Loft, S.; Brauner, E. V.; Ketzler, M.; Hertel, O.; Brandt, J.; Jensen, S. S.; Christensen, J. H.; Sigsgaard, T.; Geels, C.; Frohn, L. M.; Brboric, M.; Radonic, J.; Sekulic, M. T.; Bonnelykke, K.; Backalarz, C.; Simonsen, M. K. und Andersen, Z. J. (2021): Long-term exposure to ambient air pollution and road traffic noise and asthma incidence in adults: The Danish Nurse cohort. In: *Environ Int*, 152, 106464.

- Metroeconomica Limited (2001): Monetary valuation of noise effects. Study prepared for the EC UNITE Project, sub-contracted to IER, Germany.
- Münzel, T.; Kroeller-Schon, S.; Oelze, M.; Gori, T.; Schmidt, F. P.; Steven, S.; Hahad, O.; Röösl, M.; Wunderli, J. M.; Daiber, A. und Sörensen, M. (2020): Adverse Cardiovascular Effects of Traffic Noise with a Focus on Nighttime Noise and the New WHO Noise Guidelines. In: *Annu Rev Public Health*.
- Münzel, T.; Sorensen, M. und Daiber, A. (2021): Transportation noise pollution and cardiovascular disease. In: *Nature Reviews Cardiology*.
- Narain, Urvashi und Sall, Chris (2016): Methodology for Valuing the Health Impacts of Air Pollution. World Bank, Washington, DC.
- Navrud, Ståle (2002): The State of the Art on Economic Valuation of Noise. Final Report to European Commission DG Environment 14th April 2002.
- Ohlwein, S.; Hennig, F.; Lucht, S.; Matthiessen, C.; Pundt, N.; Moebus, S.; Jockel, K. H. und Hoffmann, B. (2019): Indoor and outdoor road traffic noise and incident diabetes mellitus: Results from a longitudinal German cohort study. In: *Environmental Epidemiology*, 3, 1, e037.
- Orban, E.; McDonald, K.; Sutcliffe, R.; Hoffmann, B.; Fuks, K. B.; Dragano, N.; Viehmann, A.; Erbel, R.; Jockel, K. H.; Pundt, N. und Moebus, S. (2016): Residential Road Traffic Noise and High Depressive Symptoms after Five Years of Follow-up: Results from the Heinz Nixdorf Recall Study. In: *Environ Health Perspect*, 124, 5, 578–85.
- Osborne, M. T.; Radfar, A.; Hassan, M. Z. O.; Abohashem, S.; Oberfeld, B.; Patrich, T.; Tung, B.; Wang, Y.; Ishai, A.; Scott, J. A.; Shin, L. M.; Fayad, Z. A.; Koenen, K. C.; Rajagopalan, S.; Pitman, R. K. und Tawakol, A. (2020): A neurobiological mechanism linking transportation noise to cardiovascular disease in humans. In: *Eur Heart J*, 41, 6, 772–782.
- Perez, L. und Künzli, N. (2009): From measures of effects to measures of potential impact. In: *Int J Public Health*, 54, 1, 45–8.
- Pyko, A.; Andersson, N.; Eriksson, C.; de Faire, U.; Lind, T.; Mitkovskaya, N.; Ogren, M.; Ostenson, C. G.; Pedersen, N. L.; Rizzuto, D.; Wallas, A. K. und Pershagen, G. (2019): Long-term transportation noise exposure and incidence of ischaemic heart disease and stroke: a cohort study. In: *Occup Environ Med*, 76, 4, 201–207.
- Rapp Trans AG (2006): Diskontsatz in Kosten-Nutzen-Analysen im Verkehr. Forschungsprojekt VSS 2003/201 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- Renner, R. A.; Gross, V. J.; Ernst, A.; Hellmich, M. und Erren, T. C. (2020): [Epidemiological Studies on the Association between Chronic Exposure to Road Traffic Noise and Blood Pressure: A Systematic Review with Meta-Analyses]. In: *Gesundheitswesen*.
- Roca-Barcelo, A.; Nardocci, A.; de Aguiar, B. S.; Ribeiro, A. G.; Failla, M. A.; Hansell, A. L.; Cardoso, M. R. und Piel, F. B. (2021): Risk of cardiovascular mortality, stroke and coronary heart mortality associated with aircraft noise around Congonhas airport, Sao Paulo, Brazil: a small-area study. In: *Environ Health*, 20, 1, 59.
- Röösl, M und Probst-Hensch N (2019): Nicht übertragbare Krankheiten verstehen und verhindern mit Big Data und Exposom-Ansätzen. In: *Leading Opinions Innere Medizin*, 5, 63–65.

