

# Die SiRENE-Studie

Prof. Dr. Martin Röösl<sup>a,b</sup>, Dr. Jean-Marc Wunderli<sup>c</sup>, PD Dr. Mark Brink<sup>d</sup>,  
Prof. Dr. Christian Cajochen<sup>e</sup>, Prof. Dr. Nicole Probst-Hensch<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Schweizerisches Tropen- und Public Health Institut, Basel; <sup>b</sup> Universität Basel, Basel; <sup>c</sup> Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf;

<sup>d</sup> Bundesamt für Umwelt, Abteilung Lärm & NIS, Bern; <sup>e</sup> Zentrum für Chronobiologie, Psychiatrisches Universitätsspital Basel, Basel



Macht Lärm krank? Sind die Schweizer Grenzwerte für Strassen-, Bahn- und Fluglärm noch aktuell? Schweizer Forscher haben den Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und Lärmbelästigung, Schlaf, Kreislauf und Metabolismus untersucht.

## Hintergrund

Lärm kann zu Belästigung und selbstberichteten Schlafstörungen führen [1]. In epidemiologischen Studien ist Verkehrslärm mit einem erhöhten Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen, Diabetes, Depressionen bei Erwachsenen und kognitiven Beeinträchtigungen bei Kindern assoziiert [1]. Dennoch ist weitgehend unklar, wie akute und kurzfristige Auswirkungen einer Lärmbelastung schlussendlich zu langfristigen Gesundheitsproblemen führen. Vor allem gibt es grosse Unsicherheiten, ab welcher Schwelle Lärm gesundheitsschädlich ist respektive ob es eine solche Schwelle überhaupt gibt. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) schätzte, dass Umweltlärm in Westeuropa zum Verlust von 903 000 beschwerdefreien Lebensjahren (DALY) infolge lärmbedingter Schlafstörungen, 587 000 infolge Lärmbelästigungen, 61 000 infolge ischämischer Herzkrankheiten und 45 000 infolge kognitiver Beeinträchtigungen bei Kindern führt [2]. DALYs infolge lärminduzierten Diabetes wurden bisher noch nicht berechnet. Gemäss WHO treten Gesundheitseffekte ab 40 Dezibel (dB) in der Nacht und ab 45 dB am Tag auf [3]. In der Schweiz liegt der Immissionsgrenzwert für Verkehrslärm in der Nacht zwischen 45 dB (Empfindlichkeitsstufe 1) bis 60 dB (Empfindlichkeitsstufe 4). Am Tag sind die Grenzwerte jeweils 10 dB höher. Rund 20–25% der Schweizer Bevölkerung leben in Gebieten, in denen der jeweilige Grenzwert in der Nacht oder am Tag überschritten ist. Lärm verursacht externe Kosten, die von der Allgemeinheit getragen werden und nicht bei den Verursachern anfallen. Pro Jahr werden die externen Gesundheitskosten in der Schweiz für Strassen-, Bahn- und Fluglärm auf rund 2,6 Milliarden Schweizer Franken geschätzt [4].

## SiRENE-Studie

Das Umweltschutzgesetz fordert Lärmgrenzwerte die sicherstellen, dass nach dem «Stand der Wissenschaft

oder der Erfahrung» Immissionen unterhalb dieser Werte die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören. Zur Aktualisierung des Wissensstandes über Lärmwirkungen wurde mit Unterstützung der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung (EKLK) im Jahre 2013 die SiRENE-Studie («short and long term effects of transportation noise exposure») lanciert, die in mehreren Teilstudien die Wirkungen des Strassen-, Schienen- und Luftverkehrslärms auf Belästigung, Schlaf, Metabolismus (z.B. Diabeteserkrankungen) und kardiovaskuläre Erkrankungen sowie Sterblichkeit untersuchte [5]. Ein besonderer Fokus lag auch auf der systematischen Analyse der Lärmcharakteristik, ob beispielsweise kontinuierlicher Lärm im Vergleich zu stark variierenden Lärmereignissen eine andere Wirkung hat. Weiter wurde evaluiert, welche Rollen individuelle Lärmempfindlichkeit und Lärmbelästigung, genetische Prädispositionen und andere Persönlichkeitsmerkmale bei gesundheitlichen Auswirkungen des Verkehrslärms spielen.

In einer repräsentativen nach Lärmquelle und -pegelklasse stratifizierten Zufallsstichprobe der Schweizer Bevölkerung wurde untersucht, wie stark die Verkehrslärmbelästigung durch die drei Verkehrslärmquellen wahrgenommen wird und in welchem Ausmass selbstberichtete Schlafstörungen auf Verkehrslärm zurückzuführen sind. In zwei grossen laufenden epidemiologischen Studien (SAPALDIA-Kohorte und -Biobank sowie Schweizer Nationale Kohortenstudie [SNC]) wurde unter Berücksichtigung der Luftverschmutzung und teilweise anderer Faktoren wie Lebensstil und Biomarkern untersucht, wie sich die Lärmbelastung zu Hause langfristig auf das Herzkreislaufsystem und den Metabolismus auswirkt. Schliesslich wurden in einem Schlaflaborexperiment freiwillige Probanden während sechs Nächten verschiedenen mit Lautsprechern wiedergegebenen Lärmszenarien ausgesetzt und Effekte auf den polysomnographisch erfassten Schlaf, den Kreislauf (Blutdruck, Herzratenvariabilität etc.), den Metabolismus (Glukosetoleranz), endokrinologische

Das Editorial zu diesem Artikel finden Sie auf S. 71 in dieser Ausgabe.



