



SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 339

Lärm

Zurechnung von
lärmbedingten
Gesundheits-
schäden auf den
Strassenverkehr



Bundesamt für
Umwelt, Wald und
Landschaft
BUWAL

SCHRIFTENREIHE
UMWELT NR. 339

Lärm

Zurechnung von
lärmbedingten
Gesundheits-
schäden auf den
Strassenverkehr

Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 2002

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL

Autor

Prof. Dr. Ruedi Müller-Wenk, Institut für Wirtschaft
und Ökologie, Universität St. Gallen.

Zitierung

MÜLLER-WENK, R., 2002: Zurechnung von lärm-
bedingten Gesundheitsschäden auf den Strassen-
verkehr. Schriftenreihe Umwelt Nr. 339. Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 70 S.

Begleitung BUWAL

Hans Bögli, Abt. Lärmbekämpfung

Gestaltung

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Titelfoto

BUWAL/Docuphot

Dank

Wesentliche Anregungen zu dieser Studie sind einem
Gremium zu verdanken, in dem Hans Bögli (BUWAL
Abt. Lärmbekämpfung), Cornelia Conzelmann
(Gesundheitsförderung Kanton Basel-Land) und
Theo Koller (IHA ETH Zürich) mitwirkten.

Dank der Unterstützung von Peter Graf und Silvio
Grauweiler (Fachstelle Lärmschutz Kanton Zürich)
war es möglich, Berechnungen unter Verwendung des
Lärmmodells LUK auszuführen.

Die benötigten Auswertungen unter Benutzung der
Daten aus der schweizerischen Lärmstudie 90 wurden
von Carl Oliva ausgeführt und kommentiert.

Wertvoll war die Mitwirkung von Laszlo Matefi
(SUVA Schweizerische Unfallversicherungsanstalt)
für die Durchführung der Panelstudie mit den Ärzten
der SUVA.

Ein sorgfältiges Peer-Review der ganzen Studie wurde
durchgeführt durch Gabor Doka.

Bezug

BUWAL

Dokumentation

CH-3003 Bern

Fax: +41 (0) 31 324 02 16

E-Mail: docu@buwal.admin.ch

Internet: www.buwalshop.ch

Diese Publikation ist auch in französischer und
englischer Sprache erhältlich.

Bestellnummer

SRU-339-D

Preis

CHF 10.– (inkl. MWST)

© BUWAL 2002

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5	5 Schaden-Analyse	47
Vorwort	7	5.1 Das DALY-Konzept	47
1 Einführung	9	5.2 Disability Weights DW für Schlaf-Störungen und Kommunikations-Störungen	48
1.1 Schallemissionen als Umweltbelastung	9	5.3 Resultate und Auswertung	49
1.2 Bisher vorherrschende Beurteilungsverfahren für Schallbelastung und deren Folgen	9	5.4 DALY-Werte pro 1000 Fahrzeug-Kilometer im Schweizer Strassennetz	52
1.3 Beurteilung der Lärmwirkungen durch Modelle von Ursache-Wirkungs-Ketten	11	5.5 Betrachtungen zur Unsicherheit	54
1.4 Die Bedeutung von Verkehrslärm und Strassenverkehrslärm	12	6 Schlussbemerkungen	59
2 Die Wirkungskette als Grundlage für verbesserte Beurteilung von Lärmschäden	13	6.1 Die Bedeutung der Gesundheitsbeeinträchtigung durch Strassenverkehrslärm	59
3 Ausbreitungs- und Expositions-Analyse	15	6.2 Andere Lärmquellen: Bahnlärm und Fluglärm	61
3.1 Bekannte Transport-Route	15	6.3 Übertragung der Ergebnisse auf die Behandlung von Strassenverkehr ausserhalb der Schweiz	62
3.2 Unbekannte Transportroute	18	7 Literatur	63
3.2.1 Annahme über Verkehrsverteilung bei unbekannter Transportroute	19	Anhang	65
3.2.2 Aufteilung des Ist-Verkehrs auf das Strassennetz	20	Information/Fragebogen an SUVA-Aerzte	65
3.2.3 Ermittlung DeltaLeq für Zusatzverkehr pro Strassentyp	22		
3.2.4 Ergebnis der Ausbreitungsanalyse: DeltaLeq pro Fahrzeugtyp	26		
3.2.5 Expositionsanalyse: Die von Strassenlärm belastete Schweizer Bevölkerung	27		
4 Wirkungsanalyse	31		
4.1 Überblick über die lärmbedingten Wirkungen auf die menschliche Gesundheit	31		
4.2 Die Fragestellung der Wirkungsanalyse bei Schlaf- und Kommunikations-Störungen	33		
4.3 Die Auswertungen des Datenmaterials der schweizerischen «Lärmstudie 90»	34		
4.4 Verknüpfung von Ausbreitungs-, Expositions- und Wirkungsanalyse	40		
4.5 Abschätzungen zu verkehrslärmbedingten Herzinfarkten	42		

Abstracts

Keywords:

Road traffic noise,
health impairment,
dose-effect
characteristic,
disability adjusted life
years (DALY)

The study presents a new computational procedure for the determination of the principal forms of health impairment resulting from noise emissions of road vehicles in Switzerland. The magnitude of health impairment was determined separately for each vehicle category and is expressed per kilometre of distance driven. The calculations show that the overall state of health in Switzerland is to a lesser extent influenced by serious but less frequent diseases such as heart attacks than by the much more frequently occurring, albeit less serious, impairments such as insomnia and communication disturbance. The number of persons subject to specific levels of noise was determined on the basis of a traffic distribution model and by using the road traffic noise model of the Canton of Zurich (LUK). The number of cases of health impairment was determined from a dose-effect characteristic based on data from the Swiss Noise Study 90. An assessment of the severity of the types of health impairment caused by traffic noise was performed by a doctors' panel.

Stichwörter:

Strassenlärm,
Gesundheitsschäden,
Dosis-Wirkungs-
Charakteristik,
Disability Adjusted
Life-Years (DALY)

Die Studie präsentiert ein neues Rechenverfahren zur Bestimmung der hauptsächlichsten Gesundheitsschäden in der Schweiz, welche die Folge der Lärmerzeugung der verschiedenen Kategorien von Strassenverkehrs-Fahrzeugen pro Kilometer Transportdistanz sind. Die Berechnungen zeigen, dass nicht die seltenen Fälle schwerer Erkrankungen wie Herzinfarkte ausschlaggebend sind für den gesamten Gesundheitsschaden, sondern die sehr häufigen leichteren Schlaf- und Kommunikationsstörungen. Die Zahl der Personen, welche von einem bestimmten Pegelbereich des Strassenverkehrs belastet sind, wird mithilfe eines Verkehrs-Verteilungsmodells sowie des Zürcher Strassenlärm-Modells LUK ermittelt. Die Zahl der Fälle von Gesundheitsbeeinträchtigung wird bestimmt mit Hilfe einer Dosis-Wirkungs-Charakteristik auf Basis der Auswertung von Daten der schweizerischen Lärmstudie 90. Die Beurteilung der Schwere der Gesundheitsschäden ist durch ein Panel von Ärzten vorgenommen.

Mots-clés:

bruit de la route,
atteintes à la santé,
caractéristique
dose-effets,
disability adjusted life-
years (DALY)

L'étude présente une nouvelle méthode de calcul permettant de déterminer les principales atteintes à la santé imputables en Suisse au bruit généré par les diverses catégories de véhicules routiers et par kilomètre de distance accomplie. Les calculs montrent que ce ne sont pas les rares cas de maladies graves, tel l'infarctus du myocarde, qui sont déterminants pour l'ensemble des atteintes à la santé, mais bien plus les très fréquentes et plus bénignes perturbations du sommeil et les troubles de la communication. Le nombre de personnes exposées à un niveau de bruit donné dû au trafic routier est déterminé au moyen d'un modèle de répartition des transports ainsi que du modèle zurichois de bruit de la route LUK. Le nombre d'atteintes à la santé est déterminé à l'aide d'une caractéristique dose-effets sur la base de l'évaluation de données issues d'une étude du bruit réalisée en Suisse en 1990 (Lärmstudie 90). L'appréciation de la gravité des atteintes à la santé a été effectuée par un panel de médecins.

Parole chiave:
rumore stradale,
danni alla salute,
relazione dose-effetto,
Disability Adjusted
Life-Years (DALY)

Lo studio presenta un nuovo metodo di calcolo per determinare i principali danni alla salute imputabili in Svizzera al rumore di diverse categorie di veicoli stradali al chilometro di distanza percorsa. I calcoli indicano che non sono i rari casi di malattie gravi, quali gli infarti, a causare tutti i danni alla salute, bensì i più frequenti e meno gravi disturbi del sonno e della comunicazione. Il numero di persone esposte a un determinato livello di rumore dovuto al traffico stradale viene calcolato tramite un modello di distribuzione del traffico e il modello zurighese di rumore stradale (LUK). Il numero di casi di danni alla salute viene stabilito mediante una relazione dose-effetto sulla base della valutazione dei dati dello studio sull'inquinamento fonico realizzato in Svizzera nel 1990. La valutazione della gravità dei danni alla salute viene effettuata da un gruppo di medici.

Vorwort

Verkehrslärm ist heute wohl das von der schweizerischen Bevölkerung am unmittelbarsten erlebte Umweltproblem: Strassenverkehr, Flugverkehr und Bahnverkehr verursachen bei einem grossen Teil der Einwohnerschaft eine Belastung, welche die Lebensbedingungen erheblich verschlechtert. Vor allem beim Strassenverkehrslärm ist überdies nicht abzusehen, wie sich die Verhältnisse künftig wieder einmal durchgreifend bessern könnten.

Demgegenüber nimmt das Thema Lärm bisher bei den gängigen Verfahren zur Beurteilung von Umweltwirkungen, wie Umweltverträglichkeitsprüfung oder Ökobilanzierung, eine wenig gewichtige Position ein. Dies dürfte nicht zuletzt auf ungelöste methodische Probleme bei der Erfassung von Lärm und Lärmwirkungen zurückzuführen sein.

Die vorliegende Studie will einen Beitrag zur Füllung dieser Lücke erbringen. Sie zeigt auf, wie die einzelne Fahrt eines Motorfahrzeugs in schlüssiger Weise mit ihren Lärmwirkungen auf die menschliche Gesundheit verknüpft werden kann. Obschon die gesundheitliche Wirkung eines einzelnen Transports extrem klein ist, kommt ihrer Erfassung wesentliche Bedeutung zu, denn angesichts der grossen Verkehrsmengen addieren sich kleinste Wirkungen zu einem grossen Total mit erheblichen Gesundheitsfolgen.

Der Schaden an menschlicher Gesundheit wird in dieser Studie nicht in Geld quantifiziert, sondern in Anzahl Fällen der auftretenden wesentlichen Gesundheitsstörungen. Die relative Schwere dieser Gesundheitsstörungen wird dabei nach einem von der WHO (World Health Organisation) entwickelten Verfahren gewichtet. Wo eine Schadensbemessung in Geld wünschbar oder notwendig erscheint, können diese Fallzahlen und Gewichtungsfaktoren als fundierte Basis für die Monetarisierung dienen.

Bundesamt für Umwelt,
Wald und Landschaft

Urs Jörg
Chef der Abteilung Lärmbekämpfung

1 Einführung

Wenn wirtschaftliche Prozesse ablaufen, so entstehen zusätzlich zum angestrebten Produkt auch stoffliche und energetische Emissionen, es werden Rohstoffe verbraucht, und es wird Raum beansprucht. Diese Umwelteinwirkungen können zu Zustandsverschlechterungen der natürlichen Lebensräume und des Lebens in diesen Lebensräumen führen.

1.1 Schallemissionen als Umweltbelastung

Im Rahmen der Emissionen in die Umwelt kommt der energetischen Emission «Schall» insofern eine besondere Stellung zu, als die Schallemission

- im Gegensatz zu vielen stofflichen Emissionen nur im Nahbereich der Emissionsquelle wirksam ist und schon kurze Zeit nach der Schallerzeugung abflaut
- von den Menschen durch ein leistungsfähiges Sinnesorgan auch beim Empfang sehr geringer (Schall-)Energienmengen wahrgenommen wird.

So werden Schallemissionen, etwa im Vergleich zu Emissionen von klimaverändernden Gasen, von manchen Leuten als lokale, kurzzeitige und daher vermeintlich weniger bedeutsame Umwelteinwirkung qualifiziert, während auf der anderen Seite die Lärmbetroffenen die Schallemissionen als dauernde und schwerwiegende Störung wahrnehmen. Es ist daher besonders schwierig, adäquate und breit akzeptierte Messgrößen für die Schallbelastung und deren Wirkungen auf die Menschen oder gar das nichtmenschliche Leben festzulegen. Noch schwieriger ist es demzufolge, im Rahmen der Gesamtbeurteilung von Umweltwirkungen alternativer Handlungsmöglichkeiten die Wirkungen der Schallemissionen gegen die Wirkungen andersartiger Emissionen oder Verbrauch natürlicher Rohstoffe abzuwägen.

1.2 Bisher vorherrschende Beurteilungsverfahren für Schallbelastung und deren Folgen

Für die Bestimmung der Schallbelastung für einen bestimmten Standort und Zeitraum steht heute im Vordergrund die Messgrösse $L_{Aeq,T}$, das heisst der in Dezibel ausgedrückte Schalldruckpegel L , der über eine längere Zeitdauer T energetisch gemittelt ist, und bei dem die Frequenzbereiche nach der Empfindlichkeitsskala A des menschlichen Ohrs gewichtet sind. Dieses Mass kann allerdings nicht alle relevanten Eigenschaften des Schalls abbilden, weshalb auch noch andere Masse existieren, die je nach Art der Schallquelle und Schallbeschaffenheit ein ergänzendes oder verfeinertes Bild der Schallbelastung ergeben (WHO 2000, S.3ff.; SUVA 1997, S.14/15).

Was die Folgen der Schallbelastung anbelangt, steht in dieser Studie die Wirkung auf den Menschen im Vordergrund, obschon auch eine Wirkung auf Tiere nicht ausgeschlossen wird. Vor allem unerwünschter Schall, als «Lärm» bezeichnet, beeinträchtigt das Wohlbefinden des Menschen und kann seine Gesundheit schädigen. Es gibt eine beträchtliche Zahl solcher Wirkungen (WHO 2000, S.20ff., SUVA

1997, S.30ff.) Diese Wirkungen reichen vom vorübergehenden Ärger über ein lautes Fest in der Nachbarwohnung bis zu schweren und bleibenden Gesundheitsschäden wie Hörverlust oder Herzkrankheiten. Während die schwereren lärmbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen eher selten auftreten, zeigen europaweit die grossen Bevölkerungsanteile mit Schallbelastungen von 60 dB und mehr (EUROSTAT 1995, S.289), dass etwa ein Viertel der Landesbevölkerungen lärmbedingt unter leichteren Gesundheitsbeeinträchtigungen leiden dürfte. Wenn man sich ein Bild über die Folgen der Schallbelastung auf den Menschen machen will, so kann man diese leichteren aber häufigen Fälle nicht einfach ignorieren, auch wenn sie medizinisch nicht so klar diagnostizierbar sind wie die schwerwiegenden aber selteneren Fälle von Hörverlust und Herzversagen.

Weil es schwierig ist, bei einer bestimmten Lärmbelastung die gesundheitlichen Folgen für die betroffene Bevölkerung kausal zu beschreiben, wählt man in der Praxis bisher häufig den Weg des «Hedonic Pricing» für die quantitative Beurteilung von Lärmschäden. Es wird bei diesem Vorgehen davon ausgegangen, dass der Marktpreis für eine Wohnung oder ein Haus unter anderem abhängig ist von der Beeinträchtigung des Wohlbefindens der Bewohner durch den am Standort vorhandenen Lärmpegel. Gelingt es, durch geeignete Datensätze und Rechenverfahren den Einflussfaktor «Lärmpegel» auf die Preisbildung von den anderen Faktoren zu isolieren, so kann man mit dieser Methode ausdrücken, wie viel Franken Mietzinsdifferenz oder Bodenpreis-Differenz die Erniedrigung des Schallpegels um eine Einheit wert ist. Das ist dann das in Geld ausgedrückte Mass für den angenommenen Schaden, wenn der Schallpegel nicht gesenkt wird. So enthält etwa der Schlussbericht «Externe Lärmkosten des Verkehrs», der im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen des UVEK ausgearbeitet wurde, folgendes Ergebnis: Aus einer Stichprobe von 380 Einfamilienhaus-Handänderungen im Kanton Zürich von 1995–1999 wird geschlossen, dass pro zusätzliches 1 Dezibel(A) Verkehrslärmbelastung der Kaufpreis um 0.66% abnimmt, was an der unteren Bandbreite der bisherigen Untersuchungen in der Schweiz (0.8 bis 1.2% pro DB(A)) liege (ECOPLAN 2000, S.32). Eine Übersicht über die Ergebnisse von Hedonic Pricing Studien betreffend Mietzinsreduktion bei steigendem Strassenverkehrslärm wird gegeben in (GVF 1998, S. 29).

Alternativ wird auch das Verfahren des «Contingent Valuation» benutzt, bei dem Lärmbetroffene befragt werden, wie viel sie für eine Lärmverringerung an ihrem Wohnort bezahlen würden, falls eine solche zu kaufen wäre. Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen sind in (UBA 1998, S. 62/63) dargestellt; dabei resultieren Zahlungsbereitschaften im Bereich von 15–25 DM pro Jahr, Einwohner und vermiedenen Dezibel Lärm. Rechnet man diese Werte unter Verwendung typischer Mittelwerte auf die obgenannten Schweizer Einfamilienhaus-Kaufpreise um, so stellt man fest, dass die deutschen Mietzins-Zahlungsbereitschaften knapp eine Grössenordnung tiefer liegen als die für die Schweiz eruierten Werte.

Derartige Methoden für die quantitative Bemessung von Umweltschäden durch Geldbeträge weisen Mängel auf. Abgesehen vom grundsätzlichen Vorbehalt gegen

die Tendenz, den Wert aller Dinge in Geldeinheiten ausdrücken zu wollen und darüber hinaus noch die Märkte als Schiedsrichter für die Wertbestimmung einzusetzen, haben diese Verfahren den Nachteil, dass sie nur statistische Koinzidenzen konstatieren und sich kaum mit der ursächlichen Verknüpfung von Emissionsvorgängen mit einzelnen Wirkungen auf die natürliche Umwelt befassen. Im weiteren führen solche Bewertungsverfahren dazu, dass die erst langfristig zutage tretenden Schädigungen systematisch untergewichtet werden, weil sie den Marktteilnehmern in der Regel nicht bewusst sind und nur durch Expertenwissen in das Verfahren eingebracht werden könnten: Wer heute ein Wohnhaus mit hoher Lärmbelastung kauft oder verkauft, weiss bedeutend weniger gut als ein Facharzt, welches die langfristigen Folgen dieser Lärmbelastung auf die Gesundheit der Bewohner sind, weshalb dieser Aspekt in der Preisbildung sicher nicht adäquat zum Ausdruck kommen kann.

1.3 Beurteilung der Lärmwirkungen durch Modelle von Ursache-Wirkungs-Ketten

In der vorliegenden Publikation soll gezeigt werden, wie die quantitative Ermittlung von Wirkungen der Schallemissionen auf die menschliche Gesundheit mithilfe einer mehr analytischen, den Kausalzusammenhängen näheren Methode erfolgen kann. Dabei wird auf das Konzept des «Damage-oriented Impact Assessment» zurückgegriffen, das in der neuesten Entwicklung der Ökobilanzierungsmethoden einen wichtigen Platz einnimmt (vgl. hierzu etwa GOEDKOOP 1999, HOFSTETTER 1998). Die modular aufgebaute Methode wurde in ihrer ersten Fassung schon im Jahr 1999 (MÜLLER-WENK 1999) publiziert: Im ersten Modul wird die Schallpegel-Erhöpfung in Wohngebieten als Folge einer zusätzlichen Transportaktivität modelliert; im zweiten Modul wird die Zahl der Menschen pro Bereich des Schallpegels und der Schallpegelerhöhung ermittelt. Im dritten Modul wird die Höhe des Schallpegels mit der Häufigkeit von wichtigen Arten der Gesundheitsbeeinträchtigung verknüpft; und im vierten Modul wird die relative Schwere einzelner Gesundheitsbeeinträchtigungen gewichtet. In der vorliegenden Arbeit sind vor allem die Module 3 und 4 gegenüber der Publikation von 1999 durch zusätzliche Untersuchungen verbessert worden.

Es steht damit ein Verfahren zur Verfügung, das unter Berücksichtigung der vorliegenden Lärm-Vorbelastung die Folgen von zusätzlichen Verkehrsaktivitäten auf den Gesundheitszustand der Bevölkerung quantitativ darstellt. Das Verfahren ist für den Fall von Strassenverkehrslärm ausgearbeitet worden, ist aber erweiterbar auf Schienenverkehrslärm (vgl. Abschnitt 6.2). Dank dem modularen Aufbau der Methode können einzelne Module jederzeit unter Verwendung neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse angepasst werden.

1.4 Die Bedeutung von Verkehrslärm und Strassenverkehrslärm

Gross ist die Zahl verschiedenartiger Schallquellen, welche zu einer Belastung der Menschen mit Lärm führen können. Zweifelsohne steht aber der Verkehr, und innerhalb des Verkehrs der Strassenverkehr, klar im Vordergrund, wenn man den Anteil der unter erheblicher Lärmbelastung lebenden Bevölkerung als Massstab nimmt. Für schweizerische Verhältnisse wird dies durch die Angaben in (BUWAL 1997, S. 127ff.) dokumentiert, für europäische Verhältnisse in (EUROSTAT 1995, S. 288/289). Aus diesem Grund konzentriert sich diese Publikation auf die Behandlung von gesundheitlichen Wirkungen des Strassenverkehrslärms. Indessen werden im Abschnitt 6 Hinweise gegeben auf die mögliche Anwendung des hier entwickelten Verfahrens auf Bahnlärm und Flugverkehrslärm.

2 Die Wirkungskette als Grundlage für verbesserte Beurteilung von Lärmschäden

Die Verfahren der Ökobilanzierung (Life-Cycle Assessment LCA) befassen sich damit, die Einwirkungen eines Produktions- oder Verbrauchs-Prozesses auf die natürliche Umwelt (bestehend aus menschlichem Leben, nichtmenschlichem Leben und der unbelebten Umwelt) darzustellen und zu evaluieren. Hier wird in neuerer Zeit mehr und mehr versucht, die Verbindung zwischen den Emissions- und Verbrauchs-Mengen eines Prozesses und der durch diese bewirkten Veränderung im Gütezustand der natürlichen Umwelt mittels Modellierung von Wirkungsketten darzustellen. Ausgehend vom Musterbeispiel human-toxikologischer Emissionen ergeben sich dann folgende Glieder der Wirkungskette:

- die **Ausbreitungsanalyse** (fate analysis) beschreibt, welche Änderung der Schadstoff-Konzentrationen in der Umwelt durch eine gegebene Emissionsmenge des betreffenden Stoffes bewirkt wird
- die **Expositionsanalyse** (exposure analysis) beschreibt, wie viele Menschen in welchem Umfang von solchen Konzentrationsänderungen betroffen sind
- die **Wirkungsanalyse** (effect analysis) beschreibt, was für Gesundheitseffekte bei einem Menschen zu erwarten sind, wenn er während einer bestimmten Dauer einer bestimmten Konzentration des Stoffes ausgesetzt ist
- die **Schadenanalyse** (damage analysis) beschreibt, wie hoch das Schadenausmass angenommen werden soll, wenn ein Mensch während einer bestimmten Dauer unter einem bestimmten Gesundheitseffekt leidet

Ein solches Vorgehen macht es möglich, z.B. den Einsatz von Dieselmotoren mit demjenigen von Benzinmotoren bezüglich der Folgen ihres unterschiedlichen Abgas-Spektrums auf die Humangesundheit quantitativ zu evaluieren, und zwar mit einem hohen Ausmass an wissenschaftlicher Objektivität. In ähnlicher Art könnten natürlich auch die Auswirkungen auf nicht-menschliches Leben untersucht und dargestellt werden.

Es ist daher interessant, die Folgen von Schallemissionen auf die Humangesundheit nach dem gleichen Konzept zu behandeln wie die Folgen von humantoxischen Stoffemissionen. Dabei fallen allerdings Besonderheiten der Schallemissionen und ihrer Wirkungen erschwerend ins Gewicht:

- eine einzelne Schallemission wird im Vergleich zu Stoffemissionen extrem rasch abgebaut, sodass sich aus Schallemissionen im allgemeinen nicht eine im Zeitverlauf einigermaßen stabile «Immissions-Konzentration» bildet: Man muss geeignete rechnerische Mittelwerte des Schalldrucks definieren, von denen sich der momentane Schalldruck freilich stark unterscheiden kann
- die von den Menschen als Lärm wahrgenommene Belastung mit Schall ist viel komplizierter zu beschreiben als die Immissionskonzentration eines Schadgases: Neben dem Energieinhalt des Schalls haben auch Frequenzstruktur, zeitliche Dynamik und Informationsinhalt des Schalls einen Einfluss auf die Wirkung beim Menschen
- das Vorliegen von schallbedingten Wirkungen beim Menschen ist mit «objektiven» Messmethoden weniger leicht zu erfassen als im Falle von stoffbedingten Wirkungen.