- Röösli, M.; Wunderli, J. M.; Brink, M.; Cajochen, C. und Probst-Hensch, N. (2019): Verkehrslärm, kardiovaskuläre Sterblichkeit, Diabetes, Schlafstörung und Belästigung: die SiRENE-Studie. In: *Swiss Med Forum*, 19, 0506, 77-82.
- Roswall, N.; Andersen, Z. J.; von Euler-Chelpin, M.; Vejborg, I.; Lynge, E.; Jensen, S. S.; Raaschou-Nielsen, O.; Tjonneland, A. und Sorensen, M. (2018): Residential traffic noise and mammographic breast density in the Diet, Cancer, and Health cohort. In: *Cancer Causes Control*, 29, 4–5, 399–404.
- Roswall, N.; Bidstrup, P. E.; Raaschou-Nielsen, O.; Solvang Jensen, S.; Overvad, K.; Halkjaer, J. und Sorensen, M. (2017): Residential road traffic noise exposure and colorectal cancer survival - A Danish cohort study. In: *PLoS One*, 12, 10, e0187161.
- Roswall, N.; Stangerup, S. E.; Caye-Thomasen, P.; Schuz, J.; Johansen, C.; Jensen, S. S.; Raaschou-Nielsen, O. und Sorensen, M. (2017): Residential traffic noise exposure and vestibular schwannoma - a Danish case-control study. In: *Acta Oncol*, 56, 10, 1310–1316.
- Sakhvidi, F. Z.; Zare Sakhvidi, M. J. Z.; Mehrparvar, A. H. und Dzhambov, A. M. (2018): Environmental Noise Exposure and Neurodevelopmental and Mental Health Problems in Children: a Systematic Review (vol 86, pg 563, 2018). In: *Current Environmental Health Reports*, 5, 3, 396–396.
- Saucy, A.; Schäffer, B.; Tangermann, L.; Vienneau, D.; Wunderli, J. M. und Röösli, M. (2021): Does night-time aircraft noise trigger mortality? A case-crossover study on 24 886 cardiovascular deaths. In: *Eur Heart J*, 42, 8, 835–843.
- Schmidt, F. P.; Herzog, J.; Schnorbus, B.; Ostad, M. A.; Lasetzki, L.; Hahad, O.; Schafers, G.; Gori, T.; Sorensen, M.; Daiber, A. und Munzel, T. (2021): The impact of aircraft noise on vascular and cardiac function in relation to noise event number: a randomized trial. In: *Cardiovasc Res*, 117, 5, 1382–1390.
- Seidler, A.; Hegewald, J.; Seidler, A. L.; Schubert, M.; Wagner, M.; Droge, P.; Haufe, E.; Schmitt, J.; Swart, E. und Zeeb, H. (2017): Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data. In: *Environmental Research*, 152, 263–271.
- Seidler, A.; Hegewald, J.; Seidler, A. L.; Schubert, M. und Zeeb, H. (2019): Is the Whole More Than the Sum of Its Parts? Health Effects of Different Types of Traffic Noise Combined. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 9.
- Shin, S.; Bai, L.; Oiamo, T. H.; Burnett, R. T.; Weichenthal, S.; Jerrett, M.; Kwong, J. C.; Goldberg, M. S.; Copes, R.; Kopp, A. und Chen, H. (2020): Association Between Road Traffic Noise and Incidence of Diabetes Mellitus and Hypertension in Toronto, Canada: A Population-Based Cohort Study. In: *Journal of the American Heart Association*, 9, 6.
- SIV infos (2006): Wertverminderung – Zum Stand der Minderwertdiskussion bei immissionsbetroffenen Grundstücken. In: *Schweiz. Immobilienschätzer-Verband. SIVinfos*, Nr. 21, März 2006.
- Soguel, Nils (1996): Contingent Valuation of Traffic Noise Reduction Benefits. In: *Schweizerische Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik*, Nr. 132 (1), 109–123.
- Sorensen, M.; Kettel, M.; Overvad, K.; Tjonneland, A. und Raaschou-Nielsen, O. (2014): Exposure to road traffic and railway noise and postmenopausal breast cancer: A cohort study. In: *Int J Cancer*, 134, 11, 2691–8.