Martin Röösl

Parameter (Melatonin und Kortisol) und auf die kognitive Leistungsfähigkeit (Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis) am Folgetag analysiert.

In der SiRENE-Studie wurde die Lärmbelastung durch Strassen-, Schienen- und Luftverkehr erstmals für die gesamte Schweizer Bevölkerung für das Jahr 2001 und 2011 modelliert [6]. Neben der Höhe der durchschnittlichen Exposition wurden dabei auch andere Charakteristika wie etwa die tageszeitliche Verteilung oder die «Ereignishaftigkeit» der Belastung ermittelt. Um letztere abzubilden, wurde ein neues Mass, das *Intermittenzverhältnis* («intermittency ratio» [IR]), entwickelt, das ausdrückt, welchen prozentualen Anteil einzelne voneinander klar abgrenzbare Lärmereignisse (z.B. Überflüge oder Zugsvorbeifahrten) zur gesamten Lärmbelastung beisteuern [7]. Bahn- und Fluglärm etwa besteht aus einer Aneinanderreihung einzelner Lärmereignisse und weist deshalb a priori ein relativ hohes IR auf, das nur in Situationen mit hohem Hintergrundgeräusch reduziert

wird (Abb. 1). Strassenlärm weist in kurzen Abständen und bei kleinen Verkehrsmengen ebenfalls ein hohes IR auf, während grössere Abstände und hohe Verkehrszahlen (z.B. eine Autobahn in 500 m Entfernung) eher zu einem gleichmässigen, rauschartigen Geräusch und somit zu einem tiefen IR führen. Abbildung 1 verdeutlicht die Unterschiede im Verlauf des Lärmpegels zwischen einer Lärmsituation mit einem hohen (Bahnlärm) und einer solchen mit einem geringen IR (Strassenlärm).

### Lärmexposition in der Schweiz

Die schweizweiten Lärmberechnungen ergaben, dass im Jahr 2011 rund 40% der Bevölkerung an ihrem Wohnort tagsüber mehr als 55 dB Strassenlärm ausgesetzt waren. Für Bahn- und Fluglärm machten die entsprechenden Anteile 5 und 2% aus (Abb. 2). In der Nacht betrug die Bevölkerungsanteile oberhalb von 55 dB 15% für Strassen, 4% für Bahn- und 0,1% für Fluglärm. Im Rahmen des Projekts durchgeführte Lärmmessungen in 102 Wohnungen zeigten, dass im Durchschnitt bei geschlossenem Fenster der Aussenlärm um 28 dB, bei gekipptem Fenster um 16 dB und bei offenem Fenster um 10 dB gedämpft wird [8].

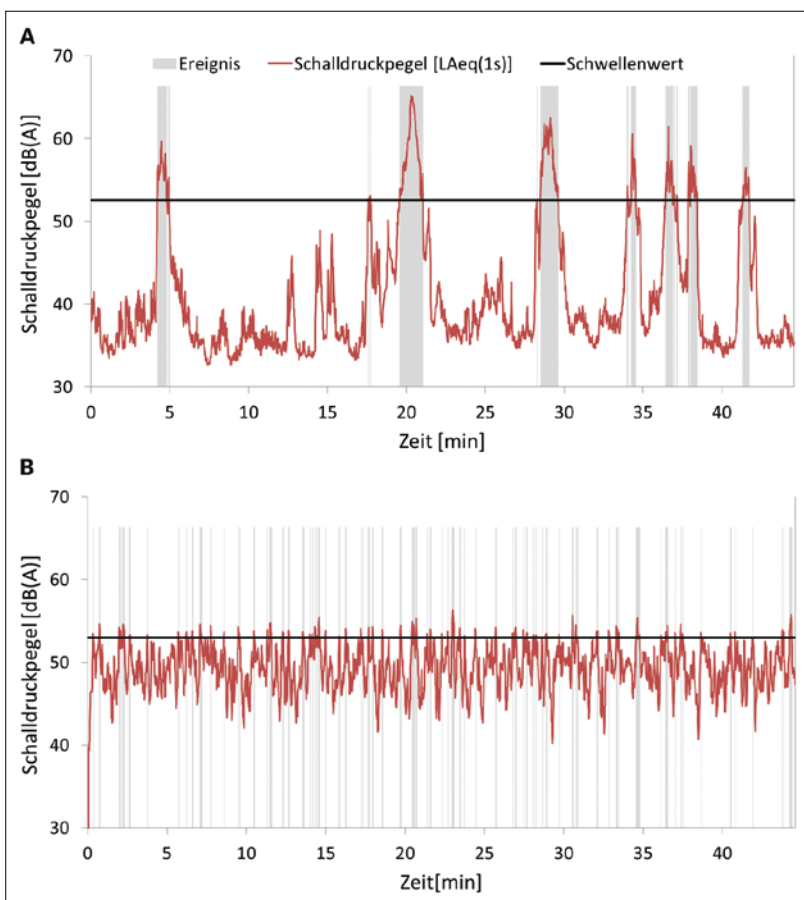
Eine Validierungsstudie mit wöchentlichen Messungen des klassischen Lärmasses ( $L_{den}$ )<sup>1</sup> fand eine gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Werten (mittlere Abweichung des  $L_{den}$ :  $1,6 \pm 5,0$  dB(A)) [9].