3 Ausbreitungs- und Expositions-Analyse

In der Ausbreitungsanalyse ist zu bestimmen, wie die Schallpegel $L_{Aeq,T}$ an allen Standorten dauernden menschlichen Aufenthalts sich erhöhen, wenn eine zusätzliche Transportaktivität ausgeführt wird, z.B. die Fahrt eines 40-Tonnen-Lastenzugs über 180 km. Das Ergebnis der anschliessenden Expositionsanalyse ist, wie viele Personen von einer bestimmten Erhöhung des Schallpegels $L_{Aeq,T}$ betroffen sind als Folge dieser zusätzlichen Transportaktivität.

Eine Transportaktivität findet statt auf Teilstrecken eines gegebenen nationalen oder kontinentalen Strassennetzes, wobei jede Teilstrecke dieses Strassennetzes mit einem Ist-Verkehr vorbelastet ist, welcher die beidseits der Strasse angeordnete Bevölkerung mit einem Ist-Schallpegel (Hintergrund-Lärm) bedeckt. Dieser Ist-Schallpegel ist im allgemeinen hoch, wenn eine Strasse hohe Verkehrsfrequenzen sowie einen grossen LKW-Anteil aufweist, und wenn die Distanz vom Personen-Standort bis zur Strasse klein ist.

Um die Analyse quantitativ durchführen zu können, braucht man im allgemeinen folgende Informationen:

- a) Man muss wissen oder eine vertretbare Annahme machen können, auf welchen Teilstrecken des Strassennetzes der zusätzliche Transport abgewickelt wird
- b) Man muss die Ist-Verkehrsfrequenzen dieser Teilstrecken kennen, sowie die von diesen Verkehrsfrequenzen bewirkten Schallpegel auf der Strasse und in den anliegenden Wohngebieten
- c) Man muss über eine Berechnungsmethode verfügen für die Ermittlung der Schallpegel-Erhöhung, abhängig von einer Verkehrsfrequenz-Erhöhung um 1 Fahrzeug-Einheit
- d) Man muss wissen, wie viele Menschen an Standorten mit Schallpegelerhöhung leben.

3.1 Bekannte Transport-Route

In manchen Fällen ist eine Information bezüglich a) verfügbar, die eine genaue Kenntnis der Route des Transports vom Ausgangspunkt bis zum Zielpunkt, und damit der Kette der beanspruchten Teilstrecken des Netzes, ermöglicht. Dann sind die Informationen b) über die beanspruchten Teilstrecken im Fall Schweiz weitgehend entnehmbar aus den kantonalen Strassenlärnkatastern, die pro Strassenabschnitt im Siedlungsbereich die Verkehrsmengen, die Strassencharakteristiken und die Schallpegel auf der Strasse angeben. Die Schallpegel an den Gebäudefassaden sind entweder im Strassenlärnkataster enthalten oder mithilfe von Rechenverfahren für Schalldämpfung (BUWAL 1991, S.12ff.) zu ermitteln. Die Information d) über die Zahl der Bewohner pro Flächeneinheit des Siedlungsgebietes kann mithilfe von Durchschnittswerten pro Zonentyp aus den Zonenplänen geschlossen werden; verfeinerte Verfahren ermitteln die geschätzte Zahl der Bewohner pro Gebäude, idealerweise sogar unterschiedlich für Nachtverhältnisse und Tagverhältnisse. Damit ist also pro befahrene Teilstrecke bekannt, wie gross die bestehenden Fahrzeugfrequenzen und die Schallpegel im Siedlungsgebiet sind, und wie viele

Personen unter Berücksichtigung der Ausbreitungsdämpfung an Standorten mit einem bestimmten Schallpegel leben.

Berechnungsmethoden c) ermöglichen sodann, pro Teilstrecke die Schallpegelerhöhung $\Delta\text{LAeq,T}$ (in der Folge als ΔLeq abgekürzt) für die Anwohner dieser Teilstrecke zu ermitteln, welche aus der Erhöhung des bisherigen Jahresmittelwerts der stündlichen Verkehrsmenge um 1 Fahrzeug pro jeder Stunde des Jahrs resultiert. Hierzu können Rechenvorschriften gemäss (BUWAL 1991, S.8ff) eingesetzt werden (siehe Box 1).

Box 1:
Berechnung von LAeq
Jahres-Mittelwert gemäss
(BUWAL 1991).

Input-Grössen:

N1 Mittlere Zahl Fahrzeuge pro Stunde der Kategorie 1 (Personenwagen, Lieferwagen, leichte Motorräder)

N2 Mittlere Zahl Fahrzeuge pro Stunde der Kategorie 2 (Lastwagen, Busse, Traktoren, schwere Motorräder)

V1, V2 mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h

i Strassenneigung in %

Vereinfachende Annahmen:

N1 + N2 seien höher als 100 Fahrzeuge/Stunde (wird später überprüft)

Strassenbelag sei normaler Asphaltbelag

Fahrzeugzahl sei gleich in beiden Richtungen einer Strasse

Berechnung LAeq Jahres-Mittelwert auf einem Punkt +1 Meter von Strassenachse:

$$\text{LAeq} = 10 \cdot \log(10^{0.1 \cdot \text{LE1}} + 10^{0.1 \cdot \text{LE2}})$$

Wobei:

$$\text{LE1} = \text{E1} + 10 \cdot \log(\text{N1})$$

$$\text{LE2} = \text{E2} + 10 \cdot \log(\text{N2})$$

$$\text{E1} = \max \{ \{12.8 + 19.5 \cdot \log(\text{V1})\}, \{45 + 0.8 \cdot (0.5 \cdot i - 2)\} \}$$

$$\text{E2} = \max \{ \{34 + 13.3 \cdot \log(\text{V2})\}, \{56 + 0.6 \cdot (0.5 \cdot i - 1.5)\} \}$$

Für eine einzelne Teilstrecke der bekannten Transport-Route, mit gegebenen Verkehrsfrequenzen und Strasseneigenschaften, ergibt sich eine Schallpegelerhöhung für 1 zusätzliches Fahrzeug pro Stunde während eines ganzen Jahres als Differenz zweier LAeq -Berechnungen nach Box 1, nämlich der Berechnung mit der Ist-Verkehrsfrequenz, sowie der Berechnung mit der um eine Einheit erhöhten Ist-Verkehrsfrequenz. Mittels linearer Interpolation kann dann ermittelt werden, welcher Teil dieser Schallpegelerhöhung einer einzigen, einmaligen Durchfahrt zugeordnet werden muss: Eine einzige, einmalige Durchfahrt entspricht 1/8760 der Erhöhung um 1 Einheit der über 1 Jahr gemittelten stündlichen Fahrzeugmenge. Beachtenswert ist, dass die Rechenverfahren für Schalldämpfung von der Strassenachse bis zum schallbelasteten Objekt (BUWAL 1991, S.12ff.) unabhängig sind von der Höhe des Schallwerts auf der Strassenachse; dies bedeutet, dass die vorstehend errechnete Schallpegelerhöhung aus einem zusätzlichen Transport an den Fassaden der belasteten Gebäude immer noch gleich hoch ist wie auf der Strassenachse.

Box 2:

Berechnungsbeispiele von Schallpegelerhöhungen bei Zusatzverkehr TAGS

Berechnung LAeq-Erhöhung	noise.xls				
Ort Strasse	Bümplitz Bernstr	Saignelegier Rte de l'Hop	Soyhieres Rte de Bale	Oberentfelden Aarauerstr	Schwägalp Passhöhe
INPUT-DATEN					
N1 PW/h TAGS	1626	166	232	246	53
N2 LKW/h TAGS	153	10	45	14	9
v Geschwindigkeit km/h	50	60	60	60	60
i Strassenneigung %	2	0	0	0	0
A Belagsart	0	0	0	0	0
K1 Korrekturfaktor	0	0	0	0	0
ZWISCHENWERTE					
E'1	45.9299151	47.4739494	47.4739494	47.47394938	47.4739494
E"1	44.2	43.4	43.4	43.4	43.4
E1	45.9299151	47.4739494	47.4739494	47.47394938	47.4739494
E'2	56.5963011	57.6494116	57.6494116	57.64941163	57.6494116
E"2	55.7	55.1	55.1	55.1	55.1
E2	56.5963011	57.6494116	57.6494116	57.64941163	57.6494116
LE1	78.0411205	69.6750303	71.1288292	71.38330045	64.7167081
LE2	78.4432154	67.6494116	74.1815368	69.11069199	67.1918367
RESULTATE in dB(A)					
LAeq	81.2571198	71.7895633	75.9283595	73.40428387	69.1385644
LE1 if N1 +1car	78.0437906	69.7011141	71.1475086	71.40091892	64.797887
LE2 if N2 +1truck	78.4715083	68.0633385	74.2769899	69.41032422	67.6494116
Leq if N1 +1car	81.2583933	71.8056113	75.9345543	73.41535513	69.1680661
Leq if N2 +1truck	81.2719436	71.9538227	75.9924335	73.51820093	69.436344
DeltaLeq N1 +1car	0.00127	0.01605	0.00619	0.01107	0.02950
DeltaLeq N2 +1truck	0.01482	0.16426	0.06407	0.11392	0.29778

Box 2 zeigt Berechnungsbeispiele für Schallpegel TAGS von Strassenabschnitten nach (BUWAL 1991). Die resultierenden Basis-Schallpegel LAeq decken sich mit den entsprechenden Rechenbeispielen (Zeile Emissionspegel Strasse Leq,e,m) von (BUWAL 1991). Vom Basis-Fall ausgehend bedeutet DeltaLeq N1 +1car die Erhöhung des über ein Jahr gemittelten Durchschnittsschallpegels LAeq für die 16 TAG-Stunden, bewirkt durch eine Erhöhung der stündlichen Verkehrsmenge N1 von Fahrzeugen der Kategorie 1 um 1 Fahrzeug während allen 16*365 TAG-Stunden des ganzen Jahres. Zu beachten ist, dass die errechnete Schallpegel-Erhöhung je nach den Charakteristiken eines Strassenabschnitts stark variiert. Generell ist die Pegelerhöhung klein, wenn die Verkehrsmenge schon gross und der bisherige Schallpegel LAeq schon hoch ist. Demgegenüber ist die Pegelerhöhung gross, wenn die Verkehrsmenge auf dem Strassenabschnitt gering und der bisherige Schallpegel tief ist. Verkehrt ein zusätzlicher PW oder LKW auf den angeführten Strassenabschnitten nur ein einziges Mal (und nicht zu jeder TAG-Stunde des Jahres), so muss die Erhöhung des Durchschnittspegels DeltaLeq gemäss den beiden letzten

Zeilen von Box 2 noch durch die jährliche TAG-Stundenzahl von $365 \cdot 16$ dividiert werden.

Als Ergebnis der Ausbreitungs- und Expositions-Analyse steht für den Fall der bekannten Transportroute die Information zur Verfügung, wie viele Personen entlang der befahrenen Strassenstrecke von A bis B bisher mit einer bestimmten Höhe des Schallpegels $L_{Aeq,T}$ belastet sind, und wie stark sich dieser langfristig gemittelte Durchschnitts-Schallpegel als Folge des zusätzlichen Transports erhöht hat. Diese rechnerische Schallpegel-Erhöhung ist natürlich so gering, dass sie physisch von niemandem wahrgenommen werden könnte. Trotzdem ist diese Grösse ein sinnvoller Eingangswert für die nachfolgende Wirkungs-Analyse, wie später gezeigt werden wird.

Anzumerken ist, dass die Beschaffung und Aufbereitung der Informationen b) und d) im Einzelfall mit einem grösseren Ausmass von Kleinarbeit verbunden sein kann. Dieser Bearbeitungsaufwand kann indessen entscheidend reduziert werden, wenn man die im folgenden präsentierte Methode für Transporte mit unbekannter Route verwendet.

3.2 Unbekannte Transportroute

Vielfach weiss man nicht, welche Abschnitte des Strassennetzes durch einen Transport benutzt werden. Selbst wenn Ausgangspunkt und Zielpunkt des zu untersuchenden Transports bekannt sind, können im feinmaschigen Strassennetz von Fall zu Fall verschiedene Routen befahren werden, je nach Tageszeit, Staulage, weiteren Zu- und Abladepunkten im Sammelverkehr, und je nach Präferenzen des Fahrzeugführers. Darüber hinaus kommt es vor, dass auch Ausgangspunkt oder Zielpunkt nicht bekannt sind. Dies trifft vor allem dann zu, wenn man nicht in der Vergangenheit abgelaufene, sondern künftig mögliche Transporte hinsichtlich Lärm beurteilen will. Beispielsweise kennt man im Rahmen eines betrieblichen Dreijahrplans die Standorte zusätzlicher Kunden noch nicht, und man weiss bei einem regionalen Entwicklungsplan nicht, von welchem Punkt zu welchem Punkt künftig Waren oder Personen zu transportieren sind. Ausserdem: Will man die Umwelteinwirkungen von möglichen Produkt-Alternativen ermitteln, so ist der Einbezug der Transporte von Produkt-Vorstufen meistens unerlässlich. Hierzu werden in der Regel Informationen aus öffentlichen Datenbanken entnommen, die lieferantenneutral und ortsunabhängig sind und daher die Bestimmung der Transportroute nicht zulassen. Solche Fälle sind typisch für Ökobilanz-Anwendungen.

Es ist deshalb wünschbar, die Ausbreitungs- und Expositions-Analyse für die Lärmbelastung aus einem Strassentransport auch dann vornehmen zu können, wenn man über eine Transportaufgabe nur beschränkte Informationen zur Verfügung hat: Nämlich Informationen über Transportgewicht, Transportdistanz und Transportmittel, sowie einen allgemeinen Hinweis, in welcher geographischen Region (Land, Kontinent) sich der Transport abspielt. Für diesen allgemeinen Fall ist die Ausbrei-

tungs- und Expositions-Analyse in (MÜLLER-WENK 1999) vertieft behandelt worden. Das entsprechende Vorgehen wird nachstehend verfeinert und im Überblick dargestellt.

3.2.1 Annahme über Verkehrsverteilung bei unbekannter Transportroute

Soll man die Erhöhung der Schallbelastung betroffener Personen als Folge eines zusätzlichen Strassentransports bestimmen, von dem man nur die Transportdistanz in km, aber nicht die Transportroute kennt, so muss man zuerst eine vertretbare Annahme machen, wie sich dieser Transport auf dem tatsächlich existierenden Strassennetz abspielen könnte. Die Beispiele für Schallpegelerhöhungen verschiedener Strassenteilstücke gemäss Box 2 haben ja deutlich gemacht, dass es nicht gleichgültig ist, wo Zusatzverkehr stattfindet.

Die hier gewählte *fundamentale Annahme* ist die, dass der zusätzliche Transport rechnerisch auf das ganze (nationale oder kontinentale) Strassennetz verteilt wird, wobei aber der entsprechende Zusatzverkehr für jedes Teilstück des Netzes proportional zum schon bestehenden Verkehr angenommen wird. Diese Annahme erscheint auf der Ebene eines einzelnen Transports zunächst wenig realitätsnah, denn man kann eine Fahrt von 180 km Länge eines einzigen LKW in der Schweiz physisch sicher nicht so abwickeln, dass auf jedem Teilstück des rund 80000 km langen schweizerischen Strassennetzes Bruchteile einer zusätzlichen Fahrzeugeinheit verkehren. Hingegen ist diese Annahme aus der Gesamtsicht des Verkehrsvolumens durchaus vertretbar: Denn erfahrungsgemäss spielt sich der gesamte jährliche Verkehrszuwachs in einem Strassennetz angenähert proportional zur bisherigen Verkehrsbelastung der einzelnen Netzteile ab: Wo bisher schon viel Verkehr herrscht, gibt es typischerweise im nächsten Jahr viel Verkehrszuwachs, und wo bisher wenig Verkehr war, wird der absolute Zuwachs klein sein. Auf diesem Hintergrund kann der einzelne auf seine Lärmfolgen zu überprüfende Transport so behandelt werden, wie wenn er auf dem *ganzen* Strassennetz einen Beitrag zur trendmässigen Verkehrszunahme (und damit Schallpegelzunahme) erbrächte.

Einen Hinweis auf die Verteilung des Verkehrszuwachses innerhalb des Strassennetzes geben für die Schweiz die Daten über die Entwicklung des Täglichen Durchschnittsverkehrs DTV, welche an über 200 automatischen Messstellen im Netz der schweizerischen National- und Kantonsstrassen erfasst werden (ASTRA 1998, Tabelle 6) Hier zeigt sich, dass z.B. die DTV-Mengen des Jahres 1995 gegenüber Jahr 1994 im Bereich von 94% bis 107% schwanken, während die Gesamtheit der auswertbaren Messstellen für Jahr 1995 100.5% des Vorjahres-DTV ausweist (ASTRA 1998, S.5). Obschon nach diesen Angaben das relative Verkehrswachstum bei Strassen mit grossem Verkehr grösser ist als bei verkehrsarmen Strassen (ASTRA 1998 S.5/6), darf man in erster Näherung annehmen, die räumliche Aufteilung von künftigem Zusatzverkehr sei ungefähr proportional zum bisherigen Verkehr auf den einzelnen Strassenabschnitten.

In Berücksichtigung dieser Verhältnisse ist es vertretbar, die rechnerische Schallbelastung aus einem künftigen zusätzlichen Transport mit unbekannter Route so zu ermitteln, wie wenn dieser Transport in «bruchteilige» Transporte aufgelöst und über das ganze Strassennetz «verstrichen» wäre, und zwar proportional zu den bisherigen Ist-Frequenzen pro Strassenabschnitt. Auf diese Weise wird zwar nicht die von diesem Transport tatsächlich verursachte Schallpegelerhöhung ermittelt, sondern der rechnerische Beitrag dieses Transports zur allgemeinen, über das ganze Strassennetz zu erwartenden Schallpegelerhöhung bei der trendmässigen Verkehrszunahme. Da man voraussetzungsgemäss nicht weiss, welchen Weg im Strassennetz der lärmässig zu beurteilende Transport wählt, ist dieser rechnerische Beitrag des Transports zur Schallpegelerhöhung auf dem Gesamtnetz immerhin eine valable Ersatzgrösse, aufgrund der man ein angemessenes Bild über den Lärm und seine Folgen gewinnen kann.

3.2.2 Aufteilung des Ist-Verkehrs auf das Strassennetz

Woher nimmt man nun aber die Daten über die Aufteilung des Ist-Verkehrs auf die einzelnen Abschnitte des ganzen Strassennetzes? Wie weiter oben schon ausgeführt, gibt es in der Schweiz die kantonalen Strassenlärmkataster, aus denen pro Strassenabschnitt die Stundenmittel für die Fahrzeugmengen sowie ihre Aufteilung auf PW/LKW und Tag/Nacht entnommen werden können. Allerdings sind diese Daten derzeit lediglich in einer Form verfügbar, die eine Vornahme von Berechnungen für das Gesamtnetz nur mit Inkaufnahme eines grossen Aufwandes zuliesse. Einfacher könnte man zu einem Bild über die Verteilung der Verkehrsfrequenzen auf dem schweizerischen Strassennetz gelangen, wenn man die Fahrzeugzählungen aus den im Strassennetz vorhandenen automatischen Zählstationen auswertet. Da dieses Zählstellennetz nicht genügend feinmaschig ist, um die täglichen Fahrzeugmengen DTV für jeden Strassenabschnitt genau zu bestimmen, konnte eine schweizerische Strassenkarte bisher lediglich mit approximativen DTV-Mengen pro Strassenabschnitt erstellt werden (BfS 1995, Kartenbeilage). Zudem sind hier nur die National- und Kantonsstrassen berücksichtigt, da sich das Netz der automatischen Zählstellen auf diese Strassen mit grossem Verkehr beschränkt. Die Frequenzverteilung für das vollständige schweizerische Strassennetz liegt bisher nicht vor und konnte im Rahmen dieser Studie auch nicht beigebracht werden.

Ersatzweise wurde hier eine grobe Aufteilung des Schweizerischen Strassenverkehrs 1995 auf die 4 Strassentypen Autobahn/Autostrasse, Hauptverkehrsstrasse HVS ausserorts, Hauptverkehrsstrasse HVS innerorts, Nebenstrassen, vorgenommen, und zwar auf Basis der prozentualen Verkehrsaufteilungen von (BUWAL 1995, Anh A10). Auf den ersten Blick erscheint diese Aufteilung zu grob; es wird sich aber im nächsten Abschnitt zeigen, dass die Genauigkeit der Rechenergebnisse trotz der Grobheit dieser Aufteilung ausreichend ist.

Box 3:

Aufteilung Verkehr 1995 auf Strassentypen und Berechnung N1, N2

Verkehrsaufteilung CH1995 nach Fahrleistungsaufteilung 1990 gemäss SRU 255 Anhang A10.1						
Fahrzeugkategorie	Autobahn/ strasse	HVS aussOrt	HVS innOrt	Nebenstr IO+AO	noiseZähl.xls3	
					Total	
PW (Kat 1) %Anteile	31.9	29	15.6	23.5	100.00	%laut S.373
Lieferwagen (Kat 1) %Ant.	35.2	28.1	15.1	21.6	100.00	%laut S.373
Total Kat 1 Mrd Fzkm	14.9578	13.4888	7.2556	10.8978	46.60	
LKW (Kat 2) %Anteile	46.8	28.7	11.9	12.6	100.00	%laut S.373
Motorräder (Kat 2) %Ant.	21.2	38.2	15.4	25.2	100.00	%laut S.373
Total Kat 2 Mrd Fzkm	1.40668	1.26079	0.51583	0.6867	3.87	
Total Mia Fzkm Kat1+2	16.36448	14.74959	7.77143	11.5845	50.47	
Netzlänge km	1876	15367	3790	58967	80000	laut S.230
Mittlerer DTV Fz/h	23899	2630	5618	538		
Aufteilung des DTV:						
N1+N2 TAG Fz/h	1390.91	151.99	324.71	31.65		
N1+N2 NACHT Fz/h	205.53	24.72	52.81	4.04		
N1 TAG Fz/h	1279.64	136.79	292.24	28.48		
N2 TAG Fz/h	111.27	15.20	32.47	3.16		
N1 NACHT Fz/h	195.25	23.48	50.17	3.83		
N2 NACHT Fz/h	10.28	1.24	2.64	0.20		
Mittl Geschwindigk. km/h	100	70	45	60		

- Verkehrsaufteilung auf Strassentypen nach SRU 255 Anhang A10.1 S. 373 sowie S. 230.
- Verkehrsmengen in Fahrzeugkilometer nach Schweiz. Verkehrsstatistik 1995 S. 68,69,74.
- In Verkehrsmengen der Fahrzeugkategorien «total» sind auch nicht angeführte Fahrzeugarten inbegriffen.
- Netzlängen nach SRU 255 S. 230, wobei Annahme Länge Gesamtnetz Schweiz 80000 km.
- Die Länge der Gemeindestrassen ca. 59000 km per 1995 ergibt sich, wenn man in der Statistik T11.2.1.1.1 des Schweiz. Statistischen Jahrbuches 2001 die Längenangabe pro 1995 um den Zuwachs der 10-Jahresperiode 1975–1985 erhöht und rundet.
- Mittlerer DTV (Durchschn. Tagesverkehr) aus Total Fz km Kat 1+2, dividiert durch Netzlänge und 365 Tage.
- N1 N2 bestimmt nach SRU 15 S.3/4, was zu Abweichung gegen Totals Kat 1 und Kat 2 pro Strassentyp führt. Geschwindigkeiten sehr grobe Mittelwerte aus SRU 255 S.236.

In Box 3 wird die pro Fahrzeugkategorie statistisch erfasste Verkehrsleistung (46.60 Mrd Fahrzeugkilometer für Kat. 1, 3.87 Mrd Fahrzeugkilometer für Kat 2) aufgeteilt auf die 4 Strassentypen, was unter Benützung der Anteilsquoten in (BUWAL 1995) möglich ist. Nachdem man auch die Strassenlänge pro Strassentyp bestimmen kann, resultieren die DTV (durchschnittlicher Tagesverkehr pro 24-Studentag) durch Division von jährlicher Fahrzeugkilometerleistung durch Strassenlänge und Tagzahl pro Jahr. Erwartungsgemäss sind diese DTV-Werte hoch für Autobahn/Autostrasse und tief für Nebenstrassen. Unter Verwendung der Faktoren in (BUWAL 1991) kann man weiter die stündlichen Fahrzeugfrequenzen N1 und N2 für TAG und NACHT bestimmen. Auch diese sind erwartungsgemäss sehr gross für Autobahnen am TAG, und sehr klein für Nebenstrassen in der NACHT.

Dabei handelt es sich um Mittelwerte pro Strassentyp; die Frequenzzählungen der automatischen Zählstellen (ASTRA 1998) zeigen, dass innerhalb eines Strassentyps die DTV-Werte noch erheblich streuen. Es wäre für die nachfolgenden Berechnungen vorteilhaft, wenn eine Aufteilung des Gesamtverkehrs nicht pro Strassentyp, sondern pro Intervall der Frequenzmengen verfügbar wäre.