- Sorensen, M.; Sorensen, T. I. A.; Ketzel, M. und Raaschou-Nielsen, O. (2020): Exposure to traffic noise and gestational weight gain and postpartum weight retention: a cohort study. In: *Occup Environ Med*, 77, 2, 107–114.
- Suter, Stefan; Sommer, Heini; Marti, Michael; Wickart, Marcel; Schreyer, Christoph; Peter, Martin; Gehrig, Sonja; Maibach, Markus; Wüthrich, Philipp; Bickel, Peter und Schmied, Stephan (2002): The Pilot Accounts for Switzerland - Deliverable 5, Annex 2. UNITE (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency) Working Funded by 5th Framework RTD Programme. ITS, University of Leeds, Leeds.
- Thacher, J. D.; Hvidtfeldt, U. A.; Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Ketzel, M.; Brandt, J.; Jensen, S. S.; Overvad, K.; Tjonneland, A.; Munzel, T. und Sorensen, M. (2020): Long-term residential road traffic noise and mortality in a Danish cohort. In: *Environmental Research*, 187, 109633.
- Thacher, J. D.; Poulsen, A. H.; Roswall, N.; Hvidtfeldt, U.; Raaschou-Nielsen, O.; Jensen, S. S.; Ketzel, M.; Brandt, J.; Overvad, K.; Tjonneland, A.; Munzel, T. und Sorensen, M. (2020): Road Traffic Noise Exposure and Filled Prescriptions for Antihypertensive Medication: A Danish Cohort Study. In: *Environ Health Perspect*, 128, 5, 57004.
- Thacher, J. D.; Roswall, N.; Damm, P.; Hvidtfeldt, U. A.; Poulsen, A. H.; Raaschou-Nielsen, O.; Ketzel, M.; Jensen, S. S.; Frohn, L. M.; Valencia, V. H.; Munzel, T. und Sorensen, M. (2021): Transportation noise and gestational diabetes mellitus: A nationwide cohort study from Denmark. In: *Int J Hyg Environ Health*, 231, 113652.
- Thayer, Mark A.; Chestnut, Lauraine G.; Lazo, Jeffrey K. und van den Eeden, Stephen (2003): The Economic Valuation of Respiratory and Cardiovascular Hospitalizations. Studie im Auftrag des California Air Resources Board und der California Environmental Protection Agency. Contract Nr. 99-329.
- UBA Fluglärm (2004): Stellungnahme des Interdisziplinären Arbeitskreises für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt.
- UBA Umweltbundesamt (2019): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Stand 02/19. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von>, abgerufen am 17. August 2020.
- Vienneau, D.; Eze, I. C.; Probst-Hensch, N. und Röösli, M. (2019): Association between transportation noise and cardio-metabolic diseases: an update of the WHO meta-analysis.
- Vienneau, D.; Saucy, A.; Schäffer, B.; Flückiger, B.; Tangermann, L.; Stafoggia, M.; Wunderli, J. M.; Röösli, M.; und for the SNC study group (2021): Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: 15-years of follow-up in a nationwide prospective cohort in Switzerland. In: *Environ Int.*, 158, Nov 11;158:106974.
- Vienneau, D.; Schindler, C.; Perez, L.; Probst-Hensch, N. und Röösli, M. (2015): The relationship between transportation noise exposure and ischemic heart disease: a meta-analysis. In: *Environmental Research*, 138, 372–80.
- Voss, S.; Schneider, A.; Huth, C.; Wolf, K.; Markevych, I.; Schwettmann, L.; Rathmann, W.; Peters, A. und Breitner, S. (2021): ENVINT-D-20-01309: Long-term exposure to air pollution, road traffic noise, residential greenness, and prevalent and incident metabolic syndrome: Results from the population-based KORA F4/FF4 cohort in Augsburg, Germany. In: *Environ Int*, 147, 106364.
- VSS 41 821 (2006): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Diskontsatz. Schweizer Norm des VSS (Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen).