### Lärmbelastung und Auswirkungen auf den Schlaf

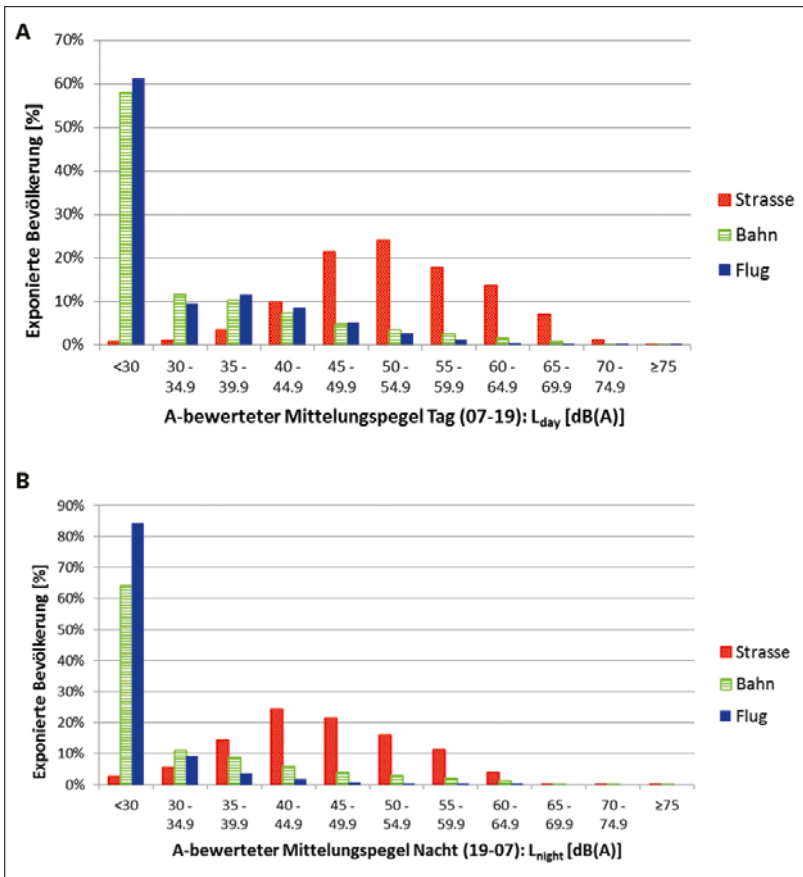
Abbildung 3 zeigt den Anteil der Personen, die sich durch Lärm stark belästigt respektive stark schlafgestört fühlen, als Funktion der Lärmbelastung. Die Kurven für Belästigung und Schlafstörungen sind für Strassen- und Bahnlärm jeweils sehr ähnlich, jedoch fühlen sich bei gleicher Lärmbelastung deutlich mehr Personen durch Fluglärm belästigt oder im Schlaf gestört. Zum Beispiel fühlen sich bei einem  $L_{den}$ -Wert von 60 dB rund 11% durch Strassen- oder Bahnlärm stark belästigt, aber rund dreimal mehr (34%) durch Fluglärm. Die Belästigung zeigt einen deutlichen Tagesverlauf. Am tiefsten ist die Lärmbelastung tagsüber zwischen 9 und 16 Uhr. Am höchsten ist sie morgens und abends sowie für Bahnlärm nachts. Entgegen der a priori formulierten Studienhypothese war ereignishafter Strassenlärm mit hohem IR weniger belästigend als kontinuierlicher Strassenlärm, etwa von einer Autobahn. Beim Bahn- und Fluglärm war es eher umgekehrt.

Experimentelle Untersuchungen zu den akuten Auswirkungen von Strassen- und Bahnlärmszenarien wurden bei 26 jungen (19–33 Jahre) und 18 älteren (51–70 Jahre) Personen während sechs Nächten im Schlaflabor durchgeführt. In der jeweils ersten und letzten

<sup>1</sup>  $L_{den}$  ist ein integrales Mass für den 24-Stunden-Durchschnittspegel, der die höhere Störwirkung in den Ruhezeiten berücksichtigt. Dabei wird in den Abendstunden (19:00–23:00) ein Pegelzuschlag von 5 dB und in der Nacht (23:00–07:00) einer von 10 dB gemacht.



**Abbildung 1:** Beispielhafte Pegel-Zeit-Verläufe bei A) Bahnlärm (Intermittenzverhältnis [IR] = 87%) und B) Strassenlärm mit eher gleichmässigem Rauschen ohne deutliche Ereignisse (IR = 19%) mit gleichem Durchschnittspegel. Um das IR zu berechnen, wird zuerst für jede Stunde der durchschnittliche Lärmpegel modelliert. Die Schallenergie von Ereignissen, die >3 dB über dem stündlichen Durchschnittspegel liegen (grau schraffiert) dividiert durch die ganze Schallenergie in der entsprechenden Stunde (Fläche unter der Kurve) ergibt dann das IR.