3.2.3 Ermittlung DeltaLeq für Zusatzverkehr pro Strassentyp

Jetzt soll die Erhöhung DeltaLeq des für ein Jahr gemittelten Schallpegels auf dem schweizerischen Strassennetz ermittelt werden, welche aus einem zusätzlichen Verkehr von 1000 Fahrzeugkilometern (PW oder LKW) mit unbekanntem Fahrweg resultiert. Wie schon dargelegt, gilt als Annahme, dass dieser zusätzliche Verkehr rechnerisch in den gleichen Proportionen auf das Strassennetz verteilt wird wie das gesamte Ist-Verkehrsaufkommen in Fz/h eines geeigneten Referenzjahrs (hier Zahlen von Jahr 1995 verwendet). Wenn man auf diese Weise die DeltaLeq für die 4 Teilnetze (Autobahn/strasse, HVS Innerorts, HVS Ausserorts, Nebenstrassen) des schweizerischen Strassennetzes ermitteln will, so muss man die Berechnungsweise gegenüber den Beispielen von Box 2 leicht modifizieren. Denn man will ja jetzt nicht mehr ermitteln, wie gross die Schallpegelerhöhung DeltaLeq ist bei 1 zusätzlichen Fahrt zu jeder TAG-Stunde oder NACHT-Stunde des Jahrs auf jedem Teilabschnitt aller 4 Teilnetze. Vielmehr soll der Zusatzverkehr pro Teilnetz proportional zu dessen bisherigem Verkehrsaufkommen sein. Das bedeutet, dass man das zusätzlich verkehrende Fahrzeug rechnerisch aufsplittet auf Fahrzeug-Bruchteile, die auf allen Abschnitten der 4 Teilnetze fahren, wobei dieser Fahrzeugbruchteil sehr klein ist bei Strassenabschnitten mit geringem Verkehr, und vergleichsweise gross bei Strassenabschnitten mit hohen Verkehrsfrequenzen. Zwar machen bruchteilige Fahrzeuge physisch keinen Sinn; mathematisch kann man aber sehr wohl mit solchen operieren, weil die in Box 1 und 2 verwendeten Gleichungen keine Ganzzahligkeit von N_1 und N_2 voraussetzen. Box 4 zeigt die vorgenommenen Berechnungen für die Schallpegelerhöhungen DeltaLeq über die Teilnetze und das Gesamtnetz.

Box 4:

Berechnung von Schallpegelerhöhung DeltaLeq für Teilnetze und Gesamtnetz

Berechnungen Schallpegelerhöhung bei Zusatzverkehr verteilt auf Gesamtnetz								
noise-tra.xls (deltaleq-new)	Autobahn /Autostr	HVS ausserorts	HVS innerorts	Neben- Strassen	Autobahn /Autostr	HVS ausserorts	HVS innerorts	Neben- Strassen
INPUT-DATEN	TAG	TAG	TAG	TAG	NACHT	NACHT	NACHT	NACHT
von noiseZähl.xls(3)								
Netzlänge [km]	1876	15367	3790	58967	1876	15367	3790	58967
N1 [PW/h]	1279.64	136.79	292.24	28.48	195.25	23.48	50.17	3.83
N2 [LKW/h]	111.27	15.20	32.47	3.16	10.28	1.24	2.64	0.20
v Mittl.Geschw [km/h]	100	70	45	60	100	70	45	60
i Strassenneigung %	0	0	0	0	0	0	0	0
A Belagsart	0	0	0	0	0	0	0	0
K1 Korrekturfaktor	0	0	0	0	0	0	0	0
ZWISCHENWERTE								
E'1	51.8000	48.7794	45.0376	47.4739	51.8000	48.7794	45.0376	47.4739
E''1	43.4000	43.4000	43.4000	43.4000	43.4000	43.4000	43.4000	43.4000
E1	51.8000	48.7794	45.0376	47.4739	51.8000	48.7794	45.0376	47.4739
E'2	60.6000	58.5398	55.9877	57.6494	60.6000	58.5398	55.9877	57.6494
E''2	55.1000	55.1000	55.1000	55.1000	55.1000	55.1000	55.1000	55.1000
E2	60.6000	58.5398	55.9877	57.6494	60.6000	58.5398	55.9877	57.6494
LE1	82.8709	70.1400	69.6950	62.0193	74.7059	62.4864	62.0421	53.3059
LE2	81.0638	70.3582	71.1025	62.6463	70.7199	59.4740	60.2038	50.6597
RESULTATE in dB(A)								
Leq	85.0710	73.2608	73.4659	65.3544	76.1653	64.2466	64.2298	55.1916
LE1 if N1 +0.01car	82.8709	70.1403	69.6952	62.0209	74.7061	62.4882	62.0430	53.3173
LE2 if N2 +0.01 truck	81.0642	70.3611	71.1039	62.6600	70.7242	59.5089	60.2202	50.8716
Leq if N1 +0.01car	85.0710	73.2609	73.4659	65.3551	76.1655	64.2478	64.2303	55.1990
Leq if N2 +0.01 truck	85.0711	73.2622	73.4666	65.3618	76.1665	64.2583	64.2363	55.2674
DeltaLeq N1 +0.01car	0.000020	0.000155	0.000062	0.000707	0.000159	0.001233	0.000523	0.007339
DeltaLeq N2 +0.01 truck	0.000155	0.001464	0.000776	0.007361	0.001206	0.011655	0.006505	0.075817
Wenn Zusatzverkehr proportional Istverkehr:								
Erhöhung N1 [Anzahl Fz]	0.737	0.079	0.168	0.016	0.716	0.086	0.184	0.014
entsprechendes DeltaLeq	0.001506	0.001219	0.001049	0.001160	0.011379	0.010616	0.009622	0.010307
bewirkt durch [Fz-km]	8070421	7066738	3723526	5645788	3921695	3863110	2035791	2418008
Mittleres DeltaLeq	0.001234				0.010481			
bewirkt durch total [Fz-km]	24506472				12238605			
DeltaLeq pro 1000 PW-km	5.03E-08				8.56E-07			
Erhöhung N2 [Anzahl Fz]	0.69	0.09	0.20	0.02	0.72	0.09	0.18	0.01
entsprechendes DeltaLeq	0.010648	0.013730	0.015546	0.014349	0.086304	0.100644	0.119592	0.105595
bewirkt durch [Fz-km]	7520397	8415163	4433547	6713144	3921519	3874710	2034565	2398101
Mittleres DeltaLeq	0.013568				0.103034			
bewirkt durch total [Fz-km]	27082250				12228895			
DeltaLeq pro 1000 LKW-km	5.01E-07				8.43E-06			

Box 4 zeigt im oberen Teil gleichartige Berechnungen wie in Box 2. Nur sind hier statt einzelner Strassenabschnitte ganze Teilnetze eingesetzt, und es sind die stündlichen Verkehrsmengen TAG und NACHT aus Box 3 übernommen. Ferner werden die Schallpegelzunahmen DeltaLeq nicht für den Fall von 1.0 zusätzlich pro jeder TAG-Stunde oder NACHT-Stunde des Jahrs verkehrendem Fahrzeug berechnet, sondern pro 0.01 Fahrzeug. Das hat seinen Grund darin, dass in Box 4 zum Teil mit sehr tiefen Fahrzeugfrequenzen pro Stunde zu rechnen ist, verglichen mit den Fällen von Box 2. Nun zeigt sich aber, dass der Wert von DeltaLeq im Intervall von N1 bis N1 +1 PW/h respektive N2 bis N2 +1 LKW/h praktisch linear zunimmt, solange N1 respektive N2 grösser als 1 Fahrzeug/h ist. Wenn hingegen N1 respektive N2 gleich oder kleiner als 1 Fahrzeug/h ist, wird der Bereich der Quasi-Linearität verlassen. Das bedeutet, dass insbesondere im Bereich LKW NACHT auf Nebenstrassen etwas zu tiefe Werte für DeltaLeq resultieren, wenn man mit Schritten von +1 Fahrzeug/h rechnet. Um diesen Fehler auszuschalten, sind in Box 4 die Schallpegelerhöhungen auf Basis einer Frequenzzunahme von 0.01 Fahrzeug/h berechnet worden. Man kann zeigen, dass dadurch die Forderung eingehalten ist, bei kleinen Veränderungen um eine gegebene Fahrzeugfrequenz herum müssten die DeltaLeq sich linear zur Fahrzeugfrequenz-Änderung verhalten.

Die Schallpegelerhöhungen DeltaLeq im mittleren Teil von Box 4 zeigen nun das von Box 2 her schon bekannte Bild: Bei verkehrsstarken Strassen und Zeiten sind sie klein, und bei verkehrsschwachen Strassen und Zeiten sind sie gross; die Spanne beträgt etwa 2 Zehnerpotenzen.

Im unteren Teil von Box 4 sind die Schallpegelerhöhungen der Teilnetze berechnet, wenn auf ihnen nicht überall zusätzlich 0.01 Fahrzeug pro Stunde verkehrt, sondern ein dem Ist-Verkehr proportionaler Fahrzeug-Bruchteil. Dieser Fahrzeug-Bruchteil wird, gesondert für TAG und NACHT sowie für PW und LKW, angegeben in der Zeile «Erhöhung N1 (respektive N2)». Das in der folgenden Zeile gegebene «entsprechende DeltaLeq» entspricht der Schallpegelerhöhung aus diesem bruchteiligen Zusatzverkehr; es ist entstanden durch Multiplikation der im mittleren Teil von Box 4 gegebenen DeltaLeq für +0.01 Fahrzeug mit dem zugehörigen Wert des Fahrzeugbruchteils. Die Multiplikation ist nichts anderes als eine lineare Interpolation von DeltaLeq im Lokalbereich um die Frequenzzahlen N1 und N2 herum: diese ist aufgrund der weiter oben gemachten Ausführungen zulässig.

Auf den ersten Blick ist nun höchst überraschend, dass die «entsprechenden DeltaLeq» innerhalb jeder der 4 Fallgruppen PW/TAG, PW/NACHT, LKW/TAG, LKW/NACHT nur noch unbedeutende Schwankungen um den jeweiligen Mittelwert herum aufweisen. (Man vergleiche diese Schwankungen mit den viel stärker abweichenden DeltaLeq N1+0.01car und DeltaLeq N2+0.01truck im mittleren Teil von Box 4!). Freilich ist es nicht zufällig, dass die «entsprechenden DeltaLeq» innerhalb der Fallgruppe ungefähr gleich hoch sind, wenn der Einfluss der unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten ausgeschaltet wird. Tatsächlich kann man durch Variieren von N1 und N2 in der Berechnungs-Tabelle feststellen, dass die Höhe von DeltaLeq N1 +0.01car respektive DeltaLeq N2 +0.01truck bei gleichen

Geschwindigkeiten v etwa umgekehrt proportional zu N_1 respektive N_2 ist. Unter diesen Umständen wird klar, dass die «entsprechenden DeltaLeq» pro Fallgruppe etwa gleich hoch werden müssen, nachdem sie ja das Produkt einer zu N proportionalen und einer zu $1/N$ proportionalen Grösse sind.

Diese Gesetzmässigkeit kann mathematisch begründet werden, wenn man beachtet, dass die Funktion für DeltaLeq die erste Ableitung nach N der Funktion für Leq ist. Lässt man der Vereinfachung halber das verkomplizierende Zusammenwirken der Teilschallpegel von PW und LKW einmal beiseite, so ist gemäss Box 1

$$\text{DeltaLeq } N_1+1 \text{ car} \approx (\text{LE1})' = (E1 + 10 \cdot \log(N_1))' = 10 \cdot 1/[N_1 \cdot \ln(10)]$$

wobei $(..)'$ die erste Ableitung nach der Variablen N_1 , und \ln der natürliche Logarithmus bedeuten. Wenn nun aber DeltaLeq $N_1+0.01 \text{car}$ proportional zu $1/N_1$ ist, und diese Schallpegelerhöhung wie oben dargestellt mit einem N_1 -proportionalen Zusatzverkehr multipliziert wird, so muss das Resultat unabhängig werden von N_1 .

Unterschiede in der Höhe der «entsprechenden DeltaLeq» pro Fallgruppe ergeben sich allerdings als Folge unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten v und unterschiedlicher Gefällsverhältnisse i der Strassen. Man kann indessen durch Verändern dieser Werte in der Berechnungstabelle von Box 4 zeigen, dass das Gesamtbild der innerhalb der Fallgruppen gleichgross bleibenden «entsprechenden DeltaLeq» sich in engen Schranken von etwa plus/minus 20% ändert, solange die mittleren Geschwindigkeiten v im praktisch relevanten Bereich zwischen 45 und 100 km/h variiert werden, und solange die Gefällsverhältnisse zwischen 0 und 5% bleiben.

Es ist nun ein sehr elegantes Ergebnis, dass die «entsprechenden DeltaLeq» innerhalb der Fallgruppen PW/TAG, PW/NACHT, LKW/TAG und LKW/NACHT ungefähr gleich hoch sind. Das bedeutet nämlich, dass die Bevölkerung der im Bereich der verschiedenen Strassentypen einer ungefähr gleich starken Erhöhung der Schallpegel ausgesetzt ist, solange der Zusatzverkehr bei allen Strassenabschnitten als proportional zum bisherigen Gesamtverkehr angenommen wird. Das aus den 4 «entsprechenden DeltaLeq» einer Fallgruppe errechnete mittlere DeltaLeq gilt also als approximativer Zusatzschallpegel für die ganze Wohnbevölkerung des Landes, und man muss sich nicht darum kümmern, welche Bevölkerungsanteile an verkehrsreichen oder weniger verkehrsreichen Strassen wohnen.

Unter diesen Umständen wird es verhältnismässig einfach, ein für das ganze Strassennetz geltendes mittleres DeltaLeq zu bestimmen für die 4 Fallgruppen PW/TAG, PW/NACHT, LKW/TAG und LKW/NACHT. Hierzu werden in Box 4, viertunterste und zehntunterste Zeile, die nötigen Fahrzeugkilometer ermittelt, um auf der ganzen Länge eines Teilnetzes die zwei Zeilen weiter oben eingesetzte Erhöhung der stündlichen Fahrzeugfrequenz zu erreichen. Dieser Wert in Fz-km/a ist das Produkt von Bruchteil-Faktor, Teilnetz-Länge und Stundenzahl TAG respektive NACHT pro Jahr. Dividiert man den mittleren Wert von «entsprechendes DeltaLeq» durch das Total der benötigten Fz-km, so erhält man für jede der 4 Fallgrup-

pen das gesuchte mittlere DeltaLeq pro 1000 Fz-km. Dieser mittleren Schallpegelerhöhung ist die ganze Wohnbevölkerung im Bereich des betrachteten Gesamtstrassennetzes ausgesetzt, also im vorliegenden Fall die Gesamtbevölkerung der Schweiz.

Hier könnte man einwenden, dass nicht alle Bewohner der Schweiz unmittelbar an einer Strasse wohnen, sondern in Gebäuden mit unterschiedlichem Abstand zur Strassen-Achse. Dies führt dazu, dass der Schallpegel an der Gebäude-Aussenwand bei wachsendem Strassenabstand, sowie beim Dazwischentreten von Hindernissen, gedämpft wird. Nun zeigt sich allerdings, dass alle Schalldämpfungs-Abzüge gemäss (BUWAL 1991, S.12ff) allein von geometrischen Grössen abhängig sind, nicht aber von der Höhe des Schallpegels der Schallquelle. Dies bedeutet, dass die Höhe von DeltaLeq keine Reduktion erfährt, wenn eine lärmbelastete Person den Abstand zur Strassenachse erhöht. Also gelten die errechneten DeltaLeq für alle Bewohner der Schweiz, nicht nur die unmittelbar an der Strassenachse wohnenden. (Unabhängig davon wirkt sich eine bestimmte Schallpegelzunahme DeltaLeq natürlich unterschiedlich aus, je nach Höhe des Hintergrund-Schallpegels am Immissionspunkt. Diesem Umstand wird jedoch im Abschnitt über die Wirkungsanalyse Rechnung getragen).

3.2.4 Ergebnis der Ausbreitungsanalyse: DeltaLeq pro Fahrzeugtyp

Box 4 zeigt, dass die stündlichen Fahrzeugmengen $N1+N2$ teilweise in einem Bereich liegen, der nicht der in Box 1 festgelegten Randbedingung $N1+N2 > 100$ Fahrzeuge/h entspricht. In der Tat kommen in Box 4 zur Nachtzeit und auf Nebenstrassen stündliche Verkehrsfrequenzen vor, die deutlich unter 100 Fahrzeugen/h liegen. Für diesen Fall sieht die Berechnungsmethode gemäss (BUWAL 1991) vor, dass der berechnete Schallpegel um ein Korrekturglied $K1$ reduziert werden muss, das im Bereich < 31.6 Fahrzeuge/h -5 dB beträgt, und im Bereich von 31.6 bis 100 Fahrzeuge/h gleich $10 \cdot \log((N1+N2)/100)$ ist. Sind demzufolge die mit $K1=0$ gemachten Berechnungen von Box 4 ergänzungsbedürftig?

Die Antwort ist: nein. Die Pegelkorrektur $K1$ bewirkt *keine* Anpassung auf der Ebene des Emissionspegels L_{Aeq} , sondern bildet den Übergang vom Emissionspegel L_{Aeq} zum Beurteilungspegel L_r (BUWAL 1991, S.11/12, L_{Aeq} ist hier L_E genannt). Während der Emissionspegel eine physikalische, mit einem Schallmessgerät messbare Grösse ist, handelt es sich beim Beurteilungspegel um eine auf die Schallwirkung bezogene Grösse, die berücksichtigt, dass ein Schallpegel von z.B. 50 dB(A) bei den Menschen erfahrungsgemäss Störwirkungen auslöst, die je nach Lärmart unterschiedlich hoch sind (BUWAL 2002, S.90). Die Pegelkorrektur $K1$ muss berücksichtigt werden, wenn man prüfen will, ob ein gemessener oder berechneter Schallpegel einen Belastungsgrenzwert verletzt oder nicht verletzt, denn Belastungsgrenzwerte sind auf der Ebene der Beurteilungspegel L_r festgelegt (BUWAL 2002, S.35). Demgegenüber sind in dieser Studie die Bereiche Schallerzeugung und Störwirkung klar getrennt: In Abschnitt 3 ermittelt die Ausbreitungsanalyse die rechnerische Schallpegelerhöhung DeltaLeq aus zusätzlichem Strassen-

verkehr, also den grundsätzlich mit einem Schallmessgerät messbaren Emissionspegel. Demgegenüber ist die Frage der Störungswirkung eines Schallpegels von bestimmter Höhe im Abschnitt 4 dieser Studie behandelt. Ein Einbezug von K1-Werten ungleich Null schon hier in Abschnitt 3 würde daher zu einer zweifachen Berücksichtigung der lärmart-abhängigen Lärmwirkung führen.

Das Ergebnis der Ausbreitungsanalyse bei unbekannter Transportroute ergibt sich demnach direkt aus Box 4 und ist nachstehend in Box 5 zusammengefasst, wobei die Zahlen im Hinblick auf die grobe Abschätzung auf 2 bedeutsame Stellen gerundet sind (Weitergehende Betrachtungen zur Unsicherheit der ermittelten Zahlen folgen später in Abschnitt 5.5):

Box 5: Rechnerische Erhöhung des über 1 Jahr gemittelten Schallpegels über das gesamte Strassennetz der Schweiz bei zusätzlicher Fahrt von 1000 km auf unbekannter Strecke.

Zusätzliche Transportleistung	Schallpegelerhöhung DeltaLeq in Micro-dB(A)
1000 km Fahrzeug-Kat.1 (PW, Lieferwagen, leichte Motorräder) TAGS	0.050
1000 km Fahrzeug-Kat 1 (PW, etc) NACHTS	0.86
1000 km Fahrzeug-Kat.2 (LKW, Busse, Traktoren, schw. Motorräder) TAGS	0.50
1000 km Fahrzeug-Kat.2 (LKW etc) NACHTS	8.4

Die Werte in Box 5 sind deutlich kleiner als die entsprechenden Werte in (MÜLLER-WENK 1999, S.35). Die Differenz ist einerseits auf Methodenverfeinerungen zurückzuführen, andererseits aber auch darauf, dass in (MÜLLER-WENK 1999) für die Mittelwertbildung über die Teilnetze zu hohe Bevölkerungszahlen zugrundegelegt waren.

Die Werte in Box 5 beziehen sich auf Fahrzeuge, die aufgrund von technischer Ausrüstung und Fahrweise eine mittlere Schallemission im Rahmen der Flottensammensetzung ihrer Kategorie aufweisen (Stand aufgrund der Daten, die bei Erstellung von (BUWAL 1991) verfügbar waren). Wenn die Fahrzeuge eines zu untersuchenden Transportprozesses bezüglich Schallemission sich nachweisbar stark von diesen Mittelwert-Annahmen unterscheiden, so könnten die Werte von Box 5 angepasst werden.

3.2.5 Expositionsanalyse: Die von Strassenlärm belastete Schweizer Bevölkerung

Schallbelastung hat Wirkungen auf den Gesundheitszustand der Menschen. Die Wirkung einer gegebenen Erhöhung des über ein Jahr gemittelten Schallpegels DeltaLeq ist indessen davon abhängig, auf welcher Höhe der vorher schon vorhandene Schallpegel liegt. Diese Wirkungen werden in den Abschnitten 4 und 5 behandelt. Schon hier sei aber vorweggenommen, dass eine Schallpegelerhöhung dann

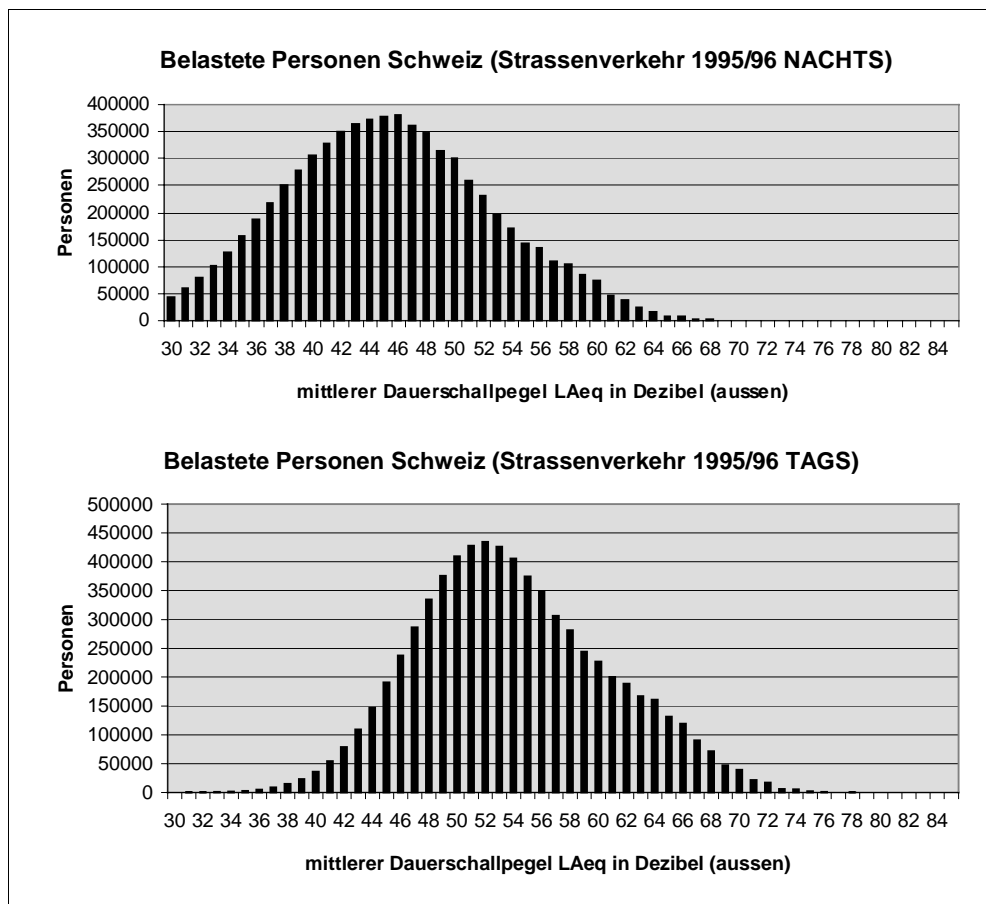
keine erheblichen Folgen auf das menschliche Wohlbefinden hat, wenn der resultierende Schallpegel LAeq TAGS 50 dB und NACHTS 45 dB an den Gebäude-Aussenwänden nicht übersteigt (WHO 2000, Abschnitt 4.3.1). Wenn also eine LKW-Fahrt TAGS ihre rechnerische Schallpegelerhöhung DeltaLeq nur im Rahmen eines Strassennetzes verursachen würde, dessen LAeq TAGS überall unter 50 dB liegt, so würde diese Fahrt ohne erhebliche Folgen auf das menschliche Wohlbefinden bleiben.

Um die Wirkung der DeltaLeq auf die menschliche Gesundheit ermitteln zu können, ist es daher vorgängig nötig, Daten bereitzustellen über die Häufigkeits-Verteilung der Bevölkerung auf die verschiedenen Schallpegelbereiche im Ist-Zustand («Hintergrund-Belastung»). Wie in Kapitel 3.1 dargelegt wurde, kann für den Fall des Schweizer Strassennetzes diese Häufigkeitsverteilung grundsätzlich mithilfe der Kombination von Strassenlärmkataster und Zonenplan-Daten ermittelt werden. Da der Aufwand für eine landesweite Berechnung aber erheblich wäre, stehen diese Ergebnisse bisher nicht zur Verfügung.

