

# Überprüfung der Immissionsgrenzwerte für Lärm

Inputpapier 3: Akustik

im Auftrag der Eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung und  
des Bundesamts für Umwelt BAFU

18. März 2009



Materials Science & Technology

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 44 823 55 11  
F +41 44 823 47 93  
[www.empa.ch](http://www.empa.ch)

# Impressum

## Empfohlene Zitierweise

Autor: Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung  
Titel: Überprüfung der Immissionsgrenzwerte für Lärm  
Untertitel: Inputpapier Nr. 3  
Auftraggeber: Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung und Bundesamt für Umwelt BAFU  
Ort: Dübendorf  
Jahr: 2009

## Begleitgruppe

Tommaso Meloni (Projektleitung, Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung)  
Beat Marti (Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung)  
Peter Ettler (Eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung)  
Jenni Keel (Bundesamt für Umwelt BAFU)

## Projektteam Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung

Rudolf Bütikofer  
Kurt Eggenschwiler (Projektleitung Inputpapier 3 ab 1.1.2009)  
Kurt Heutschi  
Georg Thomann (Projektleitung Inputpapier 3 bis Ende 2008)  
Jean Marc Wunderli

## Projektteam Ecoplan

Heini Sommer (Gesamtprojektleitung)  
Sarah Werner

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

Empa  
Abteilung Akustik / Lärminderung  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 44 823 47 11  
F +41 44 823 47 93  
www.empa.ch

## Vorwort zum Projekt

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und die eidgenössische Kommission für Lärmbekämpfung (EKLB) prüfen zurzeit, ob die in den 1970er und 1980er Jahren festgelegten Lärmbelastungsgrenzwerte dem im Umweltschutzgesetz verankerten Grundsatz noch genügen, wonach Immissionen unterhalb dieser Grenzwerte „die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören“.

Dazu wird im Rahmen einer Vorstudie geklärt, wie sich verschiedene Dimensionen des „Lärmumfelds“ (konkret die Dimensionen Technik & Betrieb, Akustik, Lärmwirkung) seit Inkrafttreten der Lärmbelastungsgrenzwerte entwickelt haben und ob sich daraus ein **wissenschaftlich begründeter Handlungsbedarf** zur detaillierten Überprüfung bzw. Neufestlegung der geltenden Lärmbelastungsgrenzwerte ergibt. Die Überprüfung bezieht sich dabei auf die Grundsatzfrage, ob die Immissionsgrenzwerte die im Umweltschutzgesetz geforderte Funktion (siehe oben) erfüllen.

Die Vorstudie wird in sechs einzelnen Teilberichten erarbeitet: einem Grundlagenpapier, vier Inputpapieren, sowie einem Synthesenbericht.

- Das *Grundlagenpapier Geschichte* arbeitet dabei den geschichtlichen Werdegang der heutigen Lärmgrenzwerte auf.
- Darauf aufbauend behandeln vier selbstständige *Inputpapiere* zu den Themen *Akustik, Technik und Betrieb, Recht*, sowie (*medizinisch-psychologische*) *Lärmwirkung* die Grundsatzfrage aus verschiedenen Blickwinkeln.
- Die Erkenntnisse dieser Inputpapiere fliessen letztendlich in einem *Synthesenbericht* zusammen. Dieser zeigt gesamthaft auf, ob aufgrund der Faktenlage ein Handlungsbedarf zur Überprüfung der Lärmbelastungsgrenzwerte gegeben ist oder nicht.

**Bei vorliegendem Bericht** handelt es sich um das **Inputpapier Akustik**.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Ausgangslage und Zielsetzung in der Dimension Akustik</b> .....	<b>6</b>
1.1 Ausgangslage .....	6
1.2 Zielsetzung .....	6
1.3 Leitfragen zur Dimension Akustik.....	6
1.4 Vorgehen bei der Behandlung der Leitfragen und Schnittstellen zu weiteren Dimensionen .....	7
<b>2 Behandlung der Leitfragen zur Dimension Akustik</b> .....	<b>9</b>
2.1 Akustische Beschreibungsgrößen (Leitfrage A.1) .....	9
2.1.1 Akustische Messtechnik / Signalmerkmale.....	9
2.1.2 Psychoakustische Masse.....	10
2.1.3 Lärmbelastungsmasse .....	11
2.1.4 Soundscape .....	12
2.1.5 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs.....	12
2.2 Methodische Ansätze und Möglichkeiten der akustischen Messtechnik (Leitfrage A.3 und teilweise A.2) .....	13
2.2.1 Messtechnik vor 1975 .....	13
2.2.2 Stand der Technik Anfang der 80er Jahre .....	14
2.2.3 Stand der Technik heute .....	14
2.2.4 Quellenseparation und Einzelereignisse.....	15
2.2.5 Messorte bei Langzeitmessungen .....	15
2.2.6 Langzeit-Mittelwerte .....	16
2.2.7 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs .....	16
2.3 Methodische Ansätze und Möglichkeiten der akustischen Berechnungen (Leitfrage A.4) .....	17
2.3.1 Stand der Technik Anfang der 80er Jahre .....	17
2.3.2 Stand der Technik heute .....	18
2.3.3 Systematische Abweichungen bei verschiedenen methodischen Ansätze .....	19
2.3.4 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs .....	20
2.4 Größenordnungen von Mess- und Berechnungsunsicherheiten und ihre Konsequenzen .....	22
2.4.1 Problemstellung .....	22
2.4.2 Größenordnungen von Messunsicherheiten .....	23
2.4.3 Größenordnung von Berechnungsunsicherheiten.....	23