**Abbildung 2:** Anteil Personen in % der Schweizer Bevölkerung pro Expositionsclassen für Strassen- (rot), Bahn- (grün) und Fluglärm (blau) am Tag (oben) und nachts (unten). Dargestellt ist jeweils die Modellierung für den lautesten Fassadenpunkt der Wohnung.

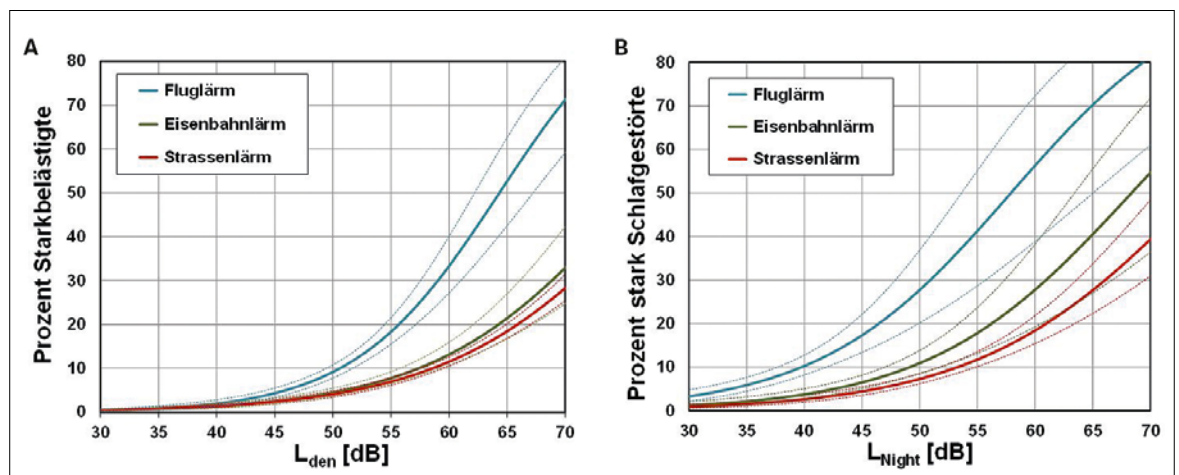
Schlaflabornacht wurde ein leises Hintergrundlärmszenario von 30 dB angewendet, dazwischen vier Lärmnächte mit vier verschiedenen Lärmszenarien (Strassen- und Bahnlärm) mit unterschiedlichen IR, aber gleichem durchschnittlichen Schallpegel ( $L_{eq} = 45$  dB). Es zeigte sich, dass Lärmereignisse in der Nacht die subjektiv

eingeschätzte Schlafqualität und die subjektive «Frische» negativ beeinflussten (Abb. 4). Mittels Polysomnographie wurden in den Nächten mit Lärm mehr kurzfristige kortikale Arousals (Frequenzbeschleunigung im Elektroenzephalogramm) gemessen als in Nächten mit leisem Hintergrundgeräusch [10]. Das beeinträchtigte jedoch die Schlaffeffizienz über die ganze Nacht nicht. Es zeigte sich auch, dass ereignishafter Lärm zu einer längeren Einschlafdauer (Schlafstadium 2) und zu mehr Wechseln der Schlafstadien führte. Eine Analyse der Reaktionen auf Bahnlärmereignisse bestätigte, dass für die Aufwachwahrscheinlichkeit neben dem Maximalpegel eines Ereignisses auch die Plötzlichkeit eine Rolle spielt. Das heisst, je schneller der Lärmpegel zunimmt, desto grösser die Wahrscheinlichkeit aufzuwachen.

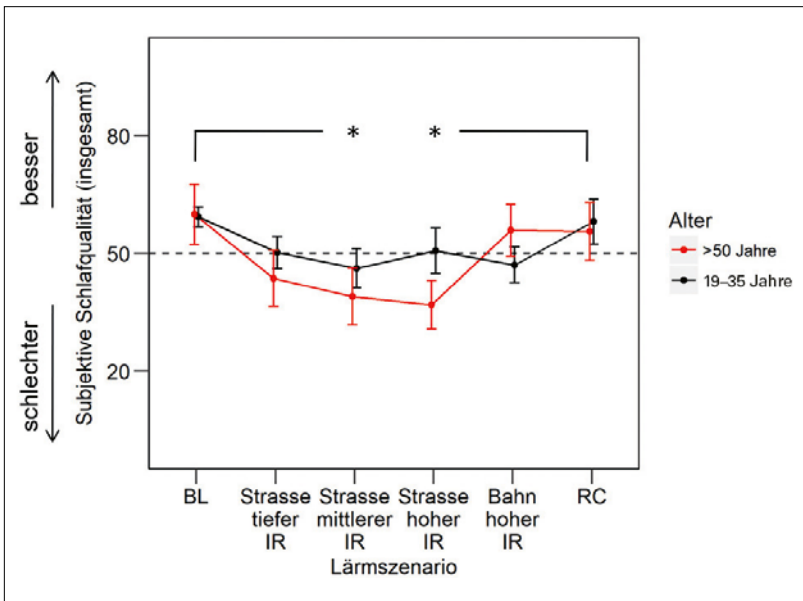
**Glukosetoleranz und Diabetes**

Nach vier Lärmnächten im Schlaflabor waren Glukosetoleranz und Insulinsensitivität bei jungen Probanden reduziert im Vergleich zur ersten Nacht ohne Verkehrslärm [11]. Nach Nächten mit hohem IR war die Glukoseregulation auch noch nach der darauffolgenden Erholungsnacht ohne Verkehrslärm beeinträchtigt, während sich nach Nächten mit niedrigem IR die Glukoseregulation eine Nacht später wieder erholt hatte.