Zwar sind Daten publiziert über die prozentuale Aufteilung der Schweizer Bevölkerung auf die Höhe des strassenlärmbedingten Hintergrund-Schallpegels (BUWAL 1997, S. 129/130), doch sind diese Daten ziemlich alt (1985), und ihre Herleitung entspricht nicht ganz den heutigen Vorstellungen. Ein verlässlicheres Ergebnis der Expositionsanalyse konnte für diese Studie auf eine andere Art und Weise erreicht werden. Für den Bereich des Kantons Zürich (ohne Städte Zürich und Winterthur) stehen nämlich die Daten über den Strassenlärmkataster und die Siedlungsflächen in einer Art und Weise zur Verfügung, welche eine computergestützte Berechnung der gesuchten Verteilfunktion ermöglicht. Resultate in Form eines Lärm-Übersichts-Katasters LUK für die 125000 Gebäude mit lärmempfindlicher Nutzung (Wohnen und Arbeiten) des ganzen Untersuchungsgebietes sind publiziert worden (JB Zürich 2001, S. 66). Da im LUK-Untersuchungsgebiet rund 10.5% der Schweizer Wohnbevölkerung angesiedelt sind, erschien es als vertretbar, im Rahmen von LUK die Schallpegelverteilungen TAGS und NACHTS für die 298'000 Wohnungen mit 744'000 Bewohnern zu ermitteln und die Ergebnisse dann auf die Gesamtschweiz hochzurechnen. Die entsprechenden Verteilungen der Schweizer Bevölkerung auf die Schallpegel-Bereiche wurden in (MÜLLER-WENK 1999, S. 40/41) publiziert. Die entsprechenden Graphiken für die Verteilung der Schweizer Bevölkerung auf die Bereiche des Strassenlärm-bedingten Dauerschallpegels sind nachstehend in Box 6 dargestellt:

Box 6:

Durch Strassenlärm belastete Personen Schweiz, hochgerechnet aus Daten LUK Zürich (MÜLLER-WENK 1999). Die Schallpegel sind hier immer als Werte an der Aussenseite der Gebäudefassaden verstanden.



Das Ergebnis der vorstehenden Ausbreitungs- und Expositionsanalyse ist nun, dass durch die geringen Schallpegelerhöhungen ΔL_{eq} aus Zusatzverkehr gemäss Box 5 die Belastung der gesamten Bevölkerung gegenüber dem Hintergrundpegel von Box 6 leicht nach rechts verschoben wird: Es ergibt sich aus jeder Dezibel-Säule ein «Überlauf» in die nächsthöhere Dezibel-Säule. Da man Gleichverteilung der Personen innerhalb einer Dezibel-Säule annehmen darf, beträgt der von 1 micro-dB ausgelöste «Überlauf» von einer Säule zur nächsten Säule ein Millionstel der Personenzahl dieser Säule gemäss Box 6.

Es sei wiederholt, dass vorgenannte Hintergrund-Schallpegel sich auf die Aussenseite der Gebäudefassaden beziehen. Im Gebäudeinnern sind die entsprechenden Schallpegel bei geschlossenen Fenstern in der Grössenordnung von 30 dB geringer (UBA 2000, S. 15); diese Dämpfung ist indessen erheblich von der Bauart des Gebäudes abhängig. Wenn die Fenster offen sind, aber nicht mehr als 10% der Aussenwandfläche einnehmen, so belüftet sich die Schallpegelreduktion von «aussen» nach «innen» auf höchstens 10 dB (WHO 2000, Abschnitt 2.6).

4 Wirkungsanalyse

Was sind die Folgen für die menschliche Gesundheit, d.h. für das körperliche und psychische Wohlbefinden, wenn der als Lärm wahrgenommene strassenverkehrsbedingte Schallpegel eine bestimmte Höhe erreicht, beziehungsweise von dieser aus noch um einen geringen Wert ansteigt?

4.1 Überblick über die lärmbedingten Wirkungen auf die menschliche Gesundheit

Der aktuelle Stand des Wissens über lärmbedingte Gesundheitsbeeinträchtigungen wird in (WHO 2000, Abschnitt 3) präsentiert. Kurz zusammengefasst ergibt sich folgendes:

- Schädigung der Gehörorgane ist nicht zu erwarten, solange der über 24 Stunden gemittelte Dauerschallpegel am Ohr des Betroffenen 70 dB nicht übersteigt. Obwohl Box 6 höhere Pegelwerte (ausser) zeigt, hat Strassenverkehrslärm kaum Ohrenschäden zur Folge, weil niemand 24 Stunden pro Tag im Freien ist und die Gehörorgane demzufolge zeitweise durch die Schalldämpfung der Gebäudehülle geschützt sind.
- Kommunikations-Störungen (bei Gespräch und Musikhören; dazu vergleichbar auch Störungen bei intellektuell anspruchsvolleren Arbeiten) können bei Lärmpegeln ab 35 dB auftreten. Gemäss Box 6 wird dieses Niveau in Räumen mit geschlossenen Fenstern (angenommene mittlere Dämpfung zwischen Gebäudeaussenseite und Gebäude-Innerem 30 dB) während des Tages (06.00–22.00) in beachtlichem Umfang überschritten.
- Schlaf-Störungen sind stark durch Maximalpegel einzelner Ereignisse beeinflusst. Insoweit jedoch die Lärmsituation durch den gemittelten Dauerschallpegel LAeq ausgedrückt ist, so sind Schlafstörungen oberhalb von 30 dB im Schlafzimmer zu erwarten. Die Daten von Box 6 zeigen, dass infolge Strassenverkehrslärm diese Grenze bei offenem Fenster (angenommene Dämpfung 10 dB) meistens, bei geschlossenem Fenster (angenommene Dämpfung 30 dB) wenig häufig überschritten wird.
- Kardiovaskuläre und physiologische Effekte können eine Folge langzeitlicher Lärmeinwirkung sein, wobei eine Schwelle von 65–70 dB des über 24 Stunden pro Tag gemittelten Dauerschallpegels (Gebäudeaussenseite) genannt wird. Gemäss Box 6 werden diese Werte durch den Strassenverkehrslärm teilweise überschritten. Zu beachten ist allerdings, dass der Zusammenhang zwischen Lärm und Herzkrankheiten bisher noch ungenügend gesichert ist.
- Psychische Störungen verschiedener Art können als Folge von erhöhter Lärmbelastung auftreten. Es sind hier indessen keine Schwellenwerte für solche Effekte genannt, und der Zusammenhang zwischen Lärm und Effekten erscheint noch nicht ausreichend abgesichert.
- Belästigung (annoyance) wird von den vorstehenden Gesundheitseffekten abgegrenzt; der Übergang ist allerdings fließend. Effekte der Belästigung durch Lärm sind Aggressivität, Niedergeschlagenheit, Verärgerung. Der Zusammenhang zwischen Lärmpegel und dem Grad der Belästigung wird typischerweise durch repräsentative Befragungen (social surveys) festgestellt, das heisst durch Erfassung der Eigenbeurteilung der Belästigten. Aufgrund einer grossen Zahl

von solchen Studien wurden Dosis-Wirkungs-Kurven für den Zusammenhang zwischen Lärmpegel und hochgradiger Belästigung (% of highly annoyed persons in a population) ermittelt. Diese zeigen ein markantes Ansteigen des Anteils der «Stark Gestörten» an, sobald der LAeq TAG und der um 10 dB erhöhte LAeq NACHT den Wert von 42 dB überschreitet (MIEDEMA 1998). Diese Voraussetzung ist gemäss Box 6 für den Strassenverkehrslärm erfüllt.

Im Rahmen dieser Studie wurden aus der vorstehenden WHO-Liste der Gesundheits-Beeinträchtigungen die zwei Fälle «Schlafstörung» und «Kommunikationsstörung» weiter behandelt. Die anderen Fälle wurden für den Moment ausgeschieden, weil sie bei Strassenverkehrslärm kaum relevant sind (Schädigung der Gehörorgane) oder weil die Schadensverursachung durch Lärm derzeit noch nicht hinreichend erforscht erscheint (Kardiovaskuläre Effekte und psychische Störungen). Abweichend davon wird in dieser Studie für den Bereich der kardiovaskulären Effekte eine Abschätzung des Umfanges von Herzinfarkt-Fällen als Folge von Strassenverkehrslärm in der Schweiz vorgenommen (siehe Abschnitt 4.5). Belästigung (annoyance) durch Lärm wird hier nicht als selbständige Gesundheitsbeeinträchtigung behandelt, da der in den üblichen Dosis-Wirkungs-Kurven dargestellte Effekt der starken Belästigung («highly annoyed») aus der Sicht des Mediziners nicht ein Krankheitsbild ist, das in seiner Schwere bewertet, d.h. mit gängigen Krankheitsbildern in Vergleich gesetzt werden könnte (Vgl. Abschnitt 5 dieser Studie).

Die Konzentration auf Schlafstörungen und Kommunikationsstörungen kommt einer zurückhaltenden Bemessung der gesamten Schädigung der menschlichen Gesundheit infolge Strassenverkehrslärm gleich.

Andererseits sei hier auch der öfters gehörte Einwand angeführt, Schlafstörungen und Kommunikationsstörungen seien nicht «eigentliche» Gesundheitsstörungen wie etwa Asthma, Zuckerkrankheit oder Farbblindheit. Im Fall der Schlafstörungen ist dieser Einwand offensichtlich nicht haltbar, denn es gibt keinen prinzipiellen Unterschied zwischen den Störungen der Schlaffunktion, der Atemfunktion, der Blutzuckerregulierungsfunktion und der Sehfunktion. Bei Kommunikationsstörungen, also lärmbedingter Beeinträchtigung des Verstehens gesprochener Sprache, des Hörens von Musik und des Wahrnehmens anderer akustischer Signale, kann man sich freilich auf den Standpunkt stellen, hier liege ja nicht eine Störung der körperlichen Hörfunktion vor, sondern lediglich eine temporäre Verringerung ihrer Wirksamkeit infolge einer körperexternen Überlagerung eines Nutzsignals durch ein Störsignal. Zu beachten ist indessen, dass es für einen Betroffenen, der sich dem Lärmeinfluss nicht entziehen kann, die gleichen Folgen hat, ob er ein Gespräch nicht verstehen kann wegen einer ärztlich diagnostizierbaren Schädigung seines Gehörorgans oder infolge eines zu hohen Lärmpegels. In diesem Sinn ist die Kommunikationsstörung mindestens als äquivalent zu einer Schädigung des Gehörorgans anzusehen, und wir behandeln im folgenden die Kommunikationsstörung in diesem Sinn als Gesundheitsstörung.

4.2 Die Fragestellung der Wirkungsanalyse bei Schlaf- und Kommunikations-Störungen

Gesucht ist eine quantitative Information über die Zunahme von Schlafstörungen oder Kommunikationsstörungen, falls die Strassenverkehrs-bedingten Hintergrund-Schallpegel der schweizerischen Bevölkerung infolge einer zusätzlichen Verkehrssaktivität gegenüber dem Stand von Box 6 um ein DeltaLeq gemäss Box 5 ansteigen. Zu erwarten ist grundsätzlich eine Effektzunahme in zweierlei Hinsicht: Einerseits gibt es bei einer Schallpegelerhöhung zusätzliche Fälle von Schlaf-/Kommunikations-Störungen, und andererseits kann bei den bisher schon existierenden Fällen der Grad der Gesundheitsbeeinträchtigung zunehmen, das heisst, eine Person mit schon bestehenden Schlafstörungen kann noch etwas weniger gut schlafen. Wir halten uns an die in der sozialmedizinischen Statistik übliche Betrachtungsweise, Zustände der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch Festlegung von oberen und unteren Grenzen der Zustandsvariablen zu klassifizieren und dann innerhalb dieser Schranken alle Fälle als gleich zu behandeln. Das bedeutet, dass wir in der Wirkungsanalyse den Zustand der Schlafstörung respektive Kommunikationsstörung durch geeignete Abgrenzung definieren und dann nur noch fragen, wie viele Fälle dieser Störung zu erwarten sind, wenn 1000 Personen dauernd mit einem Schallpegel von 50 dB, 51 dB..... 80 dB belastet sind.

Die Antwort auf diese Fragestellung ist eine Dosis-Wirkungs-Beziehung, welche die Anzahl der Fälle von Schlafstörung oder Kommunikationsstörung abhängig von der Zunahme der akustischen Dosis, d.h. dem Schallpegel darstellt. Da die Dosis-Wirkungs-Beziehung in dieser Arbeit die Ergebnisse der Ausbreitungs- und Expositions-Analyse (Abschnitt 3) mit den Ergebnissen der Schadenanalyse (Abschnitt 5) verknüpfen soll, ergeben sich Anforderungen des Zusammenpassens. Insbesondere heisst das, dass in der Dosis-Wirkungs-Beziehung der Schallpegel mit dem gleichen Mass wie in der Ausbreitungsanalyse ausgedrückt wird, nämlich in Form des über ein Jahr gemittelten Dauerschallpegels LAeq. Und das heisst weiter, dass die Wirkungen in gleicher Art umschrieben sein müssen, wie sie in der Schadenanalyse für die Vornahme der Bewertung durch das Ärztepanel formuliert wurden.

Diese Voraussetzungen des Zusammenpassens konnten erfüllt werden durch eine neu erfolgte Auswertung des Datenmaterials der schweizerischen «Lärmstudie 90» (OLIVA 1998). Aus Gründen der Repräsentativität wäre es zwar erwünscht gewesen, die aus den Ergebnissen von 26 verschiedenen Einzelstudie synthetisierte Dosis-Wirkungs-Beziehung von (MIEDEMA 1998) zu verwenden. Diese Möglichkeit entfiel aber, weil die Wirkung bei MIEDEMA lediglich in der Form von «Percentage of Highly Annoyed Persons» ausgedrückt ist, was sich als Inputgrösse für die medizinische Schadenanalyse nicht eignet. Immerhin konnte durch Überprüfung festgestellt werden, dass die Ergebnisse der «Lärmstudie 90» wenigstens bezüglich der Schlüsselgrösse «Percentage of Highly Annoyed Persons» ungefähr im Rahmen der bei (MIEDEMA 1998) berücksichtigten 26 Studien liegen.

4.3 Die Auswertungen des Datenmaterials der schweizerischen «Lärmstudie 90»

Im Jahr 1991 wurden rund 2000 Personen aus den Regionen Zürich und Genf auf Basis eines feststehenden Fragebogens in Bezug auf ihre Betroffenheit durch Umwelteinflüsse an ihrem Wohnort befragt. Der Fragebogen war so strukturiert, dass für die Befragten nicht erkennbar sein sollte, dass es effektiv um eine Studie der Lärmwirkungen ging. Die Personen wurden so ausgewählt, dass Altersstufen und Geschlecht angemessen vertreten waren und dass alle Kombinationen hoch/mittel/tief von Strassenlärmbelastung und Fluglärmbelastung der Wohnungen vorkamen. Die Resultate dieser Studie wurden in (OLIVA 1998) publiziert. Ein im vorliegenden Zusammenhang wichtiges Forschungsergebnis ist festgehalten in (OLIVA 1998, S.122): «Die befragten Personen nehmen den Strassenverkehrslärm und den Flugverkehrslärm als voneinander unabhängige Geräuschkulissen wahr». Das heisst, dass die auf den Strassenverkehr bezogenen Schallpegel und die auf die wahrgenommenen Wirkungen des Strassenverkehrs bezogenen Befragungsantworten die Grundlage für eine Dosis-Wirkungs-Beziehung des Strassenverkehrslärms bilden können, ohne dass diese durch unterschiedliche Schallpegel des Flugverkehrs gestört würde.

Für die vorliegende Arbeit wurde das computergespeicherte Datenmaterial aus den 2052 Befragungen sowie den zugehörigen Messungen des strassenverkehrsbedingten LAeq TAG (vgl. OLIVA 1998, S.33/34) im Jahr 2000 neu ausgewertet. Bei der erneuten Auswertung stand die Verknüpfung des gemessenen/gerechneten LAeq TAG an der Gebäude-Aussenwand mit den Antworten auf folgende Fragen des Fragebogens im Vordergrund:

Frage 22a:

Antworten Sie mir bitte, wie häufig (jeden Tag mind. einmal / alle paar Tage einmal / alle paar Wochen einmal / gar nicht) es vorkommt, dass der Strassenlärm

FR22A_2 Sie beim Durchschlafen oder Einschlafen stört?

FR22A_3 Sie beim Radiohören, Musikhören oder Fernsehen stört?

FR22A_5 Sie bei Gesprächen oder beim Telefonieren stört?

FR22A_6 Sie von Ihrer Arbeit daheim (Lesen, Nachdenken, Konzentrieren) ablenkt?

FR22A_7 Ihre Feierabendruhe und Erholung (in der Wohnung) stört?

FR22A_8 Ihnen Kopfschmerzen bereitet?

FR22A_9 Sie nervös und gereizt macht?

Frage 20e:

Nehmen wir an, es gäbe ein Thermometer, mit dem man messen kann, wie stark Sie in der Wohnung durch Lärm gestört werden. Die Zahl 10 bedeutet, dass Sie durch Lärm unerträglich gestört werden; die Zahl 0, dass Sie überhaupt kein bisschen gestört werden. Bitte antworten Sie anhand dieser Thermometer-Skala von 0 bis 10

FR20E_2 In welchem Ausmass Sie der Strassenlärm stört.

Box 7:

Zentrale Fragen zur Wirkung des Strassenverkehrslärms gemäss Fragenkatalog «Lärmstudie 90»

Für die Auswertung der Befragungsdaten wurde nun von folgenden Grundlagen ausgegangen:

- Das Vorliegen einer *Schlaf-Störung* infolge Strassenlärm ist anzunehmen, wenn eine befragte Person die Frage FR22A_2 mit «jeden Tag mindestens einmal» oder «alle paar Tage einmal» beantwortet. Wenn der Strassenlärm beim Durchschlafen oder Einschlafen nur «alle paar Wochen einmal» stört, so kann man dies nicht mehr als eine eigentliche Schlafstörung ansehen.
- Das Vorliegen einer *Kommunikations-Störung* infolge Strassenlärm wird angenommen, wenn eine befragte Person *wenigstens eine* der Fragen FR22A_3, FR22A_5, FR22A_6, FR22A_7, FR22A_8, FR22A_9 mit «jeden Tag mindestens einmal» oder «alle paar Tage einmal» beantwortet hat. Nun beziehen sich die Fragen FR22A_3 und FR22A_5 zweifelsohne auf Kommunikations-Störungen. Demgegenüber beziehen sich die weiteren Fragen FR22A_6 bis FR22A_9 nicht auf Störungen der auditiven Aufnahme von erwünschter Information infolge von unerwünschten Schalleinwirkungen aus der Umgebung; also kann man hier an sich nicht von Kommunikations-Störungen im engeren Sinn sprechen. Nichtsdestoweniger handelt es sich um Störungen, die nicht einfach als Bagatelle abgetan werden können, sondern für die gesamtheitliche Beurteilung von Lärmwirkungen auf die menschliche Gesundheit von Belang sind. Wir betrachten daher die täglich oder alle paar Tage einmal eintretenden Konzentrationsstörungen bei der Arbeit (A_6), Störungen der Erholung (A_7), Kopfschmerzen (A_8) und Gereiztheit/Nervosität (A_9) als Sachverhalte, die aus gesundheitlicher Sicht ungefähr gleichgesetzt werden können zu den Kommunikations-Störungen im eigentlichen Sinn. Diese Gleichsetzung ist sicher eine gewisse Vereinfachung, aber sie gibt ein realistischeres Bild über die lärmbedingten Gesundheitsstörungen, als wenn die bejahenden Antworten auf diese vier Fragen einfach ignoriert würden. Darüber hinaus ist der mögliche Fehler aus einer Gleichsetzung der Störungen gemäss A_6 bis A_9 mit den eigentlichen Kommunikationsstörungen als relativ gering einzustufen: Im Datenmaterial der Lärmstudie 90 ist nämlich die Zahl der Befragten klein, welche zwar eine häufige Störung verneint haben bezüglich A_3 und A_5, aber bejaht haben bezüglich wenigstens einer der Fragen A_6 bis A_9. Dies wird in Box 8 und Box 9 gezeigt werden. Wir halten es daher als zweckmässig, Störungen gemäss Fragen A_6 bis A_9 als äquivalent zu den Kommunikationsstörungen im eigentlichen Sinn (A_3 und A_5) zu behandeln.

Sowohl bei Schlaf-Störung als auch bei Kommunikations-Störung betrachten wir es als für das Vorliegen einer Störung einschränkend erforderlich, dass neben der häufigen *Frequenz* des Vorkommens (mindestens alle paar Tage einmal) zusätzlich noch die *Intensität* der Störung von der befragten Person als hoch eingestuft wird. Das heisst, dass die Antwort auf die zusätzlich gestellte Frage FR20E_2 im Bereich der Skalometer-Stufen 8–10 («highly annoyed») liegen muss. Anders gesagt: Die Befragten müssen die Störung als «unerträglich» oder nahezu unerträglich empfunden haben.

Obschon die Lebensgewohnheiten der Menschen unterschiedlich sind, wird hier vereinfachend angenommen, dass die im Zusammenhang mit Kommunikations-Störungen stehenden Tätigkeiten während des Tages zwischen 06.00 und 22.00 Uhr wahrgenommen werden, während der Schlaf auf die Nachtzeit zwischen 22.00 und 06.00 entfällt. Daher wird Kommunikations-Störung mit dem strassenlärmbedingten Schallpegel LAeq TAGS an der Gebäude-Aussenwand in Verbindung gebracht. Schlaf-Störung wird demgegenüber mit dem LAeq NACHTS an der Gebäude-Aussenwand in Verbindung gebracht. Im Rahmen der «Lärmstudie 90» wurde nur der erstgenannte Schallpegel gemessen/berechnet; gemäss schriftlicher Stellungnahme C. OLIVA und nach allgemeiner Erfahrung darf angenommen werden, der zugehörige LAeq NACHTS sei an allen Standorten jeweils etwa 8–10 dB tiefer. Dies steht in Übereinklang mit den Daten für den Kanton Zürich, welche die Grundlage für die Graphiken von Box 6 bilden.

Die Hauptergebnisse der neuen Auswertung des Datenmaterials aus Lärmstudie 90 sind in folgender Box 8 dargestellt:

Box 8:

Auswertung aus Datenmaterial Lärmstudie 90: Anzahl Fälle Schlaf-Störung und Kommunikationsstörung. Einbezogen sind nur diejenigen «häufig Gestörten», bei denen zugleich die Störungs-Intensität auf Stufe «highly annoyed» liegt. Die Fälle sind summiert pro Intervall des Schallpegels LAeq TAGS respektive NACHTS (Schallpegel NACHTS ist 9 dB(A) tiefer angenommen als TAGS). Die angegebenen Schallpegel beziehen sich auf die Fassaden-Aussenseite der Gebäude.

«Häufig» Gestörte (täglich oder alle paar Tage einmal) mit Skalometer 8–10 (highly annoyed)				
LAeq-Bereich Strassenverkehr TAGS dB(A)	<55	55–59	60–64	>=65
Entsprechender LAeq-Bereich Strassenverkehr NACHTS dB(A)	<46	46–50	51–55	>=56
Anzahl Befragte total	957	422	432	241
davon Anzahl «highly annoyed»	73	98	115	113
% «highly annoyed»	7.6	23.2	26.6	46.9
Anzahl HighlyAnnoyed «häufig» gestört NACHTS	38	54	60	72
% HighlyAnn UND «häufig» gestört NACHTS (Schlaf-Störung)	4.0	12.8	13.9	29.9
Anzahl HighlyAnnoyed «häufig» gestört TAGS	42	70	92	102
% HighlyAnn UND «häufig» gestört TAGS (Kommunikations-Störung)	4.4	16.6	21.3	42.3
Anzahl Highly Annoyed «häufig» gestört TAGS wegen A_3 oder A_5	32	55	78	86
% Highly Ann UND «häufig» gestört TAGS wegen A_3 oder A_5	3.3	13.0	18.1	35.7

In Box 8 ist auf Zeile 3 die Anzahl der befragten Personen pro Schallpegel-Bereich gegeben, wobei die Schallpegel NACHTS nicht gemessen, sondern summarisch als 9 dB tiefer als TAGS angesetzt wurden. In Zeilen 6 bis 9 sind die Anzahlen derjenigen Personen angegeben, die sowohl bezüglich Störungs-Frequenz («häufig» gestört) als auch bezüglich Störungs-Intensität («highly annoyed») die Lärmbelastung als besonders hochgradig empfinden. Dies sind z.B. NACHTS 38 von total 957 Personen, oder 4.0%, die im Bereich eines Schallpegels <46 dB NACHTS leben, sowie TAGS 42 von total 957 Personen, oder 4.4%, die im Bereich eines Schallpegels von

<55 dB TAGS leben. Box 8 zeigt, dass diese Prozentsätze in Richtung höherer Schallpegel markant zunehmen: Obschon die Befragten nicht wussten, wie hoch der an der Aussenfassade ihres Hauses ermittelte Schallpegel des Strassenverkehrs ist, sind ihre Reaktionen in der Befragung klar abhängig von der Höhe dieses Schallpegels. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Befragten nicht einfach willkürliche Behauptungen aufgestellt haben.