2.4.4	Konsequenzen der Mess- und Berechnungsunsicherheiten .....	24
2.4.5	Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs .....	25
<b>3</b>	<b>Gesamtbeurteilung und Handlungsbedarf .....</b>	<b>26</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>29</b>

## Abkürzungsverzeichnis

dB	Dezibel
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
FLULA2	Fluglärmsimulationsprogramm der Empa
L	Pegel (akustisches Belastungsmass)
L <sub>AE</sub>	A-bewerteter Ereignispegel
L <sub>Aeq</sub>	A-bewerteter Mittelungspegel
L <sub>AeqT</sub>	A-bewerteter Mittelungspegel über die Zeitdauern T, z. B. L <sub>Aeq,8h</sub> (L <sub>Aeq</sub> über 8 Stunden)
L <sub>AF</sub>	A-bewerteter Schalldruckpegel, Zeitkonstante FAST
L <sub>AFmax</sub>	A-bewerteter Maximalpegel, Zeitkonstante FAST
L <sub>ASmax</sub>	A-bewerteter Maximalpegel, Zeitkonstante SLOW
L <sub>den</sub>	Day/Evening/Night Rating Level
L <sub>dn</sub>	Day/Night Rating Level
L <sub>eq</sub>	Mittelungspegel (häufig synonym für L <sub>Aeq</sub> verwendet)
L <sub>max</sub>	Maximalpegel
L <sub>n</sub>	Perzentilpegel
L <sub>N</sub>	Lautstärkepegel
L <sub>night</sub>	Rating Level for Night Time
L <sub>r</sub>	Beurteilungspegel
LSV	Eidg. Lärmschutzverordnung
SEMIBEL	Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm
SL2000	Schweizerisches Programm zur Berechnung von Schiesslärm (2000)
SonGun	Neues Schweizerisches Programm zur Berechnung von Schiesslärm
SonRail	Zukünftiges Schweizerisches zur Berechnung des Eisenbahnlärms
SonRoad	Neues Schweizerisches Modell zur Berechnung des Strassenlärms
StL-86	Schweizerisches Modell zur Berechnung des Strassenlärms (1986)

# 1 Ausgangslage und Zielsetzung in der Dimension Akustik

## 1.1 Ausgangslage

Der Mittelungspegel ist die Basisgrösse für die meisten weltweit verwendeten Lärmbelastungsmasse für Verkehrslärm - so auch in der Schweiz. Er hat sich hauptsächlich durchgesetzt wegen seiner verhältnismässig leichten Bestimmbarkeit und seiner Fähigkeit die Schallenergie einer komplexen Lärmsituation in einer einzigen Zahl auszudrücken. Neben dem Mittelungspegel standen jedoch schon früher die unterschiedlichsten akustischen Masse zur Diskussion.

## 1.2 Zielsetzung

In der Dimension Akustik sind aktuell zur Diskussion stehende akustische Masse zu prüfen und bezüglich ihrer Aussagekraft mit dem Mittelungspegel zu vergleichen. Dabei gilt es aufzuzeigen, was die einzelnen akustischen Masse „leisten“ können, welcher messtechnische Aufwand nötig ist um sie zu bestimmen, und ob sie sich in akustischen Modellen mit sinnvollem Aufwand berechnen lassen. Im vorliegenden Inputpapier werden folgende Ziele verfolgt:

1. Überblick über den Stand der quantitativen Erfassung der Lärmbelastung durch akustische Beschreibungsgrössen.
2. Diskussion der Vergleichbarkeit von Messungen und Modellrechnungen von 1980 mit entsprechenden Ergebnissen von heute (Stand 2008).
3. Aufzeigen allfälliger Veränderungen im Verhältnis zwischen Messung und Berechnung und der Grenzen von Messungen und von Berechnungen.
4. Diskussion der Fehlerproblematik und der Unsicherheiten von Messungen und Berechnungen und deren Auswirkungen auf die Festlegung von Belastungsgrenzwerten.
5. Gibt es neue Erkenntnisse der Psychoakustik, welche die aktuelle Messtechnik beeinflussen?
6. Identifizierung bekannter und möglicher Mängel bei Berechnungsmodellen.