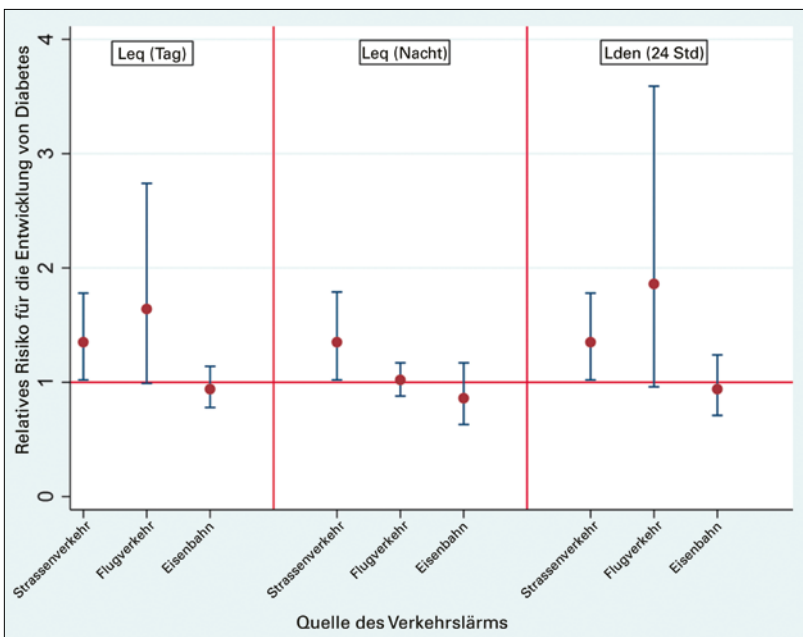
Diese Befunde passen zu den Ergebnissen aus der SAPALDIA-Studie [12]. Bei einer Kohorte von 2631 Personen erhöhte sich nach Berücksichtigung einer Vielzahl von weiteren Einflussfaktoren wie Luftverschmutzung, Ernährungs- und Bewegungsgewohnheiten das Risiko, zwischen 2002 und 2011 an Diabetes zu erkranken um 35% (95% Vertrauensintervall [CI]: 2–78%) pro 10 dB Zunahme der Strassenlärmbelastung am Wohnort (Abb. 5). Tendenziell war auch ein Zusammenhang mit Fluglärm ersichtlich, allerdings wohnten nur wenige der Studien-



**Abbildung 3:** Anteil stark belästigter Personen (A) sowie Anteil stark schlafgestörter Personen (B) in Abhängigkeit der Strassen-, Bahn- und Fluglärmbelastung (inklusive 95% Vertrauensintervalle).



**Abbildung 4:** Subjektive Schlafqualität nach Nächten mit unterschiedlichem Intermittenzverhältnis (IR) im Vergleich zur ersten (BL) und letzten (RC) leisen Nacht (30 dB) für die beiden Altersgruppen. Statistisch signifikante Unterschiede sind mit einem Stern markiert.



**Abbildung 5:** Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und dem Risiko für Diabetesinzidenz. Die gezeigten Effektgrößen beziehen sich auf einen Unterschied in der Lärmbelastung zwischen 1. und 4. Quartil der SAPALDIA-Kohorte (10 dB für alle Strassenlärm-, 11 dB für alle Bahnverkehrslärm- und 12 dB für alle Flugverkehrslärmmasse). Alle Werte sind adjustiert für Alter, Geschlecht, Ausbildungsgrad, sozio-ökonomischen Index des Wohnumfelds, Rauchstatus und -intensität, Früchte- und Gemüsekonsum, körperliche Aktivität, Body-Mass-Index im zeitlichen Verlauf und Studienregion (adapted/ translated with permission from [12]: Eze IC, et al. Long-term exposure to transportation noise and air pollution in relation to incident diabetes in the SAPALDIA study. *Int J Epidemiol.* 2017;46(4):1115-25. doi:10.1093/ije/dyx020. © The Author 2017. Published by Oxford University Press on behalf of the International Epidemiological Association. This figure is not covered by the Open-Access licence of this publication. For permissions contact journals.permissions@oup.com).

teilnehmer in von Fluglärm stark belasteten Regionen. Der Zusammenhang mit Lärm war linear und ohne erkennbaren Schwellenwert. Die Risikoerhöhung für Strassenlärm war unabhängig von der Luftbelastung, dem IR, der subjektiven Lärmbelastigung und der Lärmempfindlichkeit, nahm jedoch mit der Anzahl Lärmereignisse zu. Tendenziell fand sich ein stärkerer Zusammenhang bei Personen, die zugleich über Schlafprobleme berichteten.