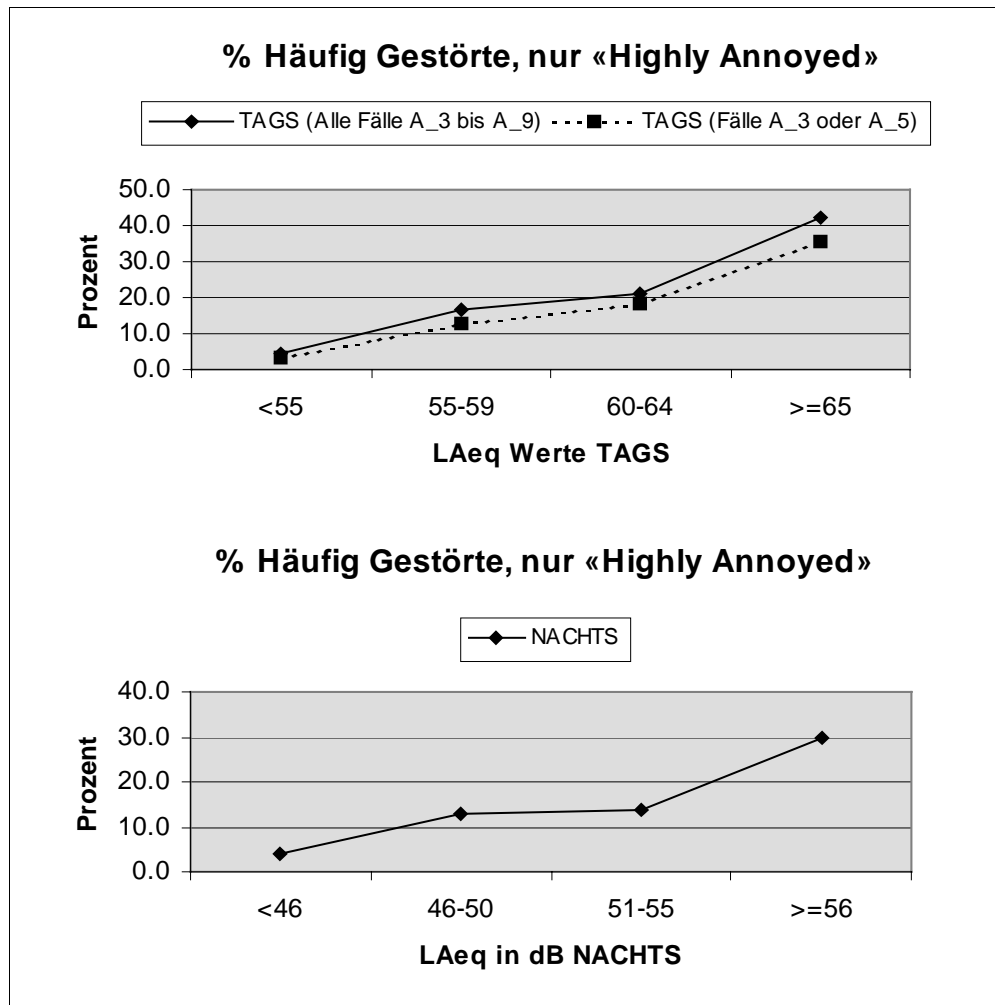
Natürlich könnten auch andere Gründe als der Strassenlärm die eigentliche Ursache für die «häufig» wahrgenommenen und intensiven Störungen sein. Aber man kann begründeterweise annehmen, dass die *Zunahme* des Prozentsatzes der häufig Gestörten mit wachsendem Schallpegel im wesentlichen auf diesen Schallpegel zurückzuführen ist. Diese Zunahme der häufig Gestörten ist TAGS stärker als NACHTS; dies könnte damit im Zusammenhang stehen, dass die Schlafzimmer vielfach auf der ruhigeren Seite des Gebäudes liegen oder der Schlaf durch Schlafmittel oder Ohrpfropfen beeinflusst wird.

Dass der in Box 8 zum Ausdruck kommende Zusammenhang zwischen Schallpegel und Prozentsatz der sich häufig und intensiv gestört fühlenden Personen in der Lärmstudie 90 nicht unrealistisch ist, wird auch durch einen Vergleich mit den WHO Guidelines for Community Noise (WHO 2000, Abschnitt 4.3.1) gestützt, die bei bewohnten Gebäuden eine Nicht-Überschreitung der LAeq Pegel an der Fassade-Aussenseite von 55 dB TAGS und 45 dB NACHTS postulieren.

In Box 8 ist im oberen Teil angenommen, dass eine Kommunikations-Störung dann vorliegt, wenn eine Person TAGS sich mindestens in Bezug auf *eine* der Fragen A_3 bis A_9 als «häufig» gestört erklärt. Nun haben wir vorstehend darauf hingewiesen, dass man bei den Fragen A_6 bis A_9 den direkten Zusammenhang mit Kommunikations-Störung in Zweifel ziehen könnte. Aus diesem Grund ist im unteren Teil von Box 8 noch gezeigt, wie viele Fälle von «highly annoyed» und «häufig» Gestörten vorliegen würden, wenn man ausschliesslich auf die Antworten zu Fragen A_3 und A_5 abstellt und die Antworten zu A_6 bis A_9 ignoriert. Es zeigt sich dann, dass bei dieser engen Fassung des Begriffs «Kommunikations-Störung» die Zahl der Fälle etwa 20% tiefer ist als im oberen Teil von Box 8. Aber der Unterschied ist nicht entscheidend, weil für die nachfolgenden Berechnungen (siehe Abschnitt 4.4, dritter Absatz) *die Steigung* der Kurve von Belang ist und nicht der Prozentsatz der Gestörten bei einer bestimmten Höhe des Schallpegels. Der Verlauf der Dosis-Wirkungs-Beziehung aufgrund der Zahlen von Box 8 ist in nachstehender Box 9 als Graphik dargestellt, wo die Steigungsverhältnisse deutlicher zum Ausdruck kommen.

Box 9:

Dosis-Wirkungs-Beziehung: Prozentuale Anteile von Kommunikations-Störungen TAGS und Schlaf-Störungen NACHTS der Bevölkerung, abhängig vom LAeq Pegel an der Fassaden-Aussenseite, aufgrund der Zahlen der Lärmstudie 90 (Box 8).



Box 9 zeigt deutlich, dass die Dosis-Wirkungs-Beziehung TAGS sich hinsichtlich der Steigung (zusätzlich Gestörte bei Anstieg Schallpegel um 5 dB) nicht wesentlich ändert, wenn man die Antworten auf Fragen A_6 bis A_9 einbezieht, respektive nicht einbezieht. Wir entscheiden uns hier für die Variante «Einbezug», mit der Begründung, dass das im Abschnitt 5 zu entwickelnde «disability weight» für Kommunikations-Störung der bessere Schätzwert für die Störungen gemäss A_6 bis A_9 sei als das «disability weight» für volle Gesundheit.

Bei der Interpretation der Graphik von Box 9 ist zu beachten, dass der unterste und der oberste dB-Bereich offen sind: bei <55 dB TAGS sind ausser Gebäuden mit 50–54 dB auch solche mit tieferen Pegeln enthalten, und bei ≥ 65 dB TAGS sind ausser Gebäuden mit 65–69 dB auch solche mit höheren Pegeln enthalten. Wir können annehmen, dass der Prozentsatz der Gestörten unterhalb von 50 dB TAGS nicht mehr wesentlich abnimmt, da erfahrungsgemäss auch bei sehr tiefen Schallpegeln sich immer einige Prozent der Befragten als gestört erklären. Daher gelten die 4.4% Gestörten nicht nur für die offene Klasse <55 dB, sondern auch für die geschlossene Klasse 50–54 dB; wir nehmen darüber hinaus an, dass dieser Sockel von unabhän-

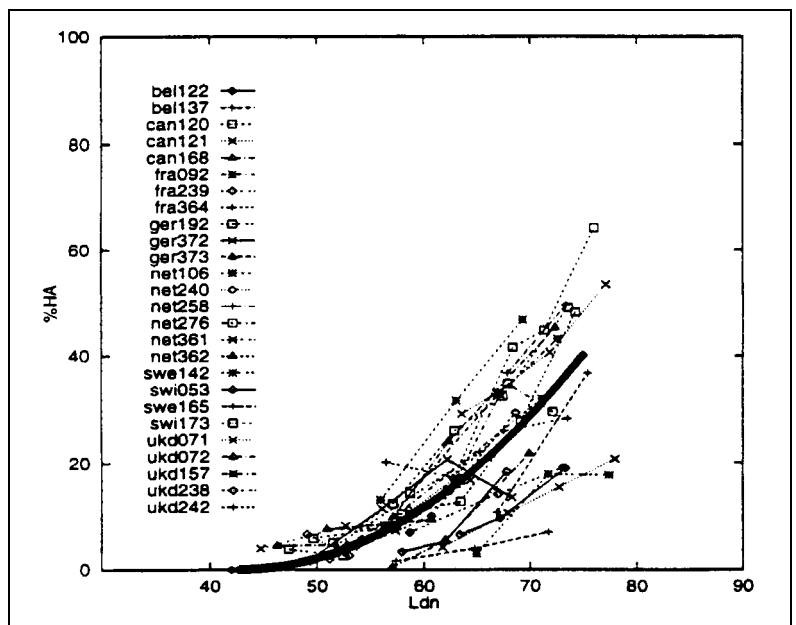
gig vom tatsächlichen Lärmpegel Gestörten auch Bestandteil der Zahl Gestörter der Klassen oberhalb von 54 dB bilde. Aus diesem Grund betrachten wir in allen Lärm-belastungsklassen einen Sockel von 4.4% als nicht im Zusammenhang mit Lärm stehend. Ferner ist anzunehmen, dass der Prozentsatz der Gestörten bei Pegeln oberhalb der Klasse 65–69 dB TAGS weiter ansteigt. Dies bedeutet, dass die Pro-zentsätze der Gestörten von Klasse 65–69 dB etwas weniger hoch sind als die in Box 9 eingezeichneten Werte für die offene Klasse ≥ 65 dB TAGS, und für die Klasse 70–74 dB ist im Gegenzug ein noch höherer Anteil der Gestörten zu erwar-ten. Nun ergibt sich allerdings aus dem Datenmaterial der Lärmstudie 90, dass in der offenen Klasse ≥ 65 dB TAGS die Fälle von 65–69 dB überwiegen, sodass die in Box 9 eingezeichneten Prozentwerte approximativ auch gelten für die geschlossene Klasse 65–69 dB. Für den Bereich 70–74 dB TAGS kann demgegenüber ange-nommen werden, dass sich der in Box 9 dargestellte Trend fortsetzt. Analoge Überlegungen gelten auch für die in Box 9 unten dargestellte Dosis-Wirkungs-Beziehung NACHTS.

Man kann sich fragen, was in Box 9 die Bedeutung der abgeschwächten Steigung zwischen 55–59 dB und 60–64 dB TAGS sei. Da keine hinreichende Erklärung vorliegt, wieso die Zunahme der Gestörten in diesem Bereich kleiner sein sollte als vorher oder nachher, betrachten wir diesen Knick als Artefakt der Klassenbildung.

Vergleicht man die Dosis-Wirkungs-Beziehung von Box 9 mit der aus 26 Einzel-studien synthetisierten exposure-response relationship für Strassenlärm von MIEDE-MA gemäss Box 10, so passt die Information von Box 9 durchaus in diesen weiter-gespannten Rahmen, auch wenn man zu berücksichtigen hat, dass bei MIEDEMA lediglich die Prozentsätze der «highly annoyed» angegeben werden, während in Box 9 die anzunehmenden Hauptgründe für diese «high annoyance» explizit mitberück-sichtigt sind.

Box 10:

Exposure-response relationship für Strassen-lärm aus 26 Einzelstudien synthetisiert (MIEDEMA 1998, S. 3442, Fig. 2 Mitte). %HA ist der Prozentanteil der Highly Annoyed, Ldn ist der über ein Jahr gemittelte Schallpegel in dB, wobei die Pegelwerte für NACHTS um 10 dB erhöht eingesetzt sind. Die dünnen Striche stellen die Ergebnisse der einzelnen Studien dar. Die dick ausgezogene Kurve ist die aus den 26 Einzelstudien ermittelte Dosis-Wirkungs-Beziehung.



4.4 Verknüpfung von Ausbreitungs-, Expositions- und Wirkungsanalyse

Wir wissen nun gemäss Box 5, um welchen Betrag DeltaLeq der Schallpegel für die Gesamtbevölkerung der Schweiz für die Dauer eines Jahres ansteigt, wenn zusätzliche 1000 Fahrzeugkilometer gefahren werden unter der Modellannahme einer Gesamtverkehrs-proportionalen Verteilung über das ganze schweizerische Strassennetz. Gemäss Box 6 wissen wir zudem, auf welcher Höhe die schon vorhandenen Hintergrundscharllpegel des Strassenverkehrs für die Schweizer Bevölkerung liegen. Nun kommt die Information von Box 9 hinzu, die aussagt, wie viel % der betroffenen Personen zusätzlich eine ernsthafte Beeinträchtigung (highly annoyed) in Form von «häufigen» Schlafstörungen oder Kommunikationsstörungen erleiden, wenn der strassenverkehrsbedingte Schallpegel LAeq ab einem Schwellenwert von 55 dB TAGS oder 46 dB NACHTS um 5 dB (oder Bruchteile davon in Form von DeltaLeq) erhöht wird.

Man könnte nun in der Dosis-Wirkungs-Beziehung Box 9 für jeden einzelnen dB-Wert die Steigung der Kurve ermitteln, d.h. die Erhöhung des Prozentsatzes der Schlafgestörten respektive Kommunikationsgestörten pro Erhöhung des Schallpegels um 1 Micro-Dezibel. Diese Prozentsatz-Erhöhungen könnte man dann ausmultiplizieren mit den Personenzahlen pro Micro-Dezibel-Bereich auf Basis der Säulen von Box 6. Summierte man darauf die Ergebnisse je separat für TAGS und NACHTS, so ergäbe sich die Zahl der Fälle zusätzlicher Kommunikations-Gestörter respektive Schlafgestörter bei einer Erhöhung des Schallpegels um 1 Micro-Dezibel über das ganze schweizerische Strassennetz. Würde man diese Zahl der zusätzlich Kommunikations-Gestörten (resp. Schlafgestörten) multiplizieren mit den Micro-Dezibel-Werten pro 1000 Fahrzeug-Kilometer TAGS (resp. NACHTS) von Box 5, so ergäben sich 4 Zahlen, welche die Anzahl der pro 1000 Fahrzeug-Kilometer zusätzlich Gestörten ausdrücken für jeden der 4 Fälle PW-TAGS, LKW-TAGS, PW-NACHTS, LKW-NACHTS.

Wir wählen indessen hier eine vereinfachte Berechnung, um eine Über-Interpretation der nur als grobe Approximation zu verstehenden Dosis-Wirkungs-Beziehung von Box 9 zu vermeiden. Wir konzentrieren dabei die Information von Box 8 und Box 9 in folgende Aussagen, die einer vorsichtig-zurückhaltenden Dimensionierung der Effekte gleichkommen:

- Die von den Befragten angegebenen Kommunikations-Störungen betrachten wir im Umfang von 4.4% bei allen Pegelklassen als nicht lärmbedingt. Unterhalb eines Pegels von 55 dB TAGS wird daher die Zahl der dem Strassenverkehrslärm zuschreibenden Kommunikations-Störungen als Null angenommen. Darüber steigt diese Zahl pro zusätzliches Dezibel durchschnittlich um $(42.3\% - 4.4\%) / 15 \text{ dB} = 2.5 \text{ Prozentpunkte pro dB Pegelerhöhung}$. Dies entspricht 2.5 zusätzlichen Fällen von Kommunikationsstörungen pro 100 Mio betroffene Personen bei einer Pegelerhöhung um 1 Micro-Dezibel TAGS. Dieser Verlauf wird als linear angenommen bis zum oberen Ende des praktisch relevanten Bereichs gemäss Box 6 (75 dB TAGS).

- Die von den Befragten angegebenen Schlaf-Störungen betrachten wir im Umfang von 4.0% bei allen Pegelklassen als nicht lärmbedingt. Unterhalb eines Pegels von 46 dB NACHTS wird daher die Zahl der dem Lärm zuzuschreibenden Schlaf-Störungen als Null angenommen. Darüber steigt diese Zahl um $(29.9\% - 4.0\%) / 15 \text{ dB} = 1.7$ Prozentpunkte pro dB. Dies entspricht 1.7 zusätzlichen Fällen von Schlafstörungen pro 100 Mio betroffene Personen bei einer Pegelerhöhung um 1 Micro-Dezibel NACHTS. Dieser Verlauf wird als linear angenommen bis zum oberen Ende des relevanten Bereichs gemäss Box 6 (66 dB NACHTS).

Unter dieser Voraussetzung ist nun die Ermittlung der zusätzlichen Anzahl Personen Schweiz mit Schlaf-Störung, verursacht durch 1000 NACHTS gefahrene Kilometer PW oder LKW, sehr einfach (die Berechnung der zusätzlichen Fälle von Kommunikations-Störungen durch 1000 TAGS gefahrene Fahrzeug-Kilometer ist analog):

Zuerst wird aufgrund der Daten zu Box 6 der Teil der Schweizer Bevölkerung ermittelt, der NACHTS mit einem strassenlärm-bedingten Schallpegel LAeq von 46 dB und höher belastet ist; dieser Anteil beträgt 3.36 Mio Personen. Wenn der Schallpegel für alle diese Personen um 1 Micro-Dezibel NACHTS angehoben würde, so würden pro 100 Mio Personen 1.7 zusätzliche Fälle von Schlaf-Störung resultieren. Für 3.36 Mio Personen sind es demnach 0.057 Fälle. Da gemäss Box 5 aufgrund von 1000 PW-km NACHTS der LAeq landesweit um DeltaLeq 0.86 Micro-Dezibel ansteigt, und aufgrund von 1000 LKW-km NACHTS um DeltaLeq 8.4 Micro-Dezibel, errechnen sich pro 1000 PW-km NACHTS $0.86 * 0.057$, gleich 0.049 zusätzliche Fälle von Schlaf-Störungen. Pro 1000 LKW-km NACHTS sind es $8.4 * 0.057$, gleich 0.48 zusätzliche Fälle von Schlaf-Störungen. Da der LAeq durch die zusätzlich gefahrenen 1000 km rechnerisch während des ganzen Jahr erhöht ist, ist auch die rechnerische Dauer dieser Schlaf-Störungen 1 Jahr.

Die Inputdaten und Rechenresultate sind nachstehend in Box 11 zusammengefasst.

Box 11:
Ermittlung zusätzliche Fälle von Kommunikations- und Schlafstörungen in der Schweiz pro 1000 Fahrzeug-Kilometer

	TAGS Kategorie 1 PW etc	TAGS Kategorie 2 LKW etc	NACHTS Kategorie 1 PW etc	NACHTS Kategorie 2 LKW etc
DeltaLeq in Micro-dB pro 1000 Fahrzeug-km gemäss Box 5	0.050	0.50	0.86	8.4
Mio Personen Schweiz LAeq 55 dB und höher TAGS	3.05	3.05		
Mio Personen Schweiz LAeq 46 dB und höher NACHTS			3.36	3.36
Zusätzliche Störungsfälle pro 100 Mio Personen, bei DeltaLeq 1 Micro-dB	2.5	2.5	1.7	1.7
Zusätzliche Kommunikations-Störungen pro 1000 Fahrzeug-km TAGS	0.0038	0.038		
Zusätzliche Schlaf-Störungen pro 1000 Fahrzeug-km NACHTS			0.049	0.48

Die Zahlen der zusätzlichen Störfälle von Box 11 sind tiefer als die entsprechenden Zahlen in (MÜLLER-WENK 1999, S. 46), vor allem weil die DeltaLeq in Box 5 dieser Studie tiefer angesetzt sind, und weil die Schwelle für Kommunikationsstörungen hier auf 55 dB statt 50 dB angesetzt wurde, was die Zahl der Betroffenen um rund 2 Mio Personen reduziert hat.

4.5 Abschätzungen zu verkehrslärmbedingten Herzinfarkten

Als bedeutender Einzelfall aus dem Bereich der lärmbedingten kardiovaskulären Gesundheitseffekte soll hier die Erhöhung des Herzinfarkttrisikos bei Zusatzlärm infolge steigender Strassenverkehrsmengen abgeschätzt werden.

H. ISING als auf diesem Gebiet anerkannt kompetenter Forscher fasst in (ISING 2000) den derzeitigen Wissensstand wie folgt zusammen:

- Es besteht ein begründeter Verdacht für die Befürchtung, dass bei Strassenverkehrslärmbelastungen mit Mittelungspegeln ausserhalb der Wohnungsfenster von mehr als 65 dB(A) am Tage bzw. 55 dB(A) in der Nacht eine Zunahme des Herzinfarkttrisikos um ca. 20% erfolgt.
- Ein gesicherter Nachweis nach strengen wissenschaftlichen Kriterien für den kausalen Zusammenhang zwischen dieser Lärmbelastung und dem kardiovaskulären Risiko steht indessen immer noch aus.
- Der vorgenannte begründete Verdacht ist jedoch hinreichend abgestützt, um staatliches Handeln nach dem Vorsorge-Grundsatz auszulösen.

Nach diesem Stand der Dinge ist in (ISING 2000) eine quantitative Ermittlung der durch Strassenverkehrslärm bedingten Herzinfarkt-Todesfälle für die Bundesrepublik Deutschland, Stand 1997, vorgenommen worden. ISING geht davon aus, dass in der BRD 16% der Bevölkerung dem kritischen Mittelungspegel von 65 dB am Tage bzw. 55 dB in der Nacht ausgesetzt sind. Für diesen Bevölkerungsteil wird angenommen, dass das Risiko, an Herzinfarkt (Diagnosecode bisher 410, neu nach ICD-10 I21) als Todesursache zu versterben, gegenüber der nicht-lärmbelasteten Bevölkerung um 20% erhöht ist. Demnach errechnet ISING für die Bundesrepublik Deutschland 1997 1800 Herzinfarkt-Todesfälle wegen Strassenlärm. Er konstatiert dabei, dass diese Zahl im Vergleich zu 61400 Todesfällen wegen PM10-Feinstaub und 10000 Todesfällen wegen Passivrauchen zwar klein, aber nicht vernachlässigbar sei.

Die ISING'sche Annahme, das strassenlärmbedingte Herzinfarkt-Zusatzrisiko betrage Null bis zur Schwelle 65 dB TAGS bzw. 55 dB NACHTS, und konstant 20% bei allen Pegeln oberhalb dieses Schwellenwerts, entspricht einer Dosis-Wirkungs-Beziehung mit einer einzigen Treppenstufe ab 66 dB bzw. 56 dB, was eine eher unwahrscheinlich wirkende Charakteristik ist. Es wären dann ja gemäss Box 6 nur diejenigen Personen von der lärmbedingten Risikozunahme betroffen, die infolge des Zusatzlärms DeltaLeq von der Säule 65 dB (bzw. 55 dB) in die nächsthöhere Dezibel-Säule verschoben würden. Bei allen anderen Personen hätte eine Lärmzu-

nahme keine Zunahme des Herzinfarkt-Risikos zur Folge. Eine solche Interpretation würde, wie gezeigt werden kann, zu einer Unterschätzung der Lärmwirkung führen.

Obschon gemäss (ISING 2000) «keine Modelle für Dosis-Wirkungs-Beziehung» für den Zusammenhang zwischen Mittelungspegel und Herzinfarkt-Zusatzrisiko vorliegen, wird hier die Einführung einer (im Vergleich zu Treppenkurven mit einem einzigen Tritt bei 66/56 dB) etwas plausibleren Dosis-Wirkungsbeziehung vorgeschlagen wie folgt:

- Die Wirkung (zusätzliche Herzinfarkte wegen Strassenverkehrslärm) wird als Null angenommen bis zu den Schwellenwerten des LAeq von 65 dB TAGS respektive 55 dB NACHTS
- Ab diesem Schwellenpunkt wird eine Zunahme des Zusatzrisikos für Herzinfarkt linear mit dem LAeq ansteigend angenommen. Gemäss Box 6 wird diese Linearitätsannahme wie im Fall von Schlaf- und Kommunikationsstörungen nur bis zu einer Obergrenze von 75 dB TAGS und 66 dB NACHTS benötigt. Angesichts des engen Gültigkeitsbereichs erscheint diese Linearitätsannahme vertretbar, selbst wenn die unbekannte wirkliche Dosis-Wirkungs-Beziehung nichtlinear sein sollte.
- Damit muss für die Festlegung der Dosis-Wirkungs-Beziehung nur noch die Steigung festgelegt werden. Dies kann dadurch geschehen, dass im Sinne von (ISING 2000) die jährliche Zahl der strassenlärmbedingten Herzinfarkte für das Gebiet der Schweiz bestimmt wird. Die Steigung der Dosis-Wirkungs-Geraden muss dann so hoch sein, dass unter Benutzung der Häufigkeiten von Box 6 gerade die nach ISING bestimmte Gesamtzahl der strassenlärmbedingten Herzinfarkte pro Jahr der Schweiz resultiert.

Unter Berücksichtigung dieser Anpassung leitet sich die Bestimmung der strassenlärmbedingten Herzinfarkt-Todesfälle pro Jahr nach (ISING 2000) für die Schweiz wie folgt ab:

- Gemäss Auskunft des Bundesamtes für Statistik (BfS 2001) sind im Jahr 1998 3656 Personen an Herzinfarkt (Diagnosecode I21) gestorben.
- Aufgrund der Zahlen zu Box 6 sind TAGS 8% der schweizerischen Bevölkerung mit einem strassenverkehrsbedingten LAeq von 65 dB oder mehr belastet, NACHTS 11.4% mit einem LAeq von 55 dB oder mehr. Anstelle dieser beiden Bevölkerungsanteile nehmen wir vereinfachend an, eine Quote von 11% der Schweizerbevölkerung sei TAGS und NACHTS mit Strassenverkehrslärm oberhalb der Schwelle des erhöhten Herzinfarkttrisikos belastet. Für diesen Bevölkerungsteil ist das relative Risiko, an Herzinfarkt zu sterben, nach ISING um 20% erhöht.
- Im Istzustand der Schallbelastung beträgt die strassenlärmbedingte Zahl von Herzinfarkt-Todesfällen Schweiz demzufolge nach Berechnungsart ISING $3656 \text{ Todesfälle} * 11\% * 20\% / (1 + 11\% * 20\%) = 79 \text{ Herzinfarkt-Todesfälle}$

Nun kann man ermitteln, was für eine Steigung eine als linear angenommene Dosis-Wirkungs-Kennlinie haben muss, wenn sie bei 55 dB NACHTS eine Wirkung Null

zeigen soll und dann bis 66 dB NACHTS linear so steil ansteigt, dass für die Gesamtheit der Personen im Bereich von 56–66 dB NACHTS gerade etwa die oben ermittelte jährliche Zahl von 79 lärmbedingten Herzinfarkt-Todesfällen resultiert: Die Berechnung mithilfe der Zahlen zu Box 6 ergibt, dass diesfalls die Zahl der zusätzlichen jährlichen Herzinfarkt-Todesfälle wegen Lärm pro 1 zusätzliches dB um 31 pro 1 Mio Betroffene steigen muss, ausgehend von Null Fällen bei 55dB NACHTS. Da gemäss Box 6 in der Schweiz etwa 650'000 Personen mit Strassenlärm oberhalb 55dB NACHTS belastet sind, heisst das, dass die Zahl der lärmbedingten zusätzlichen Herzinfarkt-Todesfälle pro Jahr von bisher 79 um $0.650 \cdot 31$ gleich 20 Fälle steigen würde, falls bei allen diesen Personen der LAeq-Pegelwert sich um 1 dB erhöhen würde. Bei einem DeltaLeq von 1 Micro-Dezibel wären es 0.000020 Fälle.