## 1.3 Leitfragen zur Dimension Akustik

Ausgehend von den Zielsetzungen wurden für die Dimension Akustik folgende fünf Leitfragen definiert, welche im vorliegenden Inputpapier beantwortet und bewertet werden:

- A.1 Genügt das Konzept der Beurteilungspegel als Summe eines Mittelungspegels und einer oder mehrerer Korrekturen, um die Beeinträchtigung durch Lärm (Belästigung, Schlafstörung, Gesundheitsgefährdung) angemessen abbilden zu können?
- A.2 Ist der von der LSV gewählte Geltungsort der Immissionsgrenzwerte aus akustischer Sicht geeignet, die Störwirkung beim Lärmbetroffenen zu erfassen?
- A.3 Haben sich die technischen Möglichkeiten der akustischen Messung seit Inkrafttreten der LSV derart verändert resp. verbessert, dass sich dies allenfalls auf die Festlegung der Lärmimmissionsgrenzwerte auswirken würde?
- A.4 Haben sich die methodischen Ansätze und die Möglichkeiten in der akustischen Simulationstechnik seit Inkrafttreten der LSV derart verändert resp. verbessert, dass sich dies allenfalls auf die Festlegung der Lärmimmissionsgrenzwerte auswirken würde?
- A.5 Messungen und Berechnungen sind mit quantifizierbaren Unsicherheiten behaftet. Welchen Stellenwert haben diese Unsicherheiten bei der Festlegung der Immissionsgrenzwerte?

#### **1.4 Vorgehen bei der Behandlung der Leitfragen und Schnittstellen zu weiteren Dimensionen**

In den Abschnitten 2.1 - 0 werden die akustischen Beschreibungsgrössen, die methodischen Ansätze und Möglichkeiten der akustischen Messtechnik und der akustischen Berechnungen, die Grössenordnungen der Mess- und Berechnungsunsicherheiten sowie der Umgang mit diesen Unsicherheiten behandelt. Jeder Abschnitt wird jeweils mit einem Fazit abgeschlossen, welches die Bewertung der zugehörigen Leitfrage(n) enthält. Sämtliche Teilbewertungen werden schliesslich in Abschnitt 3 zu einer Gesamtbeurteilung der Dimension Akustik zusammengefasst und kurz kommentiert.

Die oben aufgeführten Leitfragen der Akustik haben einen starken geschichtlichen Bezug. Die Diskussion der Frage, warum bei der Festlegung der IGW diesem oder jenem Lärmass der Vorzug gegeben wurde, ist nicht Bestandteil des vorliegenden Inputpapiers, sondern wird im Grundlagenpapier von Robert Hofmann behandelt. Hingegen wird kurz auf drei Leitfragen eingegangen, welche schwergewichtig in der Dimension Lärmwirkung behandelt werden, jedoch eine starke Beziehung zur Dimension Akustik haben. Es sind dies:

- W.3 Sind die in der LSV implementierten Betrachtungszeiträume (z.B. Mittelung über ein Jahr) noch sinnvoll bzw. dem Lärmgeschehen angemessen?
- W.7 Ergibt sich aus der Nicht-Berücksichtigung der Kombinationswirkung verschiedener gleich- als auch verschiedenartiger Lärmquellen ein Handlungsbedarf?
- W.5 Sind alle in der LSV behandelten Quellen akustisch ausreichend beschrieben?

Umgekehrt werden im Inputpapier „Lärmwirkung“ die Leitfragen A.1, A.2 und A.5 und im Inputpapier „Recht“ die Leitfragen A.2 und A.5 kurz kommentiert und beurteilt.

## 2 Behandlung der Leitfragen zur Dimension Akustik

### 2.1 Akustische Beschreibungsgrössen (Leitfrage A.1)

#### 2.1.1 Akustische Messtechnik / Signalmerkmale

[12], [25], [35], [36], [39], [42], [43]<sup>1</sup>

Als vollständige Beschreibung der akustischen Situation an einem Immissionsort kann der zeitliche Verlauf der Schallintensität in einem Frequenzbereich von etwa 20 Hz bis 20 kHz betrachtet werden. Die Schallintensität [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] ist das Produkt des Schalldrucks [Pa] und der Schallschnelle [m/s]. Die Schallschnelle und damit auch die Schallintensität sind gerichtete Grössen, d.h. sie enthalten auch eine Richtungsinformation.

In aller Regel ist es für Aufgaben der Umweltakustik nicht notwendig, über die ganze akustische Information zu verfügen. Als Ausgangsgrösse beschränkt man sich vielfach auf die skalare Grösse Schalldruck. Der zeitliche Verlauf des Schalldrucks kann mit hoher Qualität gemessen und das entsprechende Signal zum Weiterverarbeiten oder zum Abhören gespeichert werden. Aus dem Schalldrucksignal werden Merkmale extrahiert, welche entweder aus Gründen der Signalverarbeitung und zur Darstellung günstig sind oder für die Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung geeignet erscheinen.