Genetische Analysen bei den Teilnehmenden der SAPALDIA-Studie unterstützen die Kausalität dieser beobachteten Assoziation [13]. Der Zusammenhang zwischen Verkehrslärm und glykolysiertem Hämoglobin – einem Langzeitmass für den Blutzuckergehalt – war besonders ausgeprägt bei Personen mit einer genetischen Prädisposition für eine Dysregulation des zirkadianen Melatoninrhythmus. Der Anstieg des glykolysierten Hämoglobins mit zunehmendem Verkehrslärm war am stärksten bei Patienten, die bereits an Diabetes litten. Die SAPALDIA-Studie hat auch gezeigt, dass das Risiko für Übergewicht mit der Lärmbelastung am Wohnort zu- [14] und die körperliche Aktivität abnimmt [15]. Das deutet darauf hin, dass lärmbedingte Störungen des Schlafs und eine Abnahme der Bewegungsfreude tagsüber sich langfristig ebenfalls negativ auf den Metabolismus und das Herz-Kreislaufsystem auswirken können.

### Herz-Kreislaufsystem

In der SAPALDIA-Studie wurde auch der Einfluss des Lärms auf die arterielle Steifheit untersucht [16]. Je höher die arterielle Steifheit, desto höher das Risiko für eine spätere kardiovaskuläre Erkrankung. Wiederum unter Berücksichtigung einer Vielzahl weiterer Einflussfaktoren wie Rauchen oder körperliche Aktivität war bei den 2775 untersuchten Studienteilnehmern die arterielle Steifheit mit zunehmender Bahnlärmexposition am Wohnort erhöht. Auch dieser Zusammenhang war unabhängig von der Luftbelastung am Wohnort, der subjektiven Lärmbelastigung und Lärmempfindlichkeit. Etwas stärker ausgeprägt war die Assoziation bei Personen mit hoher Tagesmüdigkeit und bei hohem IR in der Nacht.

Im Rahmen der SNC wurden alle kardiovaskulären Todesfälle, die in der Schweiz zwischen 2000 und 2008 aufgetreten sind, im Hinblick auf die Lärmexposition am Wohnort analysiert [17]. Der stärkste Zusammenhang mit Verkehrslärm wurde für Herzinfarkt-todesfälle beobachtet (Abb. 6). Im Vergleich zu wenig exponierten Personen war das Sterblichkeitsrisiko je nach Lärmquelle ab einem  $L_{den}$  von 40–50 dB signifikant erhöht. Pro 10 dB Zunahme stieg das Risiko, an einem Herzinfarkt zu sterben, um 4,0% (95% CI 2,1–5,9%) für Strassenverkehrs-, um 2,0% (CI 0,7–3,3%) für Bahn- und um 2,7%

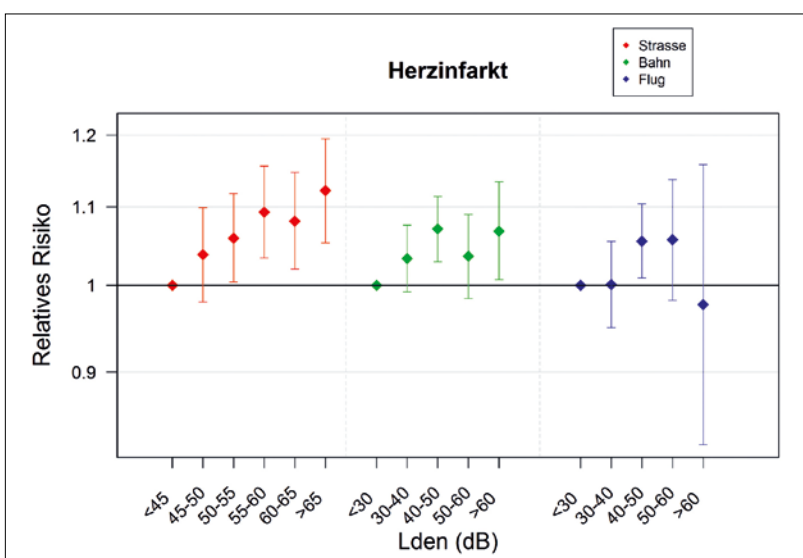
(CI 0,6–4,3%) für Fluglärm an. Unabhängig von der Lärmbelastung spielte das IR eine Rolle. Das Sterberisiko war zusätzlich erhöht bei mittlerem IR im Vergleich zu geringem oder sehr hohem IR. Andere kardiovaskuläre Todesfälle wie hypertoniebedingte Todesfälle, Herzinsuffizienz und ischämische Schlaganfälle waren ebenfalls mit Verkehrslärm assoziiert, am stärksten mit Strassenverkehrslärm. Die ermittelten Zusammenhänge mit Lärm waren unabhängig von der Luftbelastung. Zusätzliche Analysen legen nahe, dass für akute Herzerkrankungen vor allem nächtlicher Lärm problematisch ist, während für nichtakute Erkrankungen wie Herzinsuffizienz der Tageslärm bedeutender zu sein scheint [18].