Mit dieser Information kann nun, analog zu Box 11, ermittelt werden, wie viel zusätzliche Herzinfarkt-Todesfälle in der Schweiz zu erwarten sind als Folge der zusätzlichen Lärmbelastung der Bevölkerung aus 1000 Fahrzeug-Kilometern:

Box 12:
Zusätzliche Herzinfarkt-Todesfälle Schweiz pro 1000 Fahrzeug-Kilometer

	TAGS Kategorie 1 PW etc	TAGS Kategorie 2 LKW etc	NACHTS Kategorie 1 PW etc	NACHTS Kategorie 2 LKW etc
DeltaLeq in Micro-dB pro 1000 Fahrzeug-km gemäss Box 5	0.050	0.50	0.86	8.4
Mio Personen Schweiz mit LAeq NACHTS oberhalb 55 dB belastet	0.65	0.65	0.65	0.65
Zusätzliche Herzinfarkt-Todesfälle Schweiz pro Jahr, wenn alle LAeq um 1 Micro-dB erhöht	0.000020	0.000020	0.000020	0.000020
Zusätzliche Herzinfarkt-Todesfälle Schweiz pro 1000 Fahrzeug-Kilometer	0.000001	0.000010	0.000017	0.000168

Um die Zahlen der untersten Zeile von Box 12 in die nachfolgenden Schadenanalyse einbeziehen zu können, sind noch folgende Informationen festzuhalten:

- gemäss der schweizerischen Statistik der Todesursachen gehen pro Herzinfarkt-Todesfall rund 10 Lebensjahre potentiell verloren (BfS 2001)
- die Mortalität bei Herzinfarkt wird allgemein zu 30% innerhalb der ersten Stunde (ausserhalb Spital) sowie zu 10–12% nach Einlieferung ins Krankenhaus angenommen (THIEME 1999, S. 1108). Das bedeutet, dass knapp 60% der Betroffenen überleben.
- gemäss schweizerischer Medizinischer Statistik der Krankenhäuser sind in 1998 total 4972 Spitaleinlieferungen wegen Herzinfarkt erfolgt, mit einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer von 11 Tagen (BfS 2001). Entsprechend der vorstehenden Aufteilung der Mortalität kann angenommen werden, dass von den eingelieferten Herzinfarkt-Patienten rund 900 im Spital verstarben (18% von 4972) und die andern rund 4100 Patienten überlebten und nach den 11 Tagen Spitalaufenthalt noch weitere 30 Tage in einer Rehabilitationsklinik verbringen mussten. Die rund 900 im Spital wegen Herzinfarkt Verstorbenen sind eine

Teilmenge der insgesamt 3656 im Jahr 1998 in der Schweiz an Herzinfarkt verstorbenen Personen. Wir können also annehmen, dass die «zusätzlichen Herzinfarkt-Spitaleinweisungen mit nicht-tödlichem Ausgang pro 1000 Fahrzeug-Kilometer» um einen Faktor F grösser sind als die Todesfälle gemäss letzter Zeile von Box 12; dieser Faktor F ist gleich dem Verhältnis der Spitaleinweisungen wegen Herzinfarkt mit nichttödlichem Ausgang zum Jahrestotal der Todesfälle wegen Herzinfarkt, also $4100/3656 = 1.12$.

5 Schaden-Analyse

Der Schaden am Gut «Menschliche Gesundheit» ist nach allgemeinem Urteil nicht als gleich hoch zu betrachten, wenn eine Person während der Dauer eines Lebensjahres entweder unter Schlafstörungen oder unter Blindheit leidet, oder wenn dieses Lebensjahr sogar verloren geht durch einen vorzeitigen Tod infolge Herzinfarkt. Aus den untersten Zeilen von Box 11 und Box 12 ergibt sich, dass die Fallzahlen pro 1000 Fahrzeug-Kilometer bei Herzinfarkt-Todesfall etwa 3000–4000 mal kleiner sind als bei der während 1 Jahr anhaltenden Schlafstörung. Wenn man sich aus diesen Häufigkeiten verschiedenartiger Gesundheitsstörungen ein Gesamtbild über die Schädigung der Gesundheit einer Bevölkerung machen will, braucht es zusätzlich eine Vorstellung über die relative Schwere von unterschiedlichen Krankheiten und von verlorenen Lebensjahren als Folge vorzeitigen Todes. Gibt es hierfür nebst der völlig subjektiven Beurteilung durch einen einzelnen Menschen so etwas wie einen quasi-objektiven Massstab unserer Gesellschaft?

5.1 Das DALY-Konzept

Auf der Ebene der WHO ist hierzu das DALY-Konzept entwickelt worden (MURRAY 1996), das in der Praxis vor allem Verwendung findet zur zusammenfassenden Beurteilung des Gesundheitszustandes der Bevölkerung eines Landes, sowie zur Beurteilung seiner Veränderung als Folge von WHO-gestützten Projekten. Dabei wird mit dem Mass DALY (Disability Adjusted Life-Years) bestimmt, wie viele Lebensjahre in einem Land im Istzustand oder bei Realisierung von gesundheitsrelevanten Projekten infolge vorzeitigen Todes verloren gehen oder infolge von Gesundheitsbeeinträchtigung gewissermassen nur in reduziertem Ausmass gelebt werden können. Beeinträchtigung (disability) im Vergleich zur vollen Gesundheit wird durch Disability Weights (DW) gewichtet, die nach Massgabe der Schwere der Beeinträchtigung pro Krankheitsart in Tabellen festgehalten sind. Die Disability-Weights-Tabellen der WHO haben weltweiten Bezug, weshalb sie stark ausgerichtet sind auf die ausserhalb der entwickelten Industrieländer vorkommenden Krankheiten. Daher wurden in neuester Zeit durch Untersuchungen in Holland (STOUTHARD 1997) und in Australien (VGDHS 1999) die WHO-Tabellen ergänzt in Richtung von Krankheitsbildern, die vor allem für entwickelte Länder typisch sind. Beispiele solcher Disability Weights sind im Anhang (Information/Fragebogen an SUVA-Aerzte) unter Punkt 2 dargestellt. Die dortige Tabelle bringt zum Ausdruck, dass einem mit voller Gesundheit gelebten Lebensjahr das Disability Weight (DW) 1 zukommt, während einem mit Krankheit belasteten Lebensjahr im Falle von Diabetes ohne Komplikationen ein DW von 0.93, im Falle von Tetraplegie ein DW von nur noch 0.16 zukommt. Wer also unter Diabetes ohne Komplikationen leidet, kann die wichtigen Aktivitäten des menschlichen Lebens nahezu wie ein Gesunder ausüben, während der körperliche Zustand einem Tetraplegiker die selbständige Ausübung nahezu aller Funktionen verunmöglicht (Hier ist nicht der Fall eines mit hochentwickelten Geräten für Transport, Kommunikation und Körperpflege ausgestatteten Tetraplegikers angenommen, sondern die Situation bei Fehlen solcher Einrichtungen). Die Festlegungen dieser Disability Weights sind das Ergebnis der Beurteilung breit angelegter internationaler Panels mit medizinischen Fachpersonen.

(Zu beachten ist, dass die $DW_{\text{Niederland}} = 1 - DW_{\text{WHO}}$ betragen. Bei WHO ist demnach DW 0 gleich volle Gesundheit und DW 1 Tod, während in den niederländischen Tabellen DW 0 gleich Tod ist und DW 1 gleich volle Gesundheit. Nach erfolgter Umrechnung sind die Werte beider Quellen jedoch zusammenfassend).

5.2 Disability Weights DW für Schlaf-Störungen und Kommunikations-Störungen

Die bisher publizierten Tabellen beinhalten Disability Weights für viele Hunderte von Krankheitsbildern über den ganzen Bereich von den allerschwersten Behinderungen bis zu leichten Beeinträchtigungen des aktuellen Gesundheitszustandes wie z.B. Zahnfleischentzündung (Gingivitis). Ungeachtet der grossen Zahl der beurteilten Zustände menschlicher Gesundheit gibt es natürlich erhebliche Lücken, für die bisher keine DW verfügbar sind. Dies trifft auch zu für die in der vorliegenden Studie wichtigen Fälle der Schlaf-Störung und der Kommunikations-Störung. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieser Studie eine Untersuchung durchgeführt mit dem Ziel, DW für diese beiden Fälle zu ermitteln.

Das Verfahren zur Ermittlung der gesuchten DW bestand aus folgenden Schritten:

- Zuerst wurden die Zustände «Schlaf-Störung» und «Kommunikations-Störung» möglichst genau beschrieben, damit verschiedene Personen unter diesen Begriffen möglichst das Gleiche verstehen. Die Beschreibungen wurden eng angelehnt an den Sprachgebrauch in den strukturierten Interviews der Lärmstudie 90, um die Verknüpfbarkeit der Ergebnisse der Wirkungs-Analyse mit denen der Schaden-Analyse sicherzustellen.
- Dann wurde eine datenmässige Grundlage geschaffen, damit die $DW_{\text{Niederland}}$ (Disability Weights nach niederländischer Notierung) für die Zustände «Schlaf-Störung» und «Kommunikationsstörung» durch Interpolation in die Struktur der schon verfügbaren $DW_{\text{Niederland}}$ eingeordnet werden konnten. Zu diesem Zweck wurde aus den bestehenden $DW_{\text{Niederland}}$ -Tabellen eine Auswahl von gut bekannten Zuständen gesundheitlicher Beeinträchtigung getroffen und diese nach steigendem DW sortiert. Es wurde darauf geachtet, dass der ganze Bereich von DW 0 bis DW 1 abgedeckt ist, mit besonders feiner Abstufung im Teilbereich der Beeinträchtigungen von geringerer Schwere ($DW_{\text{Niederland}}$ 0.85 bis 0.99), innerhalb dessen die Positionierung von Schlafstörung und Kommunikationsstörung aufgrund einer Vorstudie vermutet wurde. Diese sortierte Tabelle verfügbarer DW eignet sich dazu, um die zunächst noch nicht mit DW versehenen Zustände «Schlafstörung» und «Kommunikationsstörung» aufgrund der Beurteilung der relativen Schwere in die angemessene Position der Rangreihenfolge der Gesundheitszustände einzuordnen. Aufgrund der Bestimmung der Rangreihenfolge ergeben sich dann Untergrenze und Obergrenze des gesuchten DW, worauf innerhalb dieses Raums der gesuchte Wert durch grobe Interpolation festgelegt werden kann.
- Diese vorstehende Rangreihenfolge-Bestimmung und Interpolation wurde durch Ärzte vorgenommen. Dies einerseits deshalb, weil auch die grundlegenden Ar-

beiten von MURRAY (MURRAY 1996) mit Ärzte-Panels durchgeführt wurden; damit wird eine methodische Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der bisher verfügbaren DW mit den neu zu ermittelnden DW erfüllt. Andererseits aber auch deshalb, weil medizinisch Ausgebildete und in der medizinischen Praxis Stehende am ehesten in der Lage sind, die Beschreibung verschiedener gesundheitlicher Zustände zu verstehen und diese bezüglich ihrer relativen Schwere zu vergleichen. Im Gegensatz dazu können die von einer Gesundheits-Beeinträchtigung persönlich Betroffenen zwar am besten beurteilen, wie schwerwiegend sie selbst diesen Zustand empfinden, aber es ist besonders schwierig für sie, diesen Zustand mit anderen, nicht selbst erlebten Zuständen «objektiv» zu vergleichen.

Eine erste Voruntersuchung zur Bestimmung der DW von «Schlafstörung» und «Kommunikationsstörung» war mit einem Klein-Panel von 2 Sozialmedizinern, 2 Ärzten mit Hausarzt-Praxis und 2 Spital-Ärzten in (MÜLLER-WENK 1999, S. 47–50) durchgeführt und beschrieben worden. Im Jahr 2000 wurde es nun möglich, das Verfahren zur Bestimmung der gesuchten DW in verbesserter Form durch schriftliche Befragung von 64 ärztlichen Mitarbeitern der SUVA, der staatlichen Schweizerischen Unfall-Versicherungs-Anstalt, durchzuführen. Diese Ärzte erschienen für eine repräsentative Festlegung von DW als besonders geeignet, weil sie bei ihrer laufenden beruflichen Arbeit in der SUVA in besonderem Masse damit zu tun haben, individuelle Fälle zu gewichten nach Massgabe der relativen Schwere der bleibenden Gesundheitsbeeinträchtigung, und zwar als Grundlage für die Zuerkennung von Genugtuungszahlungen. Eine durch Zufall ausgewählte Gruppe aus der Gesamtheit Schweizerischer Ärzte hätte auf diesem Gebiet weniger Erfahrung mitbringen können.

Die Information und Befragung der SUVA-Ärzte erfolgte aufgrund des Texts mit Fragebogen vom Anhang.

5.3 Resultate und Auswertung

Angeschrieben wurden 64 ärztliche Mitarbeiter der SUVA, davon 16 Ärzte der zentralen Abteilung Unfallmedizin, 15 Ärzte der zentralen Abteilung Arbeitsmedizin, und 33 in der ganzen Schweiz verteilt arbeitende Kreisärzte. Zurück kamen 42 ausgefüllte Fragebogen, von denen 41 auswertbar waren. Die von diesen 41 Panel-Teilnehmern vorgenommenen Kodierungen für die DW_{Niederland} sind in Box 13 vollständig dargestellt (Graphik in Box 17)

Befragung SUVA-Ärzte Oktober 2000 zur Ermittlung Disability Weights DW					
Lauf- Nummer	DW Schlaf- Störung	DW Komm.- Störung	1= Arzt mit eig. Praxis	1= Arzt im Alter>45 Jahre	1= Arzt selber lärmbeeinträchtigt
1	0.94	0.95		1	1
2	0.96	0.97		1	
3	0.95	0.97		1	
4	0.97	0.98	1	1	
5	0.98	0.97		1	1
6	0.97	0.97		1	
7	0.96	0.96		1	
8	0.97	0.98		1	
9	0.98	0.99		1	
10	0.94	0.96		1	
11	0.96	0.96		1	
12	0.93	0.95		1	
13	0.98	0.98		1	1
14	0.88	0.88		1	1
15	0.98	0.99		1	
16	0.96	0.97		1	1
17	0.96	0.96	1	1	1
18	0.96	0.98		1	
19	0.90	0.90		1	
20	0.80	0.92		1	1
21	0.97	0.98		1	
22	0.98	0.99		1	
23	0.69	0.98		1	
24	0.95	0.97		1	
25	0.95	0.97	1	1	
26	0.92	0.97		1	
27	0.95	0.96		1	
28	0.96	0.98	1	1	
29	0.92	0.95		1	
30	0.98	0.99		1	
31	0.97	0.98		1	
32	0.97	0.98			
33	0.97	0.98			
34	0.90	0.98	1		1
35	0.95	0.96			
36	0.96	0.98			
37	0.98	0.98			
38	0.95	0.98			
39	0.96	0.96			
40	0.96	0.96			
41	0.97	0.98		1	

Box 13:

Vorgenommene
Kodierungen der Panel-
Teilnehmer. Disability
Weights DW
ausgedrückt in der
niederländischen
Notierung DW_{Niederland}

Aus den Daten von Box 13 ergibt sich:

- Schlafstörung wird von praktisch allen Teilnehmern als schwerwiegender oder mindestens gleich schwerwiegend wie Kommunikationsstörung beurteilt.
- Obschon die Teilnehmer auf die Möglichkeit aufmerksam gemacht wurden, ein $DW_{\text{Niederland}}$ von 1.0 zu kodieren, falls sie der Meinung wären, Schlafstörung oder Kommunikationsstörung wäre gesundheitlich gleichermassen wenig schwer zu gewichten wie Gingivitis oder eine volle Gesundheit, hat niemand ein DW 1.0 eingesetzt. Alle teilnehmenden Ärzte sind demnach der Meinung, Schlafstörung und Kommunikationsstörung seien als Zustände zu betrachten, die nicht mehr einer vollen Gesundheit entsprechen.
- Man könnte vermuten, dass persönlich lärmbeeinträchtigte Ärzte die lärmbedingten Schlaf- und Kommunikationsstörungen schwerer gewichten und demzufolge tiefere DW einsetzen als Ärzte, die sich als persönlich von Strassenverkehrslärm nicht betroffen bezeichnen. Weiter könnte man auch vermuten, dass Ärzte mit eigener Praxis unter dem Eindruck der täglich erlebten schwereren Krankheitsfälle die lärmbedingten Schlaf- und Kommunikationsstörungen geringer gewichten und demzufolge höhere DW einsetzen als ihre Kollegen ohne eigene Arztpraxis. Die Zahlen bestätigen diese Vermutungen, doch ist der Effekt hier vernachlässigbar.

Die arithmetischen Mittelwerte der Disability Weights $DW_{\text{Niederland}}$ betragen für Schlafstörung 0.945 und für Kommunikationsstörung 0.967. Vergleicht man diese Werte mit dem niederländischen DW-Katalog (STOUTHARD 1997), so ergibt sich, dass nach Beurteilung der am Panel teilnehmenden Ärzte die Schwere der Gesundheitsbeeinträchtigung bei einem Lebensjahr mit Schlafstörung und bei einem Lebensjahr mit «chronic Hepatitis B infection without active viral replication» als etwa gleich hoch eingeschätzt wird. Andererseits bedeutet dieses $DW_{\text{Niederland}}$ von 0.945 für die ein Jahr andauernde Schlafstörung auch, dass das Ausmass der Gesundheitsbeeinträchtigung als äquivalent angenommen wird, wenn entweder etwa 19 Personen 1 Jahr lang mit Schlafstörungen belastet sind, oder wenn 1 Person infolge vorzeitigen Todes 1 Jahr ihrer Lebenserwartung verliert.

Die vorgenannten DW sind unterschiedlich zu den in einem Vor-Panel mit lediglich 6 Ärzten bestimmten Werten, die in (MÜLLER-WENK 1999) präsentiert wurden, indem Schlafstörung als eher schwerwiegender und Kommunikationsstörung als weniger schwerwiegend eingestuft wurde. Im grossen Ganzen bestätigen sie aber die damals zutage getretene Einschätzung der Schwere von Schlaf- und Kommunikationsstörung. Für den Vergleich ist zu beachten, dass die Disability Weights in (MÜLLER-WENK 1999) als DW_{WHO} ausgedrückt wurden, während sie in diesem Text bisher als $DW_{\text{Niederland}}$ ausgedrückt wurden, wobei

$DW_{\text{WHO}} = 1 - DW_{\text{Niederland}}$. An dieser Stelle entscheiden wir uns nun für den Übergang zur Darstellung DW_{WHO} , um die Kontinuität zur vorausgegangenen Studie zu wahren, und weil es adäquater erscheint, wenn ein grösserer Gesundheitsschaden auch mit einem grösseren DW ausgedrückt wird. Demnach gelten als Ergebnis der Beurteilung durch das SUVA-Ärztepanel nun die nachstehenden Zahlen:

Box 14: Disability Weights DW in der Notierung DW_{WHO}.

Disability Weight für Kommunikations-Störung in DW _{WHO}	0.033
Disability Weight für Schlaf-Störung in DW _{WHO}	0.055

Es sei hier noch einmal verdeutlicht, dass ein DW_{WHO} für Schlaf-Störung von 0.055 zum Ausdruck bringt, ein mit Schlaf-Störung gelebtes Menschenjahr komme einem Schaden von 0.055 DALY gleich, was in Relation gesetzt werden kann zu einem infolge vorzeitigem Tod verlorenen Lebensjahr mit einem Schadenswert von DW_{WHO} von 1.0.

5.4 DALY-Werte pro 1000 Fahrzeug-Kilometer im Schweizer Strassennetz

Wenn wir nun davon ausgehen, dass Strassenverkehrslärm NACHTS (22.00–06.00 Uhr) zu Schlaf-Störungen führen kann, während Strassenverkehrslärm TAGS (06.00–22.00 Uhr) zu Kommunikations-Störungen führen kann, ist es aufgrund von Box 11 sowie der vorstehend ermittelten Disability Weights DW möglich, den Schaden an menschlicher Gesundheit als Folge einer Fahrt von 1000 Fahrzeug-Kilometern, verteilt auf das Schweizerische Strassennetz, zu ermitteln, und zwar in der Messgrösse DALY (Disability Adjusted Life-Years). Dies geschieht durch Ausmultiplizierung der beiden untersten Zeilen von Box 11 mit den DW von Box 14, mit nachstehendem Ergebnis:

Box 15: Gesundheits-Schaden in DALY (Disability Adjusted Life-Years) pro 1000 Fahrzeug-Kilometer gefahren auf Schweizer Strassennetz, basierend auf Verkehrsmengen 1995.

	DALY pro 1000 km Fahrzeug-Kateg. 1 (PW etc) TAGS	DALY pro 1000 km Fahrzeug-Kateg. 2 (LKW etc) TAGS	DALY pro 1000 km Fahrzeug-Kateg. 1 (PW etc) NACHTS	DALY pro 1000 km Fahrzeug-Kateg. 2 (LKW etc) NACHTS
Kommunikationsstörung	0.00013	0.0013		
Schlaf-Störung			0.0027	0.026

Im Vergleich zu den Ergebnissen von (MÜLLER-WENK 1999, S. 50, Tab. 8–4) sind die Werte von Box 15 deutlich kleiner. Dies ist vor allem auf die geänderte Ermittlung der mittleren Erhöhung des Schallpegels (Box 5) und die geänderten DW (Box 14) zurückzuführen. Die neuen Werte dürfen als besser abgestützt gelten.

Interessant ist es nun, die Werte für verkehrslärmbedingte Schlaf- und Kommunikations-Störung von Box 15 zu vergleichen zu den entsprechenden Werten für verkehrslärmbedingte Herzinfarkt-Fälle. Die nachstehend tabellierten Rechenergebnisse gehen aus von zusätzlichen Herzinfarkt-Todesfällen gemäss Box 12, unterste

Zeile, und sie berücksichtigen die anschliessend an Box 12 gemachten zusätzlichen statistischen Daten. Weiter ist zu beachten, dass das Disability Weight DW_{WHO} von Herzinfarkt (acute myocardial infarction, treated form) mit 0.395 angegeben wird (MURRAY 1996, S. 415); dieses DW gilt definitionsgemäss für eine rechnerische Krankheitsdauer von 1 Jahr. Wir gehen indessen davon aus, dass bei nichttödlichem Verlauf die Herzinfarktpatienten nach durchschnittlich 11 Tagen Spital und 30 Tagen Rehabilitation wieder gesund sind, was bedeutet, dass das DW von 0.395 mit dem Zeitfaktor $41/365$ reduziert werden muss auf einen per-annum-Wert $DW_{WHO} = 0.044$. Daraus ergeben sich folgende Schäden an menschlicher Gesundheit pro 1000 Fahrzeug-Kilometer:

Box 16: Gesundheits-Schäden wegen strassenlärmbedingtem Herzinfarkt in DALY (Disability Adjusted Life-Years) pro 1000 Fahrzeug-Kilometer gefahren auf Schweizer Strassennetz, basierend auf Verkehrsmengen 1995.

	Fahrzeug-Kateg. 1 (PW etc) TAGS	Fahrzeug-Kateg. 2 (LKW etc) TAGS	Fahrzeug-Kateg. 1 (PW etc) NACHTS	Fahrzeug-Kateg. 2 (LKW etc) NACHTS
Zusätzliche Herzinfarkt-Todesfälle pro 1000 Fz-km (aus Box 12)	0.000001	0.000010	0.000017	0.000168
Zusätzliche Herzinfarkt-Spitaleinweisungen mit nichttödlichem Ausgang pro 1000 Fz-km (Zeile 1 mal Faktor $F=1.12$)	0.000001	0.000011	0.000019	0.000188
Gesundheitsschaden in DALY/ 1000 Fz-km aus Herzinfarkt-Todesfällen (Zeile 1 mal 10 verlorene Lebensjahre pro Fall)	0.000010	0.000100	0.000170	0.001680
Gesundheitsschaden in DALY/1000 Fz-km aus nichttödlichen Herzinfarkt fällen (Zeile 2 mal $DW=0.044$)	0.000000	0.000000	0.000001	0.000007
Gesundheitsschaden in DALY/1000 Fz-km aus allen Herzinfarktfällen (Summe Zeilen 3 + 4)	0.000010	0.000100	0.000171	0.001687

Aus den Zahlen von Box 16 und Box 15 ergibt sich

- Die Gesundheitsschäden wegen strassenlärmbedingten Herzinfarkt-Krankheitsfällen sind klein im Vergleich zu den strassenlärmbedingten Herzinfarkt-Todesfällen
- Die Gesundheitsschäden aus *allen* strassenlärmbedingten Herzinfarkt-Fällen sind um eine Grössenordnung kleiner als die Gesundheitsschäden wegen strassenlärmbedingten Schlaf- oder Kommunikations-Störungen. Es ist demnach vertretbar, die Gesundheitsschäden wegen lärmbedingtem Herzinfarkt bei der Gesamtbeurteilung einstweilen zu vernachlässigen, umso mehr, als der Zusammenhang zwischen Lärmursache und Schadenwirkung am Herz noch nicht in wünschenswertem Mass gesichert ist.