Wegen den Parallelen zur Lautstärkewahrnehmung und der in der Nachrichtentechnik üblichen Darstellungsweise wird in der Akustik mit logarithmischen Verhältnisgrössen, d. h. Pegelgrössen in Dezibel (dB) gearbeitet. In der praktischen Anwendung steht der Schalldruckpegel im Vordergrund, meistens in Form einer gleitenden Mittelung. Mit der gleitenden Mittelung (Zeitkonstanten FAST oder SLOW) folgt der Pegel dem ursprünglichen Signal mit einer gewissen Trägheit. Bei der Zeitkonstante FAST ist die Trägheit klein, bei SLOW gross.

Aus dem zeitlichen Pegelverlauf können verschiedene Signalmerkmale abgeleitet werden, wie der Maximalpegel  $L_{\max}$ , der Mittelungspegel  $L_{\text{eq}T}$  (= energieäquivalenter Dauerschallpegel) über eine Zeitdauer  $T$  oder der Ereignispegel  $L_E$  (ältere Bezeichnung: SEL, Sound Exposure Level). Für impulsartigen Lärm, besonders zur Beurteilung der Gehörschädlichkeit, wird auch der Spitzenpegel  $L_{\text{peak}}$  verwendet. Für den Momentan- oder den Maximalpegel ist die Angabe der verwendeten Zeitkonstante unentbehrlich, also z. B.  $L_{F\max}$  resp.  $L_{S\max}$ .

Der Zeitverlauf des Schalldruckpegels (meistens mit Zeitkonstante FAST), wird häufig grafisch dargestellt. Er kann mit verschiedenen Verfahren weiter charakterisiert werden. Aus Deutschland bekannt ist z.B. das Takt-Maximal-Verfahren, bei welchem innerhalb eines vorgegeben Takts (z.B. alle 5 Sekunden) jeweils der Maximalpegel erfasst wird. Weiter werden

---

<sup>1</sup> Die Ziffern verweisen auf die für diesen Abschnitt relevanten Studien im Literaturverzeichnis.

statistische Verfahren angewendet, wobei die Häufigkeitsverteilung, die Summenhäufigkeit oder die Überschreitungspegel (Perzentilpegel) üblich sind. Der Perzentilpegel  $L_n$  ist der Pegel welcher in  $n\%$  im Zeitintervall  $T$  überschritten ist. Verwendung finden  $L_{0.1}$  (häufige Spitzen, in der Schweiz früher *seltene Spitzen*),  $L_1$  (häufige Maxima),  $L_{50}$  (Median),  $L_{90}$  oder  $L_{95}$  (Grundgeräuschpegel). Zusätzlich bekannt sind Schwellenwertkriterien wie z. B. der NAT (Noise above Threshold). Beim NAT werden diejenigen Schallereignisse gezählt, welche einen definierten Schwellwert des Pegels überschreiten. Eine Vielzahl weiterer Kriterien ist denkbar, wie z. B. Aussagen zum zeitlichen Anstieg des Pegelverlaufs.

Ausserdem sind spektrale Darstellungen von Schallereignissen zu erwähnen, welche zwar in der Umweltakustik kaum direkt als Beschreibungsgrösse beigezogen werden, aber doch für die Berechnung diverser Masse notwendig sind. Dazu gehören die Spektralanalysen mit konstanter relativer Bandbreite (Terz- und Oktavbandanalysen) und die Analysen mit konstanter absoluter Bandbreite (Schmalband- resp. FFT-Analysen).

Die dargestellten Beschreibungsgrössen sind zum grössten Teil international normiert.

### 2.1.2 Psychoakustische Masse

[10], [11], [20], [29], [32], [35], [36], [37], [51]

Im Gegensatz zu den eben beschriebenen rein technischen Signalmerkmalen werden unter psychoakustischen Massen Beschreibungsgrössen mit einem Bezug zum menschlichen Hören verstanden. Sie stützen sich auf die im letzten Abschnitt aufgeführten Verfahren.

Der wichtigste Ansatzpunkt ist die Lautstärkeempfindung. Dabei muss in erster Ordnung und stark vereinfacht die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs berücksichtigt werden. Dazu wurden ursprünglich vier Bewertungfilter A, B, C und D definiert, welche je nach Höhe des Schalldruckpegels eingesetzt werden sollten. Das Filter A diente sollte die Frequenzabhängigkeit des Gehörs bei leisen, die Filter B, C und D stufenweise bei lauterem Geräuschen abbilden. Aus verschiedenen Gründen werden seit langer Zeit nur noch A- und C-Filter verwendet. Zur Beurteilung von Lärm wird hauptsächlich der A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{AF}$  mit den abgeleiteten Grössen wie z. B. dem Mittelungspegel  $L_{Aeq}$  und dem Maximalpegel  $L_{AFmax}$  oder  $L_{ASmax}$  eingesetzt.