## Diskussion

Mit der SiRENE-Studie war es möglich, gesundheitliche Auswirkungen von Strassen-, Bahn- und Fluglärm erstmals in einem grösseren Kontext in der Schweiz zu untersuchen. Eine Stärke der Studie liegt in der detaillierten und flächendeckenden Expositionsmodellierung der drei wichtigsten Verkehrsquellen für die epidemiologischen Untersuchungen und die Bevölkerungsbefragung sowie in den realitätsnahen Lärmsimulationen im Schlaflabor. Das neu entwickelte Mass des IR erlaubte neben der durchschnittlichen Lärmexposition auch den Einfluss der Ereignishaftigkeit zu untersuchen. Die Kombination von experimentellen und epidemiologischen Forschungsmethoden tragen zu einem verbesser-

ten Verständnis der Kausalität der beobachteten Assoziationen bei. So können die beobachteten Erkrankungen und Todesfälle aus den beiden epidemiologischen Studien plausibel mit akuten physiologischen Effekten der experimentellen Schlaflaborstudie sowie den subklinischen Parametern in der SAPALDIA-Studie erklärt werden. Dennoch fanden sich auch einige Resultate, die nicht vollkommen konsistent sind und möglicherweise auf die typischen Schwächen in solchen Untersuchungen zurückzuführen sind. In beobachtenden Studien sind dies zum Beispiel Fehler in der Abschätzung der Langzeitexposition oder der Einfluss von anderen nicht kontrollierbaren Faktoren. In experimentellen Studien gibt es Unsicherheiten, inwiefern die Ergebnisse auf die Allgemeinheit und auf die realen, gewohnten Expositionssituationen zuhause verallgemeinert werden können.

Eine Ausgangshypothese der SiRENE-Studie war, dass ereignishafter Lärm schädlicher und belästigender ist als kontinuierlicher Lärm bei gleichem Durchschnittspegel. Diese Hypothese konnte nicht eindeutig bestätigt werden. Zwar waren im Schlaflabor tatsächlich für viele Parameter deutlichere Effekte bei hoher Intermitenz zu beobachten und auch die arterielle Steifheit in der SAPALDIA-Studie nahm mit zunehmender nächtlicher Intermitenz zu. Für akute kardiovaskuläre Todesfälle war jedoch vor allem ein mittleres IR problematisch und für kardiovaskuläre Todesfälle mit einer chronischen Grunderkrankung sowie für Lärmbelästigung wegen Strassenlärm wurden die stärksten Zusammenhänge mit kontinuierlichem Lärm (tiefes IR) gefunden. Wie man also vermuten würde, scheint die Lärmcharakteristik zwar eine Rolle zu spielen, aber unterschiedlich je nach Lärmquelle und betrachteter Auswirkung. Weitere Untersuchungen sollten klären, ob sich die in der SiRENE-Studie beobachteten Trends erhärten oder ob weitere Beschreibungsgrößen nötig sind, etwa die Länge von Pausen zwischen Lärmereignissen oder die Pegeländerungsgeschwindigkeit (Pegelflankensteilheit), um die beobachteten Effekte zu erklären. Ein besseres Verständnis der für die Gesundheit kritischen Lärmbelastungsgrößen ist Grundlage für eine adäquate Lärmbekämpfung und -regulierung. Damit kann man die zurzeit bestehenden Boni oder Mali für bestimmte Lärmquellen wissenschaftlich begründen und allenfalls generisch auch für andere Lärmarten anwenden, wo die Durchführung von empirischen Studien nicht möglich ist. Zum Beispiel gibt es in der Lärmschutzverordnung einen sogenannten «Schienen-Bonus» von mindestens 5 dB. Die SiRENE-Studie liefert nun Daten, um empirisch zu evaluieren, ob dieser gerechtfertigt ist. So zeigte sich, dass sowohl im Falle der Belästigung als auch bei lärminduzierten Schlafstörungen



**Abbildung 6:** Zusammenhang zwischen Strassen-, Bahn- und Fluglärm (modellierter  $L_{den}$  an der lautesten Fassade) und Herzinfarkt-Mortalitätsrisiko (inkl.  $\pm$  95% Vertrauensintervall) (adapted/translated by permission from [17]: Héritier H, et al. Transportation noise exposure and cardiovascular mortality: a nationwide cohort study from Switzerland. Eur J Epidemiol. 2017;32(4):307–15. doi:10.1007/s10654-017-0234-2. © Springer Science+Business Media Dordrecht 2017).

Korrespondenz:  
 Prof. Dr. Martin Röösli  
 Swiss TPH  
 Socinstrasse 57  
 CH-4051 Basel  
 martin.roosli[at]swisstph.ch

der Bahnlärm keineswegs als weniger störend erlebt wird als der Strassenlärm. Jedoch waren die Zusammenhänge von Bahnlärm mit Diabeteserkrankungen und Herzinfarktsterblichkeit weniger ausgeprägt als für Strassenlärm.

Die SiRENE-Studie liefert mehrere Hinweise, dass lärminduzierte Beeinträchtigungen des Schlafs sich langfristig auf die Gesundheit auswirken können. Dennoch zeigt SiRENE, dass auch Lärm am Tag gesundheitsrelevant ist. Die Belästigungswirkung von Lärm ist morgens und abends besonders ausgeprägt. Und für nichtakute Herztodesfälle war relativ gesehen die Lärmexposition am Tag bedeutsamer als jene der Nacht. Dies legt nahe, dass für akute Herzerkrankungen lärminduzierte Schlafprobleme ein wichtiger Mediator sind, während für nichtakute Herzerkrankungen die chronische Ausschüttung von Stresshormonen eine wichtige Rolle spielen könnte. Es trägt also wahrscheinlich eine Vielzahl von biologischen Mechanismen zu lärminduzierten gesundheitlichen Auswirkungen bei. Nächtliche Schlafbeeinträchtigungen, reduzierte Motivation sich zu bewegen und die Aktivierung des sympathischen Nervensystems sind drei von mehreren möglichen Prozessen, die wahrscheinlich auch miteinander verknüpft sind. Ein verbessertes Verständnis der besonders kritischen Zeitperioden ist für eine wirkungsorientierte und evidenzbasierte Regulierung des Verkehrslärms grundsätzlich wünschbar.