Diese Vergleichsbetrachtung zeigt den Nutzen, der dem DALY-Konzept mit seiner solide abgestützten Gewichtung von verlorenen Lebensjahren relativ zu krankheits-behafteten Lebensjahren zukommt.

An dieser Stelle sei für die Anwendungspraxis wiederholt, dass die Fahrzeugkategorie 1 gemäss (BUWAL 1991) neben den Personenwagen auch die Lieferwagen und leichten Motorräder umfasst, die Kategorie 2 neben den Lastwagen auch die Busse, Traktoren und schweren Motorräder. Bei der Ermittlung der lärmbedingten Gesundheitsschäden aus einer Fahrt von 1000 Fahrzeug-Kilometer besteht die Annahme, dass das entsprechende Fahrzeug bezüglich Lärmentwicklung im Mittelfeld der im Verkehr stehenden Flotte seiner Fahrzeugkategorie liege. Falls dieses Fahrzeug hingegen extrem laut oder extrem leise wäre für seine Fahrzeugkategorie, wäre eine Interpolation vorzunehmen unter Berücksichtigung der vorliegenden Schadhöhen für Kategorie 1 und Kategorie 2. Zu beachten ist allerdings, dass die Typenprüfungswerte für Lärm eines Fahrzeugs nur beschränkte Aussagen über das Lärmverhalten in der Praxis erlauben, weil bei der Typenprüfung nicht die Lärmentwicklung in realen Fahrzyklen geprüft wird und der Einfluss der effektiv eingesetzten Fahrzeugreifen nicht berücksichtigt ist. Vorläufig ist daher Zurückhaltung geboten bei Verwendung von tieferen Werten für Gesundheitsschäden bei «lärmarmen» Fahrzeugtypen.

5.5 Betrachtungen zur Unsicherheit

Der in dieser Arbeit dargestellte Wirkungszusammenhang zwischen zusätzlichen Fahrzeug-Kilometern auf dem Schweizerischen Strassennetz und daraus resultierenden zusätzlichen Gesundheitsschäden wegen Strassenlärm enthält Elemente der Unsicherheit in jedem der 4 Module (Ausbreitungs-Analyse, Expositions-Analyse, Wirkungs-Analyse und Schaden-Analyse). Die Frage ist daher, wie stark der «wahre» Wert des Gesundheitsschadens/1000 Fahrzeug-Kilometer um den angenommenen Mittelwert gemäss Box 15 (für Schlaf- und Kommunikations-Störung) oder gemäss Box 16 (für Herzinfarkt) streut. Wir konzentrieren uns hier auf den Fall der Schlaf- und Kommunikationsstörungen, also die Zahlen von Box 15.

Aus den vorstehenden Abschnitten ergibt sich, dass der lärmbedingte Gesundheitsschaden (Schlaf- und Kommunikations-Störung) pro 1000 Fahrzeug-Kilometer bei nicht festliegender Fahrroute auf dem Schweizer Strassennetz abweichen könnte von den als wahrscheinlichste Werte zu interpretierenden Zahlen von Box 15, und zwar hauptsächlich aufgrund der folgenden Punkte:

- Das Ergebnis der *Ausbreitungsanalyse* in Box 5 (dies sei hier wiederholt) will nicht den wirklichen vom zusätzlichen Transport ausgelösten Lärm wiedergeben, sondern den rechnerischen Beitrag dieses Transportvorganges zur Entwicklung der Transportmengen und der daraus resultierenden Entwicklung der jahres-gemittelten Schallpegel auf dem ganzen Strassennetz. *Nicht* eine Abweichung im Sinne der Unsicherheitsüberlegungen ist es daher, wenn der vom zusätzlichen Transport ausgelöste tatsächliche, physisch messbare Zusatzlärm pro jedem Punkt des Strassennetzes völlig anders verteilt ist als DeltaLeq, welches

die Schallpegelerhöhung für das *ganze* Strassennetz während eines *ganzen* Jahrs repräsentiert. Für die Unsicherheitsbetrachtung wesentliche Abweichungen zu den in Box 5 gegebenen Zahlen sind demgegenüber vor allem zu erwarten, wenn die Verkehrsentwicklung auf den einzelnen Abschnitten des Strassennetzes nicht proportional zur Verkehrsverteilung des Referenzjahrs 1995 verläuft, oder die Fahrgeschwindigkeiten v und die Steigungen i im Strassennetzwerk erheblich von den Annahmen abweichen. Man kann nun anhand des Rechenmodells von Box 4 prüfen, was für Änderungen der DeltaLeq eintreten, wenn man die entsprechenden Inputgrössen variiert: Wenn man den Verkehrsanteil der Autobahnen zulasten der anderen Strassentypen um bis zu 10% anhebt oder die Geschwindigkeiten entweder absenkt (überall 60 km/h) oder erhöht (Autobahn 120 km/h, ausserorts 80 km/h), oder die Steigungen bis zu 5% anhebt, so verändern sich die resultierenden DeltaLeq pro 1000 Fahrzeug-Kilometer im Bereich von etwa $\pm 10\%$, also in engen Schranken. Wir nehmen daher an, dass das Konfidenz-Intervall (95%) für die in Box 5 angegebenen DeltaLeq zwischen 0.9 mal und 1.1 mal die angegebenen DeltaLeq-Werte liegt.

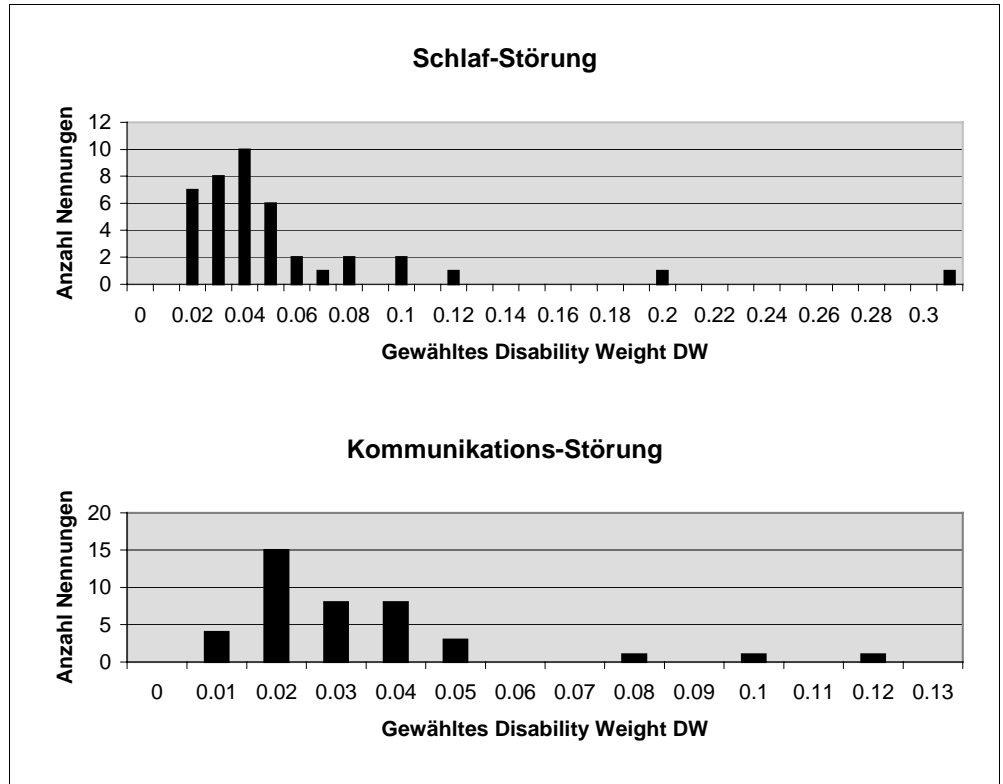
- Das Ergebnis der *Expositionsanalyse* von Box 6 ist mit zwei Arten von Unsicherheit behaftet: Einerseits mit der Unsicherheit im LUK-Modell des Kantons Zürich, und andererseits mit der Unsicherheit als Folge der hier vorgenommenen Hochrechnung auf die ganze Schweizer Wohnbevölkerung, ausgehend von einer Basis von 10.5% dieser Wohnbevölkerung. Zu beachten ist allerdings, dass wegen der als linear angenommenen Dosis-Wirkungsbeziehungen hier lediglich die Frage von Belang ist, wie unsicher die Schätzung der Personenzahl ist, die TAGS oberhalb 54.9 dB und NACHTS oberhalb 45.9 dB belastet ist (vgl. Box 6). Ein Blick auf Box 6 zeigt, dass diese Schranken leider gerade im Bereich des Maximums der Verteilungskurven liegen. Das bedeutet, dass die betroffene Personenzahl um etwa 10% steigt oder sinkt, wenn eine «Dezibel-Säule» zusätzlich einbezogen wird oder weggelassen wird für die Ermittlung der betroffenen Personenzahlen von Box 11. Ohne genauere Einzelheiten sind wir der Meinung, dass das Konfidenzintervall (95%) für die betroffenen Personenzahlen im Bereich von 0.8 mal bis 1.2 mal die Zahlen von Box 11 liegen dürfte. Dieses Konfidenzintervall liegt etwa vernünftig, wenn man es vergleicht mit den Unterschieden der BUWAL-Daten und den LUK-Daten für die Verteilung der Bevölkerung auf Strassenlärmpegel, wie sie aus (MÜLLER-WENK 1999, S.41 Tab. 7–4) zu ersehen sind.
- Die *Wirkungsanalyse* ist naturgemäss mit einer vergleichsweise grossen Unsicherheit behaftet: Die Frage, ob jemand in einem Haus bei einem bestimmten Mittelungspegel LAeq an der Aussenseite der Hauswand «wenigstens einmal wöchentlich» und insgesamt «stark» beim Schlafen gestört werde, lässt viel Spielraum für die Antwort offen. Die Ergebnisse der Meta-Analyse von MIEDEMA in Box 10 geben einen Eindruck von der Spannweite möglicher Antworten, die allerdings zum Teil bedingt sein kann durch unterschiedliche Messverfahren, Bauqualität und Lebensverhältnisse in den verschiedenen Ländern. Obschon man die aus der Lärmstudie 90 resultierende Dosis-Wirkungs-Charakteristik nicht ohne weiteres in das Bild von Box 10 hineinzeichnen darf, erscheint die Aussage doch erlaubt, dass im praktisch wichtigen Bereich Ldn

55–70 dB gegenüber der Charakteristik von Box 9 auch Kennlinien noch ins Bild hineinpassen würden, welche den Anteil der «highly annoyed» um etwa 50% höher oder tiefer ansetzen würden. Wir nehmen aufgrund dieser Betrachtung an, dass das Konfidenzintervall (95%) für das Ansteigen der Anzahl Fälle von Gesundheitsstörung pro 100 Betroffene, bezogen auf die Erhöhung des Schallpegels um 1 Micro-dB, im Bereich von 0.6 mal bis 1.5 mal die Werte von Box 11 liegen dürfte.

- Die Schätzungen für die Disability Weights durch das Panel der Ärzte im Rahmen des Schrittes der *Schaden-Analyse* sind in der Notierungsweise DW_{WHO} in graphischer Form noch einmal dargestellt in nachstehender Box 17. Damit ist optisch leicht ersichtlich, wie stark die 41 Festlegungen der einzelnen Panelteilnehmer um die arithmetischen Mittelwerte von 0.055 für Schlaf-Störung und 0.033 für Kommunikations-Störung streuen. Hier ist es nun möglich, das 95%-Konfidenzintervall für die Mittelwerte statistisch zu bestimmen, wenn man annimmt, die Nennungen der 41 Aerzte seien eine Zufallsstichprobe aus einer grösseren Grundgesamtheit von beurteilenden Personen. Hätte man aus dieser Grundgesamtheit von beurteilenden Personen andere Stichproblem im Umfang von 41 Leuten herausgegriffen, so hätten sich andere Mittelwerte als 0.055 und 0.033 ergeben, und die Gesamtheit dieser Mittelwerte wäre angenähert normalverteilt. Unter diesen Umständen kann statistisch errechnet werden (siehe BLEYMÜLLER 2000, S.87), dass die «wahren» arithmetischen Mittelwerte der unbekanntes Grundgesamtheit mit 95% Wahrscheinlichkeit wie folgt liegen: Für Schlafstörung im Bereich von 0.71 bis 1.29 mal dem Stichprobenmittelwert von 0.055, und für Kommunikationsstörung im Bereich von 0.79 bis 1.21 mal dem Stichprobenmittelwert von 0.033. Dass die Streuung bei Schlaf-Störung etwas grösser ist, kann man auch aus der Graphik von Box 17 erkennen.

Box 17:

Histogramme der Disability Weights für Schlaf- und Kommunikations-Störung, wie sie durch die 41 Aerzte des Panels festgelegt wurden. Die DW entsprechen den Werten von Box 13, sind aber hier in Notation DW_{WHO} aufgeführt



Zusammenfassend kann man nun sagen, dass das Vertrauensintervall für die in Box 15 gegebenen Lärmschäden des Strassenverkehrs in DALY pro 1000 Fahrzeug-Kilometer durch die vier folgenden Vertrauensintervalle bestimmt wird:

- **Ausbreitungsanalyse:** 0.9 bis 1.1 mal die angegebenen DeltaLeq-Werte von Box 5
- **Expositionsanalyse:** 0.8 bis 1.2 mal die angegebenen Zahlen betroffener Personen in Box 11
- **Wirkungsanalyse:** 0.6 bis 1.5 mal die angegebenen Prozentsätze von Personen in Box 11, bei denen mit steigendem Schallpegel der gesundheitsrelevante Effekt eintritt
- **Schadenanalyse:** bei Kommunikations-Störung 0.79 bis 1.21 mal der angegebene Wert DW_{WHO} ; bei Schlaf-Störung 0.71 bis 1.29 mal der angegebene Wert DW_{WHO} in Box 14.

Auf eine eigentliche Berechnung des Vertrauensintervalls für die DALY-Werte pro 1000 Fahrzeug-Kilometer von Box 15 wird hier verzichtet, da über die Verteilungsfunktionen bei den ersten drei Modulen zu wenig bekannt ist. Diese Verteilungsfunktionen müsste man jedoch einigermaßen kennen, wenn man Monte-Carlo-Simulationen für die Verkettung der Unsicherheiten der 4 Module durchführen will.

Angemessener erscheint es, eine grobe Schätzung für das 95%-Vertrauensintervall der DALY-Werte/1000 Fahrzeug-Kilometer in Box 15 zu geben. Man kann hierzu

die Aussage machen, dass die Faktoren für die Ermittlung der Untergrenze und der Obergrenze aus den Werten von Box 15

- einerseits etwas stärker gespreizt sind als die Faktoren des Moduls mit der grössten Unsicherheit (Wirkungsanalyse mit Faktoren 0.6 und 1.5)
- andererseits aber bei weitem nicht so stark gespreizt sind wie das Produkt aus den Faktoren der 4 Module je für die Untergrenze und die Obergrenze (0.34 und 2.4 für Kommunikations-Störung, 0.31 und 2.5 für die Schlaf-Störung)

Daraus folgern wir, dass die «wahren» Werte für die Gesundheitsschäden in Box 15 im Bereich von der Hälfte der angegebenen DALY/1000 Fahrzeug-Kilometer bis zu deren Doppeltem liegen dürften.

6 Schlussbemerkungen

In diesem Abschnitt sollen noch drei Fragen angesprochen werden:

- Wie bedeutend ist die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch Strassenverkehrslärm, im Vergleich zu anderen Beeinträchtigungen?
- Könnte man die entwickelte Methodik auch für die Behandlung von anderem Verkehrslärm, insbesondere Eisenbahnlärm und Fluglärm, anpassen?
- Eignet sich die Methodik auch für die Behandlung von Strassenverkehrslärm ausserhalb der Schweiz?

6.1 Die Bedeutung der Gesundheitsbeeinträchtigung durch Strassenverkehrslärm

Nachdem nun gezeigt worden ist, wie man die von einem Strassentransport verursachte lärmbedingte Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit in einer Ursache-Wirkungs-Kette abbilden und quantitativ berechnen kann, stellt sich sofort die Frage, wie gross die Bedeutung dieser Gesundheitsbeeinträchtigungen ist, im Vergleich zu anderen Gesundheitsbeeinträchtigungen, die durch andere Quellen und andere Wirkungswege verursacht sind.

Ein solcher Vergleich zwischen Gesundheitsbeeinträchtigung aus Strassenlärm und Gesundheitsbeeinträchtigung durch Abgase eines LKW-Dieselmotors wurde in (MÜLLER-WENK 1999, S.52–54) durchgeführt. Dort wurde ermittelt, dass die stofflichen Emissionen (CO, NO_x, HC, PM₁₀) des Dieselmotors eines schweren LKW eine Gesundheitsbeeinträchtigung von $1.14 \cdot 10^{-3}$ DALY pro 1000 Fahrzeug-Kilometer bewirken. Im Vergleich dazu ist bei LKW die Gesundheitsbeeinträchtigung durch Lärm, gemäss Box 15, bei Fahrten am Tag $1.3 \cdot 10^{-3}$ DALY pro 1000 Fahrzeug-Kilometer, und bei Fahrten in der Nacht $26 \cdot 10^{-3}$ DALY pro 1000 Fahrzeug-Kilometer. Es ergibt sich, dass die lärmbedingten Gesundheitsschäden bei LKW tagsüber in der gleichen Grössenordnung liegen wie die Gesundheitsschäden aus Stoffemissionen ihres Dieselmotors, während die Lärmschäden nachts überwiegen. Nachdem die bedeutenden gesundheitlichen Folgen der Abgase und Partikelemissionen des Strassenverkehrs heute anerkannt sind, müsste das vorstehende Ergebnis dazu beitragen, auch der Vermeidung von lärmbedingten Gesundheitsschäden einen entsprechenden Stellenwert in der öffentlichen Diskussion zu verschaffen.

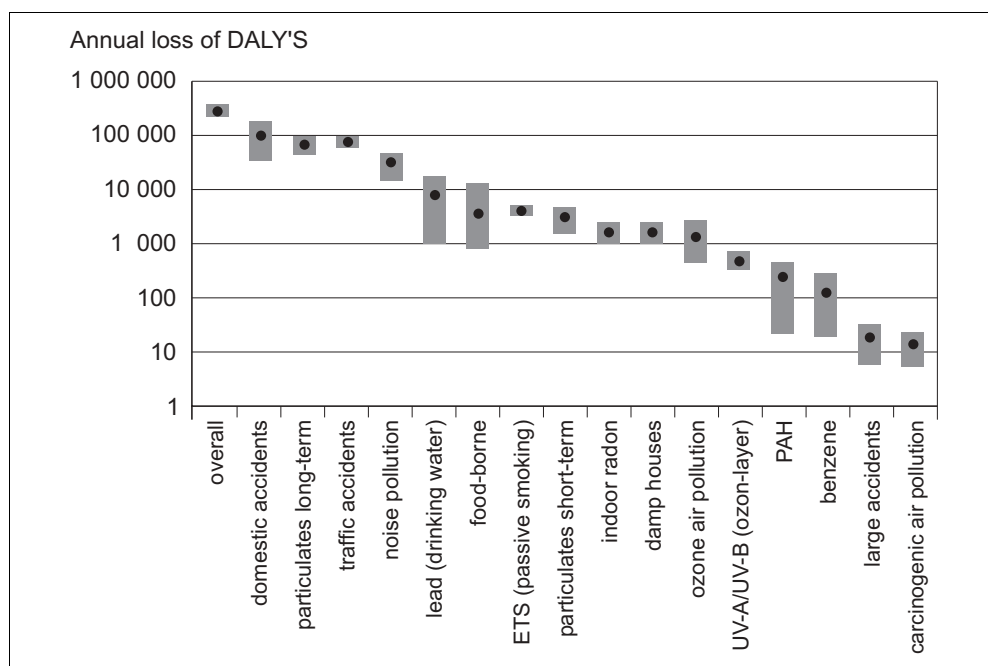
Dieses Ergebnis passt durchaus in das Bild, das in zwei anderen Studien entworfen wurde, im Rahmen derer ähnliche Vergleiche ausgeführt wurden. In beiden Fällen stösst allerdings die Vergleichbarkeit an Grenzen.

Im Rahmen des «Fourth Dutch National Environmental Outlook» wurde eine Studie durchgeführt zum Zwecke der umfassenden quantitativen Ermittlung der Gesundheitsbeeinträchtigung der niederländischen Bevölkerung durch umweltliche Belastungen (DE HOLLANDER 1999). Dabei wurden die gesundheitlichen Beeinträchtigungen in Form von verlorenen Lebensjahren (Todesfälle) und Krankheitsjahren (Krankheit) pro Art der Gesundheitsbeeinträchtigung in Form von DALY-Einheiten tabelliert und nach Belastungsquelle gruppiert. Die Lärmbelastung aus allen Emissionsquellen (nicht nur Strassenverkehrslärm) wurde zusammengefasst,

und als lärmbedingte Effekte wurden die Gesundheitsbeeinträchtigungen Severe annoyance, Sleep disturbance, IHD Hospital admissions, IHD Mortality einbezogen (IHD = Ischemic Heart Disease). Das Ergebnis ist in Box 18 zusammenfassend veranschaulicht. Das Bild zeigt, dass der Lärm (auch in den Niederlanden überwiegend aus Strassenverkehrslärm bestehend) im Rahmen der eigentlichen Umweltbelastungen eine gewichtige Stellung einnimmt und bezüglich quantitativem Umfang des Schadens nahe an die Strassenverkehrsunfälle herankommt.

Box 18:

Jährliche Gesundheitsbeeinträchtigung in Disability Adjusted Life Years DALY für die niederländische Bevölkerung als Folge ausgewählter Umweltbelastungen. Dargestellt sind die Erwartungswerte sowie die 5 und 95 Perzentile des Wahrscheinlichkeits-Intervalls. (DE HOLLANDER 1999)



Interessant sind auch die Berechnungen von ISING (ISING 2000). Hier sind nur Todesfälle erfasst worden, jedoch nicht verlorene Lebensjahre oder Krankheiten ohne Todesfolge, und zwar bezogen auf die Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland. Als Ergebnis resultieren (ISING 2000, Tabelle 4) folgende Todesfall-Zahlen pro Jahr:

- Herzinfarkt-Todesfälle wegen Strassenverkehrslärm 1800
- Alle Todesfälle wegen Feinstaub (PM10) 61400
- Lungenkrebstod wegen Passivrauchen 500
- Todesfälle Ischämische Herzkrankheiten wegen Passivrauchen 9500

Berücksichtigt man hierzu unsere weiter oben (Box 16) gewonnene Erkenntnis, dass die strassenlärm-bedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen «Schlaf-Störung» und «Kommunikations-Störung», in DALY ausgedrückt, mindestens um eine Größenordnung höher sind als die Gesundheitsbeeinträchtigung «Herzinfarkt-Todesfälle», so ergibt sich, dass die strassenlärmbedingten Schäden in ihrem Umfang für das Gebiet der BRD in der gleichen Größenordnung liegen wie die Feinstaub-Todesfälle und die Todesfälle infolge Passivrauchen, d.h. infolge unfreiwilligen Einatmens von Tabakrauch anderer Personen.

6.2 Andere Lärmquellen: Bahnlärm und Fluglärm

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Folgen von Strassenverkehrslärm auf die menschliche Gesundheit, während Bahnlärm und Fluglärm wegen ihrer gegenüber Strassenverkehrslärm etwas geringeren Bedeutung zunächst einmal unberücksichtigt blieben. Dank dem modularen Aufbau des Verfahrens ist es jedoch möglich, dieses an die Behandlung von Bahn- und Fluglärm anzupassen, indem einzelne Analyse-Module angepasst und andere unverändert übernommen werden.

Die Eisenbahn als Lärmquelle zeichnet sich gegenüber der Strasse dadurch aus, dass das Verkehrsnetz, vor allem für den Güterverkehr, wesentlich weniger feinmaschig ist als dasjenige der Strassen. Weiter wird auch die Wirkung einer bestimmten Schallpegelhöhe auf den Menschen bei Bahnlärm als geringer eingeschätzt im Vergleich zu Strassenlärm, weshalb für jenen in Art. 35 der schweizerischen Lärmschutz-Verordnung vom 12.12.1986 ein Bonus von 5 dB gegenüber dem Strassenlärm gewährt wird.

Angesichts der relativen Grobmaschigkeit des Bahnnetzes steht für die Ausbreitungsanalyse der Fall der *bekannt*en Transportroute stärker im Vordergrund gegenüber dem Fall der *unbekannt*en Transportroute. Für die Ermittlung der DeltaLeq stehen bei Bahnverkehr analoge Gleichungen zu denjenigen von Box 1 zur Verfügung. Im Zusammenhang mit der Sanierungspflicht für Gebäude mit Lärmbelastungen oberhalb des gesetzlichen Grenzwerts bestehen im Falle der Schweizerischen Bundesbahnen Lärmbelastungskataster, welche die LAeq-Werte für die Gebäude beidseits der Bahnstrecken angeben, woraus sich für die Expositionsanalyse die Anzahl der betroffenen Personen ermitteln lässt. Die Wirkungsanalyse für Bahnlärm kann wohl mit ausreichender Genauigkeit aus der in dieser Studie ermittelten Dosis-Wirkungs-Charakteristik für Strassenverkehrslärm abgeleitet werden, wenn man entweder den vorgenannten Korrekturfaktor gemäss Art. 35 Lärmschutzverordnung einsetzt oder die Unterschiedlichkeit der Dosis-Wirkungs-Kennlinien der Meta-Analyse von MIEDEMA berücksichtigt. Für die Ermittlung der Disability Weights der Schadenanalyse ergibt sich kein Unterschied zwischen Strassen- und Bahnlärm. Ein Vorschlag zur Anpassung des vorliegenden Modells der Ermittlung von Gesundheitsschäden aus Strassenverkehrslärm an den Bahnverkehrs-Fall wurde im Rahmen einer Semesterarbeit an der ETHZ vorgenommen (PFISTER 2001).