Verschiedene andere Masse zur Beschreibung der Lautstärke wurden entwickelt (z. B. Lautstärkepegel  $L_N$  in Phon, Perceived Loudness PN, Noise Rating Numbers NR). Sie werden entweder nur noch selten verwendet oder eignen sich mehr zur Beurteilung von speziellen Situationen, wie z. B. Lüftungsgeräuschen in Konzertsälen. Die Lautheit  $N$  in sone ist breit anerkannt und auch genormt; sie spielt aber in der Umweltakustik eine marginale Rolle, weil die bei den meisten Umweltgeräuschen die Korrelation zum A-bewerteten Schalldruckpegel sehr hoch ist. Zur Ermittlung der Lautheit werden die Frequenzabhängigkeit des Gehörs in Funktion des Pegels und der Verdeckungseffekt berücksichtigt.

Ebenfalls genormt sind verschiedene technische Verfahren zur Beurteilung der Ton- und Impulshaltigkeit, welche sich jedoch in der Praxis noch nicht richtig durchgesetzt haben. Die

genormten Verfahren werden ergänzt durch eine weitere Anzahl etablierter psychoakustischer Masse, bei welchen sich die Definition je nach Messgeräterealisierung leicht unterscheiden. Zu den vor allem zur Beurteilung der Geräuschqualität verwendeten Massen gehören Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität.

Es gab und gibt Anstrengungen, psychoakustischen Masse oder Kombinationsgrößen zur Beurteilung der Lästigkeit und Unangenehmheit von Schallen zu verwenden.

Weiter ist zu erwähnen, dass bei Messungen psychoakustischer Größen zum Teil binaurale Messverfahren mit einem Kunstkopf zum Einsatz kommen.

In Bezug auf Kommunikationsstörungen durch Lärm sind verschiedene genormte Verfahren zur Beurteilung der Sprachverständlichkeit zu nennen (z.B. Articulation Index AI, Speech Interference Level SIL, Speech Transmission Index STI).

### 2.1.3 Lärmbelastungsmasse

[12], [14], [15], [25], [35], [36], [45], [46]

Mit den Lärmbelastungsmassen wurde und wird versucht, Beschreibungsgrößen in Verbindung mit den in den beiden oberen Abschnitten aufgeführten Verfahren und Massen zu finden, welche mit Ergebnissen der Lärmwirkungsforschung gut korrelieren. Viele rechtlich gebräuchliche und in internationalen Normen definierte Lärmbelastungsmasse basieren auf dem Mittelungspegel  $L_{Aeq}$ . So wird in den USA der  $L_{dn}$ , in der EU der  $L_{den}$ , ergänzt mit dem  $L_{night}$  verwendet. Beim  $L_{dn}$  wird der  $L_{Aeq}$  tags über 15 Stunden ermittelt und energetisch zum  $L_{Aeq}$  nachts von neun Stunden addiert, wobei die Nacht mit einem Malus von zehn Dezibel versehen wird. Beim  $L_{den}$  zählt der Tag zwölf Stunden und die Nacht acht Stunden, wiederum mit einem Malus von zehn Dezibel. Es werden vier Abendstunden mit einem Malus von fünf Dezibel gezählt. Der  $L_{night}$  entspricht dem  $L_{Aeq}$  über acht Nachtstunden gemittelt.

Allgemein werden zur Kennzeichnung von Lärmimmissionen Beurteilungspegel  $L_r$  (rating level) verwendet, welche aus der Summe akustischer Belastungsmasse und Korrekturen für die Lärmart, den Informationsgehalt, den Ton- und die Impulshaltigkeit etc. gebildet werden. In der Lärmschutzverordnung LSV ist das akustische Belastungsmass der  $L_{Aeq}$  (ausnahmsweise der  $L_{AFmax}$  bei Schiesslärm und Helikopterlärm). International und auch in der LSV erfolgt die Vergabe von Korrekturpegeln meistens nicht auf der Basis von Messungen, sondern auf Grund von Regeln und subjektiven Einschätzungen.

Eine schier endlose Reihe von weiteren Ansätzen für Lärmmasse wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt, wovon eine Anzahl auch Eingang in gesetzliche Regelungen gefunden hat, wie z.B. der NNI,  $Leq(4)$ , der Taktmaximalpegel, der Indice Psophique, etc. Zum Teil korrelieren die Masse (inkl.  $L_{Aeq}$ ) untereinander sehr stark. Auf der anderen Seite korrelieren sie, wie die Lärmwirkungsforschung zeigt recht schwach mit Wirkungsparametern wie "Belästigung". Da die akustischen Masse die Lärmwirkung schliesslich alle etwa gleich schlecht beschreiben, wurden oft solche gewählt, die einfach gemessen und berechnet werden konnten, also typischerweise der  $L_{Aeq}$ .

Zudem gibt es aus der Lärmwirkungsforschung abgeleitete Grössen, mit denen Aussagen zur Lärmbelastung gemacht werden, wie z. B. die Anzahl stark belastigter Personen oder die Anzahl zusätzlicher Aufwachreaktionen. Eine aktuelle Umsetzung findet sich beim Züricher Fluglärmindex ZFI.