Nicht abschliessend geklärt ist mit der SiRENE-Studie die Frage, ob Lärmelastigung oder individuelle Lärmempfindlichkeit eine zusätzliche modifizierende Risikowirkung für somatisch-medizinische Endpunkte haben. Aus den Resultaten der SAPALDIA-Studie gibt es keine Hinweise, dass Lärm für Menschen, die sich deswegen

belästigt fühlen, schädlicher wäre. Anders ausgedrückt, Lärm ist auch für Personen schädlich, die nicht lärmelastigt sind. Um das Verständnis zu möglichen modifizierenden Wirkungen von Lärmelastigung und der individuellen Lärmsensitivität zu verbessern, braucht es in künftigen Kohortenstudien möglichst objektive und kontextunabhängige Instrumente, die diese Grössen messen.

SiRENE bestätigt einen generellen Trend in der Lärmforschung, dass mit verbesserter Lärmmodellierung Gesundheitseffekte schon bei geringerer Lärmelastigung nachgewiesen werden können als dies früher der Fall war. Auch die Tatsache, dass heutzutage der Verkehrslärm zu einer grösseren Belästigung führt, als dies gemäss den 20-jährigen EU-Kurven [19] zu erwarten wäre, entspricht einem generellen Trend in der Lärmforschung. Eine allfällige untere Schwelle, bei der Lärm nicht gesundheitsschädlich ist oder nicht zur Belästigung führt, kann in SiRENE, wie auch in vielen anderen neueren Studien, nicht mehr nachgewiesen werden. Damit scheint ein lineares Expositions-Wirkungs-Modell ohne Schwellenwert für Lärm gegeben zu sein, wie dies beispielsweise auch für Luftschadstoffe und ionisierende Strahlen postuliert wird. Das impliziert einerseits, dass die aktuell geltenden Lärmgrenzwerte keinen umfassenden Gesundheitsschutz bieten und dass realistischere auch keine solchen umfassend schützenden Grenzwerte festgelegt werden können. Andererseits bedeutet dies, dass jede Massnahme, die zu einer Reduktion der Lärmelastigung beiträgt, und sei sie noch so gering oder scheinbar unbedeutend, potenziell auch den Gesundheitszustand der Bevölkerung verbessern kann. Dem sollte bei der Regulierung von Lärm verstärkt Rechnung getragen werden.

## Das Wichtigste für die Praxis

- Rechnet man die SiRENE-Ergebnisse auf die ganze Schweiz hoch, verursacht die Strassen-, Bahn- und Fluglärmelastigung jährlich rund 2500 Diabeteserkrankungen und etwa 500 kardiovaskuläre Todesfälle.
- Neben den klassischen individuellen Risikofaktoren wie Bewegungsmangel, fett-/zuckerreiche Ernährung und Rauchen kann auch die Lärmelastigung am Wohnort das Risiko kardiometabolischer Erkrankungen erhöhen.
- Eine Reduktion der Lärmelastigung kann zur Prävention kardiometabolischer Krankheiten beitragen.
- Bei Behandlung wegen Diabetes oder Herz-Kreislauf-erkrankungen ist zu prüfen, ob eine Lärmverminderung am Wohnort als begleitende Massnahme realisiert werden kann und ob dies einen zusätzlichen therapeutischen Nutzen generiert.

### Verdankung

Die SiRENE-Studie wurde vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) mit dem Sinergia-Förderinstrument (CRSII3\_147635) und vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert. Die SAPALDIA-Studie (PI N. Probst-Hensch) wird seit 1991 kontinuierlich vom SNF finanziert: Gesuchsnummern 33CS30-148470/1&2, 33CSCO-134276/1, 33CSCO-108796, 324730\_135673, 3247BO-104283, 3247BO-104288, 3247BO-104284, 3247-065896, 3100-059302, 3200-052720, 3200-042532, 4026-028099, PMPDP3\_129021/1, PMPDP3\_141671/1. Die SNC-Studie wird ebenfalls vom SNF finanziert (Gesuchsnummern 3347CO-108806, 33CS30\_134273). Mitglieder der SNC-Gruppe sind Matthias Egger (Co-PI), Milo Puhani (Co-PI), Adrian Spoerri, Marcel Zwahlen, Matthias Bopp, Nino Künzli, Michel Oris und Murielle Bochud.

### Disclosure statement

Die Autoren haben keine finanziellen oder persönlichen Verbindungen im Zusammenhang mit diesem Beitrag deklariert.

### Literatur

Die vollständige Literaturliste finden Sie in der Online-Version des Artikels unter <https://doi.org/10.4414/smfm.2019.03433>.