Im Falle des Fluglärms stehen nicht die Schallpegel entlang den Streckenelementen des internationalen Flugverkehrsnetzes im Vordergrund, sondern die Schallpegel auf den Umgebungsflächen der Flughäfen. Es stehen Rechenmodelle zur Verfügung, um die Erhöhung dieser Pegel DeltaLeq durch zusätzliche Starts und Landungen zu ermitteln. Im Gegensatz zu Strassen- und Bahnlärm lassen sich die DeltaLeq aber nicht pro 1000 Fahrzeug-Kilometer ausdrücken, sondern lediglich pro Anzahl Flugzeugbewegungen des Flughafens, da die zurückgelegte Transportstrecke zwischen Start und Landung für die Lärmwirkungen keine Rolle spielt. Für die Expositionsanalyse stehen im Fall der Schweizerischen Landesflughäfen Lärmbelastungskataster zur Verfügung, aus denen die Zahl der betroffenen Gebäude und da-

mit der betroffenen Bewohner ermittelt werden kann. Information für eine Dosis-Wirkungs-Charakteristik des Luftverkehrslärms könnte aus der Datenbasis der Schweizer Lärmstudie 90 gewonnen werden. Die Disability Weights der Schadenanalyse können wiederum aus dem Fall des Strassenverkehrslärms übernommen werden.

Für die Verhältnisse der Schweiz stehen also einer Ausweitung des hier vorliegenden Verfahrens für die Ermittlung von Gesundheitsschäden aus Strassenverkehrslärm auf Bahnlärm und Fluglärm keine grundsätzlichen Schwierigkeiten entgegen.

6.3 Übertragung der Ergebnisse auf die Behandlung von Strassenverkehr ausserhalb der Schweiz

Die in dieser Studie dargestellte Methode für die quantitative Ermittlung des Schadens an menschlicher Gesundheit in der Schweiz als Folge zusätzlicher Strassenverkehrsaktivität in Form von Fahrzeug-Kilometern ist übertragbar auf die Verhältnisse anderer Länder. Allerdings kann die teilweise reduzierte Verfügbarkeit von Daten die Durchführung der Ausbreitungs-, Expositions- und Wirkungs-Analyse erschweren oder praktisch verunmöglichen.

Die Ergebnisse in DALY pro 1000 Fahrzeug-Kilometer dürften in den verschiedenen Europäischen Ländern vor allem deshalb unterschiedlich ausfallen, weil die Belastung des nationalen Strassennetzes mit PW- und LKW-Kilometern pro Netzlänge und Jahr unterschiedlich ist, und weil die räumliche Anordnung und der bauliche Schutz der Bevölkerung entlang den Abschnitten des Strassennetzes unterschiedlich sind. Demgegenüber dürften die Ergebnisse der Wirkungs- und Schaden-Analyse von Land zu Land wenig unterschiedlich sein.

In (MÜLLER-WENK 1999, Abschnitt 10) wurde ein sehr summarisches Verfahren vorgeschlagen, um aufgrund allgemein verfügbarer Daten über jährliche Gesamtverkehrsleistungen, über Strassennetzlängen und über die Aufteilung der Bevölkerung auf strassenverkehrsbedingte Schallpegelklassen LAeq die europäischen Länder in die 3 Gruppen «low noise» (Finnland, Schweden, Dänemark), «high noise» (Spanien, Slowakei) und «medium noise» (übrige) einzuteilen. Dabei wurde als vorläufige Lösung vorgeschlagen, für die Gruppe medium noise die schweizerischen Werte DALY/ 1000 Fahrzeug-Kilometer anzuwenden, während für die Gruppe low noise diese Werte zu halbieren und für die Gruppe high noise zu vervierfachen wären.

Ohne Zweifel ist es möglich, dieses sehr grobe Verfahren zu verbessern, wenn man die laufend besser werdende Datenlage im Bereich von Strassenverkehr und Strassenverkehrslärm in den einzelnen Ländern zur länderweisen Durchführung der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Methodik einsetzt.

7 Literatur

- ASTRA, Bundesamt für Strassen 1998: Automatische Strassenverkehrszählung 1997, Bern 1998
- BfS, Bundesamt für Statistik 2001: Schriftliche Mitteilung von Erwin Wüest an R. Müller-Wenk vom 17.10.2001 über statistische Zahlen zu Acute myocardial infarction ICD I21
- BfS, Bundesamt für Statistik: Schweizerische Strassenverkehrszählung 1995: Statistik der Schweiz Band 11 Verkehrs- und Nachrichtenwesen, Kartenbeilage «Durchschnittlicher Tagesverkehr der Motorfahrzeuge, Bern 1996
- BLEYMÜLLER, J. et al. 2000: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, 12. Auflage, München 2000
- BUWAL 1991: Strassenlärmmodell für überbaute Gebiete, SRU Nr. 15, 3. Auflage, Bern 1991
- BUWAL 1995: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950–2010, SRU Nr 255, Bern 1995
- BUWAL 1997: Umweltbericht 1997, Bern 1997
- BUWAL 2002: Lärmbekämpfung in der Schweiz, SRU Nr 329, Bern 2002
- DE HOLLANDER, A.E.M. et al. 1999: An Aggregate Public Health Indicator to Represent the Impact of Multiple Environmental Exposures, *Epidemiology* 1999;10:606–617
- ECOPLAN 2000: Externe Lärmkosten des Verkehrs: Hedonic Pricing Analyse, Entwurf Schlussbericht Mai 2000, Bern 2000
- EUROSTAT 1995: Europe's Environment, Statistical Compendium, Luxemburg 1995.
- GOEDKOOPT, M.; SPRIENSMA, R. 1999: The Eco-Indicator 99, Methodology Report, auf: <http://www.pre.nl/eco-indicator99/ei99-reports.html>
- GVF; SOMMER, H. et al. 1998: Externe Lärmkosten des Verkehrs, Schlussbericht Vorstudie I im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen GVF des Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie u. Kommunikation, 1998
- HOFSTETTER, P. 1998: Perspectives in Life Cycle Impact Assessment, Boston 1998
- ISING, H. 2000: Das Herzinfarkttrisiko aufgrund von Verkehrslärm im Vergleich zu Krankheitsrisiken durch Luftverschmutzung, Referattext 9. Konferenz Verkehrslärm 29.9.-1.10.2000 in Dresden.
- JB, Stat. Jahrbuch des Kantons Zürich 2001, Zürich 2000
- MIEDEMA, H.M.E., VOS, H. 1998: Exposure-response relationships for transportation noise, *J. Acoust.Soc.Am* 104 (6), December 1998, p. 3432–3445)
- MÜLLER-WENK, R. 1999: Life-Cycle Impact Assessment of Road Transport Noise, IWOE-Diskussionsbeitrag Nr. 77, 1999, auf: <http://www.iwoe.unisg.ch>
- MURRAY, Chr. et al. 1996: The Global Burden of Disease, WHO 1996
- OLIVA, C. 1998: Belastungen der Bevölkerung durch Flug- und Strassenlärm, Berlin 1998.
- PFISTER, S. et al. 2001: Lärm in Gütertransport-Ökobilanzierungen, in ETH-UNS Fallstudie 2000 – Zukunft Schiene Schweiz, S.181–202, Verlag Rüegger, Zürich, 2001
- STOUTHARD, M.E.A. et al. 1997: Disability Weights for Diseases in the Netherlands, Rotterdam 1997
- SUVA; STAUBLI, B. 1997: Belästigender Lärm am Arbeitsplatz, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt SUVA, Luzern 1997
- THIEME; FLASNOECKER, M (ed.) 1999: THIEMES Innere Medizin, Stuttgart 1999
- UBA, Umweltbundesamt 2000: Fluglärnwirkungen, Berlin 2000

- UBA; ROTHENGATTER, W. et al. 1998: Entwicklung eines Verfahrens zur Aufstellung umweltorientierter Fernverkehrskonzepte als Beitrag zur Bundesverkehrswegeplanung, Schlussbericht, UBA-FB Nr. 10506001, 1998
- VG DHS Victorian Government Department of Human Services 1999: Victorian Burden of Disease Study: Morbidity, Melbourne 1999 auf <http://www.dhs.vic.gov.au/phd/9903009/index.htm>
- WHO; BERGLUND, B.; LINDVALL, Th.; SCHWELA, D.H. (ed) 2000: Guidelines for Community Noise, World Health Organization Geneva, auf <http://www.who.int/peh/noise/noiseindex.html>

Anhang

Information/Fragebogen an SUVA-Aerzte

1. Information über das zu behandelnde Problem

Es werden derzeit grosse Anstrengungen gemacht, um die Umweltauswirkungen des Verkehrs auf die menschliche Gesundheit sachgerecht und schlüssig zu ermitteln.

Dies ist bei den Abgas-Emissionen schon recht gut gelungen: Man hat Daten über Emissionsmengen pro 1000 km Fahrt bestimmter Klassen von Verkehrsmitteln, und man hat Modelle, um daraus die marginalen Erhöhungen der Schadgas-Konzentration in der Luft zu ermitteln. Weiter gibt es epidemiologische Befunde, welche die Zahl von Krankheitsfällen pro Million Menschen in Abhängigkeit der Schadgaskonzentrationen abschätzen. Auf diese Weise kommt man zu Angaben vom Typ «wie viele zusätzliche Fälle von Krebs der Atemwege sind zu erwarten, wenn zusätzlich 1 Mio Lastwagenkilometer gefahren werden.

Etwas schwieriger ist es, auch beim Lärm zu konkreten Zahlen zu kommen. Wir können zwar heute ermitteln, wie stark das Lärmbelastungsmass «äquivalenter Dauerschallpegel LeqA» anwächst, wenn zusätzliche 1000 km mit einem bestimmten Verkehrsmittel gefahren werden. Es gibt auch Daten zur Beantwortung der Frage, welche Beeinträchtigungen die Lärmbetroffenen erleiden, und wie gross die Zahl der entsprechenden Fälle in Abhängigkeit von der Höhe der Lärmbelastung ist.

Aber das Problem bei den gesundheitlichen Folgen des Lärms liegt darin, dass es schwierig ist, die vergleichsweise geringe Beeinträchtigung klar zu beschreiben und bei den Betroffenen objektiv zu observieren. Man verwendet in diesem Zusammenhang daher häufig den etwas vagen Ausdruck «Belästigung» (engl.: annoyance), und man stellt das Vorkommen von Belästigung weniger durch medizinische Diagnose als durch Befragung der Betroffenen (social survey) fest. Immerhin besteht ein Konsens, dass Verkehrslärm bei Menschen nachts zu Schlafstörungen (sleep disturbance) und tagsüber zu Kommunikationsstörungen (communication disturbance) führt; empirische Untersuchungen geben verlässliche Auskunft darüber, dass diese Störungen bei steigendem Schallpegel LeqA im Bereich von 45 bis 80 Dezibel immer häufiger auftreten.

Es werden auch andere Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit durch Verkehrslärm genannt, wie Herzkrankheiten oder psychische Krankheiten, aber deren Zusammenhang mit Lärm ist bisher nur ungenügend nachgewiesen.

In der Schweiz sind Hunderttausende von Personen betroffen durch verkehrslärmbedingte Schlaf- und Kommunikationsstörungen. Diese Gesundheitsschäden können daher auch dann einen bedeutenden Gesamtumfang annehmen, wenn man «Schlafstörung» oder «Kommunikationsstörung» beim einzelnen Betroffenen als geringe Beeinträchtigung der vollen Gesundheit ansieht. Für das Ziel der quantitativen Beurteilung von Lärmschäden ist es daher wichtig, gut abgestützte Aussagen über die relative Schwere der verkehrslärmbedingten Gesundheitsbeeinträchtigungen zu erhalten.

Hier sind wir dankbar für eine Beurteilung durch ein Panel von SUVA-Aerzten.

Aufgrund der Arbeiten von MURRAY wurde bei WHO ein System geschaffen für die umfassende quantitative Beurteilung des Gesundheitszustandes in einem Land: Dabei wird mit dem Mass DALY (Disability Adjusted Life Years) bestimmt, wie viele Lebensjahre durch vorzeitigen Tod verloren gehen oder infolge Gesundheitsbeeinträchtigung gewissermassen nur in reduziertem Ausmass gelebt werden können. Beeinträchtigung im Vergleich zur vollen Gesundheit (engl.: disability) wird durch Disability Weights gewichtet, die nach Massgabe der Schwere der Beeinträchtigung in Tabellen festgehalten sind. Die Tabellen der WHO haben weltweiten Bezug, weshalb sie stark ausgerichtet sind auf die in tropischen Entwicklungsländern vorkommenden Krankheiten. Daher wurden in neuester Zeit durch Untersuchungen in Holland, Australien und der EU die WHO-Tabellen ergänzt in Richtung von Krankheitsbildern, die vor allem für entwickelte Länder typisch sind. Trotzdem fehlen disability weights für lärmbedingte «Schlafstörung» und «Kommunikationsstörung».

Diese Lücke möchten wir füllen. Wir wollen daher die beiden Fälle «Schlafstörung» und «Kommunikationsstörung» hier beschreiben. Gleichzeitig stellen wir einen Auszug aus den Listen von bisher existierenden disability weights zusammen. Dann richten wir die Bitte an die SUVA-Aerzte, die «Schlafstörung» und die «Kommunikationsstörung» durch Vergleich mit den Fällen aus diesen Listen einzuordnen. Aus den Vergleichen soll sich dann eine Abschätzung für die Höhe des disability weights bei den beiden gesuchten Fällen ergeben.

2. Auszug aus Liste der vorhandenen disability weights

Die nachstehende Auswahl von disability weights ist entnommen aus:

- STOUTHARD M. et al.: Disability Weights for Diseases in The Netherlands
- Victorian Government, Department of Human Services: The Victorian Burden of Disease Study: Morbidity)
- MURRAY J.L.: The Global Burden of Disease

Die Disability Weights sind so ausgedrückt, dass ein Gewicht 0.000 Tod bedeutet, während ein Gewicht 1.000 volle Gesundheit bedeutet. Schwere Beeinträchtigungen erhalten Werte nahe bei 0.000, während die disability weights leichter Beeinträchtigungen nur wenig unterhalb von 1.000 liegen. Die nachstehende Auswahl von disability weights aus mehreren hundert Fällen erfolgte so, dass

- über den ganzen Bereich von 0.000 bis 1.000 verteilt Fälle von Beeinträchtigung körperlicher und geistiger Funktionen gegeben werden, um zu zeigen, wie der Raum zwischen «tot» und «völlig gesund» aufgeteilt worden ist
- über den Bereich 0.900 bis 1.000 (leichte Beeinträchtigungen) zudem Fälle angeführt sind, die relativ gut mit den verkehrslärm-bedingten Störungen vergleichbar sind, weil sie sich als Verständigungsschwierigkeiten auswirken oder ähnliche Folgen wie Schlafstörungen haben.

Zum Verständnis der Liste ist wichtig zu wissen, dass die disability weights sich auf eine einheitliche Dauer des Zustandes, z.B. 1 Jahr, beziehen, und dass sie immer auf den aktuell beschriebenen Gesundheitszustand abstellen, während allfällige spätere Stadien separat behandelt und daher mit separaten disability weights versehen sind. Ferner ist zu beachten, dass das disability weight sich auf den permanenten Zustand nach einer allfälligen medizinischen Behandlung bezieht, also nicht auf Übergangszustände kurz nach Behandlung.

Bezeichnung des Zustandes	Quelle des disability weight	Disability weight
Full health		1.000
Dental disease: Periodontal disease (gingivitis)	Dutch 34.2	1.00
Dental disease: Periodontal disease (pockets >6mm deep)	Dutch 34.3	0.99
Mild vision disorder (some difficulty reading small newspaper print, no difficulty recognizing faces at 4 m distance)	Dutch 22.1	0.98
Adult-onset mild hearing loss (25–34 dBHTL)	Victorian K8d	0.98
Mild to moderate asthma (symptom-free with or without maintenance therapy)	Dutch 28.1	0.97
Adult-onset mild hearing loss (35–44 dBHTL):(some difficulty understanding or actively participating in a conversation with one or more persons)	Victorian K8d	0.96
Benign prostatic hypertrophy (symptomatic cases)	GBD	0.96
Chronic Hepatitis B infection without active viral replication	Dutch 4.4	0.94
Uncomplicated diabetes mellitus	Dutch 13.1	0.93
Mild stable angina pectoris (NYHA 1–2)	Dutch 26.1	0.92
Mental retardation (IQ 70–84)	Dutch 17.5	0.91
Problem drinking (some physical, psychological or social problems caused by excessive alcohol intake)	Dutch 18.1	0.89
Mild to moderate congenital or early acquired hearing disorder	Dutch 23.1	0.89
Moderate hearing disorder in elderly (some difficulty to understand or participate in a conversation with one person but great difficulties with conversations with more than one person)	Dutch 24.2	0.88
Osteoarthritis (grade 2) of hip or knee	Dutch 39.1	0.86
Diabetes mellitus with neuropathy	Dutch 13.2	0.81
Diabetes mellitus with nephropathy	Dutch 13.3	0.71
Mild mental handicap (IQ 50–69)	Dutch 17.1	0.71
Severe asthma (not symptom-free despite maintenance medication)	Dutch 28.2	0.64
Severe hearing disorder acquired as an adult (great difficulty to understand or participate in a conversation with one person)	Dutch 24.3	0.63
Chronic hepatitis B with active viral replication	Dutch 4.5	0.64
Severe vision disorder (unable to read small newspaper print, great difficulty to recognize faces faces at 4 m distance)	Dutch 22.3	0.57
Moderate mental handicap (IQ 35–49)	Dutch 17.2	0.57
Severe stable angina pectoris (NYHA 3)	Dutch 26.2	0.43
Paraplegia, stable stage	Dutch 47.4	0.43
Extreme mental handicap (IQ <20)	Dutch 17.4	0.24
Tetraplegia, stable stage	Dutch 47.5	0.16
Severe dementia (permanent supervision required)	Dutch 14.3	0.05
Death		0.00

3. Beschreibung von Schlafstörung und Kommunikationsstörung als Folge von Strassenverkehrslärm

Damit die Beeinträchtigungen der von Strassenverkehrslärm betroffenen Anwohner mit den Fällen der obigen Tabelle verglichen werden können, wird nachstehend eine Beschreibung für die beiden Fälle formuliert.

Verkehrslärm-bedingte Schlafstörung (sleep disturbance)
<p>Beschreibung:</p> <p>Primäre Effekte der verkehrslärm-bedingten Schlafstörung sind</p> <ol style="list-style-type: none">Verzögerungen beim Einschlafen,das Aufwachen während der Nacht respektive das vorzeitige Aufwachen am Morgen,Veränderungen des Schlafmusters in der Nacht, insbesondere Verkürzung des Anteils von REM-Schlaf. <p>Diese Effekte können begleitet sein von erhöhtem Blutdruck, erhöhter Pulszahl, Gefässverengung, erhöhter Körperbewegung. Als sekundärer Effekt wird am Morgen, nach dem Aufwachen aus einem «schlechten Schlaf», erhöhte Müdigkeit und depressive Stimmung wahrgenommen.</p> <p>Nebst diesen tatsächlich eingetretenen Schlafstörungen gibt es die verhinderten Schlafstörungen, bei denen die Lärmwirkung durch geschlossene Schlafzimmerfenster, durch mechanische Ohrpfropfen oder durch regelmässige Einnahme von Schlafmitteln abgewehrt wird. Gesundheitlich relevant sind dabei die 10–20 Fälle von regelmässigem Schlafmittelkonsum, die auf 100 Fälle von tatsächlich eingetretenen Schlafstörungen vorkommen.</p> <p>Wenn wenigstens einer dieser Effekte als Folge erhöhter Verkehrslärmbelastung in der Nacht mehrmals wöchentlich oder gar täglich auftritt, so ist der Fall von «sleep disturbance» gegeben.</p>
<p>Vergleichsansätze für die Abschätzung des disability weight: Die Festlegung eines disability weight für «sleep disturbance» könnte Ihnen eventuell leichter fallen, wenn Sie in Erwägung ziehen, dass folgende Gesundheits-Beeinträchtigungen sich in einer ähnlichen Richtung auswirken wie die nächtliche Störung durch Verkehrslärm:</p> <ul style="list-style-type: none">• Benign prostatic hypertrophy (symptomatic cases), mit disability weight 0.96• Mild to moderate asthma (symptom-free with or without maintenance therapy), mit disability weight 0.97 <p>In diesen beiden Fällen wird der nächtliche Schlaf durch Drang zum Wasserlösen oder durch Atemnot beeinträchtigt.</p>

Verkehrslärm-bedingte Kommunikationsstörung (communication disturbance)

Beschreibung:

Verkehrslärm-bedingte Kommunikationsstörungen treten innerhalb von Wohnräumen und Arbeitsräumen vorwiegend tagsüber auf.

Primäre Effekte sind

- a) Verständigungsschwierigkeiten bei normaler Sprech-Lautstärke,
- b) Störungen beim Hören von Radio und TV sowie anderen Tonwiedergabegeräten,
- c) Verminderte Konzentrationsfähigkeit beim Arbeiten mangels Ruhe.

Als sekundärer Effekt wird Nervosität, gereizte Stimmung oder sogar Kopfweh festgestellt.

Das tatsächliche Eintreten von Kommunikationsstörungen wird von den Betroffenen häufig dadurch abgewehrt, dass sie die Sprech-Lautstärke über den normalen Wert von 45–50 dB(A) hinaus erhöhen, respektive die Tonwiedergabegeräte lauter einstellen.

Wenn wenigstens einer dieser Effekte als Folge erhöhter Verkehrslärmbelastung am Tag mehrmals wöchentlich oder gar täglich auftritt, so ist der Fall «communication disturbance» gegeben.

Vergleichsansätze für die Abschätzung des disability weight: Die Festlegung eines disability weight für «communication disturbance» könnte Ihnen eventuell leichter fallen, wenn Sie in Betracht ziehen, dass folgende Gesundheits-Beeinträchtigungen sich in ähnlicher Art auf die akustische Kommunikation auswirken:

- Adult-onset mild hearing loss (25–34 dBHTL), mit disability weight 0.98
- Adult-onset mild hearing loss (35–44 dBHTL) (some difficulty understanding or actively participating in a conversation with one or more persons), mit disability weight 0.96.

Bei diesen beiden Fällen von erst im erwachsenen Alter erworbenen Gehörschäden ist die Kommunikation erschwert durch verminderte Leistungsfähigkeit des Hörorgans, während bei «communication disturbance» die Kommunikation durch den störenden Lärmpegel beeinträchtigt ist, solange die betroffene Person im Wirkungsbereich dieses Lärmpegels steht.

Bitte beachten Sie, dass die vorgenannten Vergleichsansätze für Sie keineswegs bindend sind, sondern lediglich eine Anregung. Sie sind frei, die gesuchten disability weights durch Vergleich mit irgendwelchen anderen Positionen aus der Liste auf Seite 3 abzuschätzen.

4. Die Fragen an die SUVA-Ärzte

Die Fragen lauten:

- Welchen Zahlenwert sollte nach Ihrer Einschätzung das disability weight von «sleep disturbance» erhalten, um im Vergleich zu den anderen Fällen von Gesundheitsbeeinträchtigung gemäss Liste auf Seite 2 angemessen gewichtet zu sein?

Antwort: __. __ __ (Zahl mit 2 Kommastellen)

- Welchen Zahlenwert sollte nach Ihrer Einschätzung das disability weight von «communication disturbance» erhalten, um im Vergleich zu den anderen Fällen von Gesundheitsbeeinträchtigung gemäss Liste auf Seite 2 angemessen gewichtet zu sein ?

Antwort: __. __ __ (Zahl mit 2 Kommastellen)

Bitte beachten Sie, dass immer gesundheitliche Zustände zu vergleichen sind, von denen angenommen wird, dass sie während einer gleichlangen Periode, z.B. 1 Jahr, konstant andauern. Nicht zu berücksichtigen sind allenfalls später eintretende Stadien von schwererer Erkrankung.

Für die Interpretation Ihrer Einschätzung wäre es wertvoll, wenn Sie bezüglich Ihrer Person noch folgende Information ankreuzen könnten:

- Haben Sie neben Ihrer SUVA-Tätigkeit eine Arztpraxis?

Antwort: Ja Nein

- Bisherige Dauer der ärztlichen Erfahrung: Sind Sie über 45 Jahre alt?

Antwort: Ja Nein

- Fühlen Sie selbst, zuhause oder am Arbeitsplatz, sich erheblich belastet von Strassenverkehrslärm?

Antwort: Ja Nein

Hier wäre noch Platz, falls Sie eine zusätzliche persönliche Bemerkung zu dieser Umfrage machen möchten:
--

Wir sind Ihnen sehr dankbar, wenn Sie unsere Forschungsarbeit unterstützen können durch Rücksendung Ihrer Antwort an Herrn Dr. Laszlo Matéfi, SUVA Luzern, bis zum 15. Oktober 2000. Herr Matéfi ist auch bereit, ab 2. Oktober Ihnen telefonisch ergänzende Auskünfte zu geben.