#### 2.1.4 Soundscape

[26], [33]

Eine mögliche Weiterentwicklung der Beschreibung akustischer Ereignisse kann sich aus einer Forschungsrichtung ergeben, welche sich mit der Beschreibung der Geräuschlandschaft (Soundscape) beschäftigt. Dazu Hohmann: *Unter Soundscape versteht man die Gesamtheit der an einem Ort hörbaren akustischen Signale, beschrieben im Hinblick auf die Wahrnehmung durch den Menschen.* Die Beschreibung wird sich dabei mehr an Nicht-Experten orientieren als an der Anwendung der bisher beschriebenen akustischen Grössen. In Bezug auf Ruhe und Stille könnten sich hier aber mit Hilfe akustischer Messtechnik neue Beschreibungsgrossen ergeben.

#### 2.1.5 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs

Mit der geringen erklärten Varianz der akustischen Masse in Bezug auf Belästigung und Störung und den vielen, schliesslich erfolglosen Versuchen für ein besseres Lärmass stellt sich die Frage, ob die Suche nach besseren Beschreibungsgrossen überhaupt erfolgreich sein kann. Dabei muss auch immer in Betracht gezogen werden, ob Belastungsmasse mit sinnvollem Aufwand gemessen werden können, und ob rechnerische Prognosen möglich sind. In diesem Sinne stellen die in der Lärmschutzverordnung verwendeten Masse nach wie vor den Stand der Technik und des Wissens dar. D.h., es finden sich zum heutigen Zeitpunkt nicht anderswo deutlich bessere akustische Masse für die Beschreibung der Lärmwirkungen als in der LSV.

Wenn man allerdings die Fortschritte in der akustischen Messtechnik, den akustischen Prognoseverfahren und in der Psychoakustik bedenkt sowie neuere Ansätze wie die Soundscape-Forschung in Betracht zieht, ist ein Forschungsbedarf nicht von vornherein zu verneinen. Auch aus der Psychologie können sich Ansätze ergeben, resp. sind bereits vorhanden, welche eine Unterstützung durch neuere akustische Beschreibungsgrossen benötigen. Gefordert erscheint allerdings in erster Linie weniger die Akustik als viel mehr die Lärmwirkungsforschung: Wie das heutige Konzept der Beurteilungspegel verbessert werden kann, muss schliesslich von der Lärmwirkungsforschung beurteilt werden. Entsprechend wird aus rein akustischer Sicht kein direkter Handlungsbedarf festgestellt.

Tabelle 2-1: Bewertung des Handlungsbedarfs in der Leitfrage A.1

Leitfrage	Thema	Handlungsbedarf
A.1	Genügt das Konzept der Beurteilungspegel als Summe eines Mittelungspegels und einer oder mehrerer Korrekturen, um die Beeinträchtigung durch Lärm (Belästigung, Schlafstörung, Gesundheitsgefährdung) angemessen abbilden zu können?	Keiner

## 2.2 Methodische Ansätze und Möglichkeiten der akustischen Messtechnik (Leitfrage A.3 und teilweise A.2)

### 2.2.1 Messtechnik vor 1975

[2], [3], [31], [27]

Die methodischen Ansätze der Lärmbeurteilung mussten sich früher nach den technischen Möglichkeiten der Schallmesstechnik ausrichten, und diese waren im Vergleich zu heute stark eingeschränkt.

Bei den Mikrofonen gab es in den vergangenen 50 Jahren keine prinzipiellen Veränderungen. Es werden weiterhin druckempfindliche Kondensatormikrophone eingesetzt. Die Zuverlässigkeit und Witterungsbeständigkeit bei Langzeitmessungen wurde aber stark verbessert, insbesondere mit der Verfügbarkeit von Elektretmikrofonen, bei denen keine Polarisationsspannung mehr angelegt werden musste.

Die A-Bewertung ist als ein "vierpoliges Filter" früh normiert worden. Sie konnte damit gut als elektrischer Schaltkreis implementiert werden. Die Norm wird heute noch unverändert verwendet.

Für die Lärmbekämpfung wurden seit Bestehen der Normen für Schallpegelmessgeräte der Klasse 1 (höchste Anforderungen) eingesetzt.

Bei der messtechnischen Verarbeitung des Schalldrucks und der Berechnung von Kennzahlen gab es seit den Anfängen der Akustik extreme Veränderungen, die aber zu einem wesentlichen Teil vor 1980 erfolgten.

Zu Beginn der Messtechnik wurde die Amplitude des Signals gleichgerichtet und mit einem Zeigerinstrument dargestellt. Die Anzeige war linear auf einer logarithmisch eingeteilten Skala und war nur für Sinusschwingungen kalibriert. Eine zeitliche Mittelung impulsartiger Ereignisse erfolgte mittels Zeigerdynamik des Anzeigeinstrumentes. Mit servo-elektrischen Pegelschreibern wurde ein grösserer Dynamikbereich von 50 dB möglich. Damals war die Zeitkonstante noch durch die Anstiegsgeschwindigkeit des Schreibstifts der Servoregelung bestimmt.