- Wallas, A. E.; Eriksson, C.; Ogren, M.; Pyko, A.; Sjostrom, M.; Melen, E.; Pershagen, G. und Gruzieva, O. (2020): Noise exposure and childhood asthma up to adolescence. In: *Environmental Research*, 185, 109404.
- Wang, H.; Sun, D.; Wang, B.; Gao, D.; Zhou, Y.; Wang, N. und Zhu, B. (2020): Association between noise exposure and diabetes: meta-analysis. In: *Environ Sci Pollut Res Int*, 27, 29, 36085–36090.
- Weihofen, V. M.; Hegewald, J.; Euler, U.; Schlattmann, P.; Zeeb, H. und Seidler, A. (2019): Aircraft Noise and the Risk of Stroke. In: *Dtsch Arztebl Int*, 116, 14, 237–244.
- Weuve, J.; D'Souza, J.; Beck, T.; Evans, D. A.; Kaufman, J. D.; Rajan, K. B.; de Leon, C. F. M. und Adar, S. D. (2021): Long-term community noise exposure in relation to dementia, cognition, and cognitive decline in older adults. In: *Alzheimers Dement*, 17, 3, 525–533.
- WHO (2018): Environmental noise guidelines for the European Region. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe.
- WHO World Health Organisation (2011): Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. URL [https://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/e94888.pdf?ua=1](https://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888.pdf?ua=1), abgerufen am 9. Juli 2020.
- WHO World Health Organisation (2018): Environmental noise guidelines for the European Region. URL [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf?ua=1), abgerufen am 9. Juli 2020.
- Wing, S. E.; Larson, T. V.; Hadda, N.; Boonyarattaphan, S.; Fruin, S. und Ritz, B. (2020): Preterm Birth among Infants Exposed to in Utero Ultrafine Particles from Aircraft Emissions. In: *Environmental Health Perspectives*, 128, 4.
- Work Loss Data Institute (2013): Official Disability Guideline.
- Wüest & Partner (2013): Mikrolage neu gesehen. In: *Immo-Monitoring*, 2013 / 2, 63–75.
- Yankoty, L. I.; Gamache, P.; Plante, C.; Goudreau, S.; Blais, C.; Perron, S.; Fournier, M.; Ragetti, M. S.; Fallah-Shorshani, M.; Hatzopoulou, M.; Liu, Y. und Smargiassi, A. (2021): Long horizontal line term residential exposure to environmental/transportation noise and the incidence of myocardial infarction. In: *Int J Hyg Environ Health*, 232, 113666.
- Yu Y.; Rose E.; Kimberly P.; Lee E.; Jerrett M.; Su J.; Wu J.; Shih I-F.; Haan M.; und Ritz B. (2020): Traffic-Related Noise Exposure and Late-life Dementia and Cognitive Impairment in Mexican-Americans. In: *Epidemiology*, ahead of print, doi: 10.1097/EDE.0000000000001249.
- Zijlema, W. L.; de Kluizenaar, Y.; van Kamp, I. und Hartman, C. A. (2021): Associations between road traffic noise exposure at home and school and ADHD in school-aged children: the TRAILS study. In: *Eur Child Adolesc Psychiatry*, 30, 1, 155–167.
- ZKB Zürcher Kantonalbank (2010): Spezialgesetzliche Ausgleichsnorm für übermässige Lärmbelastung. Anwendbarkeit hedonischer Modelle zur Minderwertbestimmung.
- ZKB Zürcher Kantonalbank (2011): Ruhe bitte! Wie Lage und Umweltqualität die Schweizer Mieten bestimmen. Studie in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt. URL <https://www.zkb.ch/media/pub/coporate/volkswirtschaft/ruhe-bitte-218386.pdf>, abgerufen am 9. Juli 2020.

ZKB Zürcher Kantonalbank (2012): Wie Lage und Umweltqualität die Eigenheimpreise bestimmen. Hedonisches Modell für Stockwerkeigentum. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt.

ZKB Zürcher Kantonalbank (2019): Auswirkungen von Verkehrslärm auf den Preis von Mietwohnungen und Stockwerkeigentum.

ZKB Zürcher Kantonalbank (2020): Ergänzung Schlussbericht 2019: Auswirkungen von Verkehrslärm auf den Preis von Mietwohnungen und Stockwerkeigentum.