Ein wesentlicher Durchbruch war Mitte der Siebzigerjahre die Entwicklung erster integrierter Schaltungen, die näherungsweise die Quadrierung des Zeitsignals und somit die Anzeige des "True RMS" (Effektivwert) des Signals ermöglichten. Dies eröffnete auch die Möglichkeit zur elektronischen Erzeugung einer zeitlich gleitenden Mittelung mit den nun genau normierten Zeitkonstanten FAST (125 ms) und SLOW (1 s). Schaltungen zur Anzeige des grössten Werts erlaubten die Ablesung z. B. des  $L_{AFmax}$ . Logarithmierende elektronische Schaltungen erweitern die Anzeigedynamik auf > 50 dB.

Tonbandaufzeichnungen zur detaillierten Auswertung im Labor waren ab den sechziger Jahren etabliert. Sie waren zeitlich durch die Spulengrösse auf einige wenige Stunden Aufzeichnungsdauer limitiert. Die Dynamik betrug etwa 50 Dezibel.

Der Fortschritt der Elektronik erlaubte Ende der Siebzigerjahre die Abtastung und Speicherung des Signalverlaufs, was die Berechnung des  $L_{Aeq}$  ermöglichte und den Bau von Statistikanalysatoren als handliche Geräte erlaubte.

### 2.2.2 Stand der Technik Anfang der 80er Jahre

[3], [17], [19], [24], [27]

Handliche, transistorisierte Messgeräte erlauben die Erfassung der akustischen Masse wie  $L_{AF}$  und  $L_{AFmax}$ , aber auch die Messung von integrierten Grössen wie  $L_{AE}$  und  $L_{Aeq}$  sowie statistischer Pegelverteilungen. Die Zeitkonstante FAST wird mit einem elektronischen Schaltkreis gebildet und hängt nicht mehr von der Zeigerdynamik oder den Einstellungen der Pegelschreiber ab. Dies ist insbesondere für die Erfassung von Schiesslärm relevant. Langzeitmessungen konnten praktisch nur als Pegelschriebe auf Papier durchgeführt werden, oder als  $L_{eq}$ -Messungen z. B mit dem stundenweisen Ausdruck der Werte.

### 2.2.3 Stand der Technik heute

[12], [34], [35], [36], [40], [41], [42], [43]

Die Entwicklung integrierter Schaltkreise und Prozessoren in den Neunzigerjahren hat die Messtechnik revolutioniert. Digitalisierungen des Schalldrucksignals mit bis zu 22 Bit erlauben beliebige Auswertungen mit mehr als 100 Dezibel Dynamikumfang. Die fast grenzenlosen Speicherkapazitäten heutiger Disks erlauben die Zwischenspeicherung langer Messsequenzen. Langzeitaufzeichnungen und die Auswertung der digitalisierten Dateien auf dem PC mit Softwareprogrammen ermöglichen die Beantwortung fast beliebiger Fragestellungen zu Frequenzbewertungen, Lautheit, Störungsmuster (Abfolge von Ruhezeiten und Störung), Statistiken, Pegelanstieg (Flankensteilheit, Pegelveränderung) etc. Weiter ist ein jahrelanges, lückenloses Monitoring einer Lärmbelastung (beispielsweise in Autobahnnähe) mit Speicherung aller Kenndaten zur Akustik, zur Witterung und zum Verkehrsaufkommen auf einem Server möglich. Im Rahmen des Projektes "Monitoring flankierende Massnahmen-Umwelt" (MFM-U) wurde dies in der Schweiz bereits realisiert.

## 2.2.4 Quellenseparation und Einzelereignisse

[28]

Auch mit perfekter Messtechnik verbleiben die Probleme, wie bestimmte Quellen ohne die störenden Beiträge durch andere Geräuschquellen gemessen, und wie Einzelereignisse identifiziert werden können.

Ein Beispiel ist die Identifizierung eines Fluglärmereignisses. Beim früher verwendeten Lärmmass NNI musste nur der Maximalpegel bestimmt werden, welcher ohne grosse Schwierigkeiten messbar war. Bei der Messung des Schallexpositionspegel  $L_{AE}$  (als Grundlage für spätere Berechnungen des  $L_{eq}$ ) ist dagegen der ganze Pegelverlauf des Überflugs einzubeziehen. Es gibt verschiedene Strategien, den Anfang und das Ende des Fluglärmereignisses messtechnisch zu festzustellen. So kann z. B eine Pegelschwelle festgelegt werden, welche überschritten werden muss, oder es wird nur der Bereich mit Pegelwerten bis 10 dB unterhalb des Maximalpegels  $L_{ASmax}$  berücksichtigt. Der Unterschied in den betrachteten Zeitabschnitten (ganzer Flug bei der Berechnung versus nur Pegel bis 10 dB unter  $L_{ASmax}$  bei der Messung) macht beim  $L_{AE}$  0.5 bis 1 dB aus. Bei einer Fluglärmsimulation stellen sich diese Probleme übrigens nicht.

Ähnliche Fragen stellen sich bei der Messung von Strassen-, Eisenbahn- oder Fluglärm mit nicht dazugehörigen Beiträgen von Geräuschanteilen wie Kirchenglocken, Hundegebell etc. Mit messtechnischem Aufwand können solche Störungen eingegrenzt werden. Beispielsweise wird beim Fluglärm durch "gating" ein Ereignis nur dann als Fluglärmereignis deklariert, wenn sich auf Grund der Radardaten ein Flugzeug in der Nähe des Mikrophons befindet. Oder es wird beispielsweise durch Korrelation verschiedener Messstellen beim Eisenbahnlärm an einem entfernten Messpunkt eine Zugvorbeifahrt nur als solche registriert, wenn ein zweites Mikrophon in der Nähe ebenfalls eine Vorbeifahrt misst. Eine andere Methode, nämlich das gewünschte Signal mit Hilfe der Beurteilung der Spektren durch neuronale Netzwerke zu identifizieren, kam (bei Flugzeugen) nicht über das Laborstadium hinaus.

## 2.2.5 Messorte bei Langzeitmessungen

[9], [28]

Hinweis: Hier wird nur der messtechnische Aspekt des Messorts aus Sicht der Akustik behandelt, nicht aber die Eignung des Messorts "aus lärmphysiologischer Sicht"<sup>2</sup>, wie dies in der Leitfrage zusätzlich gefordert ist.

Heutige Geräte erlauben Schallmessungen über Wochen. Neben den Problemen der Separation von Störgeräuschen stellt sich die Frage der Praktikabilität einer Messung nach LSV im offenen Fenster beim Strassen- und beim Eisenbahnlärm. Die Fenster können nicht über die

---

<sup>2</sup> Und lärmpsychologischer Sicht (siehe Fussnote <sup>2</sup> auf Seite 9)

ganze Dauer der Messung offen gehalten werden. Hier hat sich die Staudruckmethode bewährt. Das Mikrofon wird direkt auf dem geschlossenen Fenster montiert. Die dadurch verursachte Pegelerhöhung wird durch Abzug von 5 dB berücksichtigt. Die Differenz zu den theoretischen 6 dB, ergibt sich aus der Berücksichtigung der Reflexionen aus dem Raum.

Der Fluglärm wird flächendeckend für die theoretische Situation ohne Überbauung berechnet. Kleinräumig Reflexionen und Abschattungen von Gebäuden zu modellieren, wäre mit einem unverhältnismässig grossen Aufwand verbunden, der auch mit zukünftigen Informatikwerkzeugen kaum zu bewältigen wäre. Entsprechend werden auch die von Flughafenhaltern betriebene Fluglärm-Monitoringstationen auf Masten im freien Felde oder auf Dächern montiert und nicht im offenen Fenster. Diese Sachlage ist in der heutigen LSV nicht explizit geregelt.

### 2.2.6 Langzeit-Mittelwerte

Grundsätzlich muss bei Messungen aus einer begrenzten Stichprobe auf einen Jahresmittelwert geschlossen werden. Mit modernen Mess- und Speichermethoden kann zu diesem Zweck die Dauer der Stichprobe verlängert werden. Auf der anderen Seite können dank besserem Verständnis der Mechanismen der Schallausbreitung die Messungen besser interpretiert werden. Z. B. ist heute die Beurteilung von Nachtsituationen, welche sich wegen der Ausbreitungsbedingungen stark vom Tag unterscheiden, besser möglich.

### 2.2.7 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs

Moderne Messverfahren ermöglichen zwar viel umfangreichere Auswertungen als 1980, aber die damaligen Kennwerte wie  $L_{Aeq}$  und  $L_{AFmax}$  haben ihre Gültigkeit behalten (siehe auch Leitfrage A.1. in 2.1). Bei der Verwendung von Grundlagen, die auf Messergebnissen vor etwa 1980 beruhen, muss die veränderte Messtechnik berücksichtigt werden, insbesondere die damals ungenauere FAST-Bewertung (vor allem beim Schiesslärm) und der möglicherweise stärkere Einfluss des Grundgeräusches. Bei automatisierten Langzeitmessungen bleiben die Probleme der Beeinflussung einer bestimmten Lärmart durch Störgeräusche anderer Quellen weiterhin bestehen. Weitere Lärmmasse könnten heutzutage messtechnisch ermittelt werden, vorausgesetzt, der Bedarf wäre von der Lärmwirkungsforschung formuliert und nachgewiesen.

Die Messtechnik welche bei den frühen Untersuchungen für die Festlegung der Grenzwerte der LSV für Verkehrslärm verwendet wurden, ist auch aus heutiger Sicht beurteilt durchaus geeignet. Die damaligen Resultate sind also nicht durch die "alte" Messtechnik verfälscht. Bei neuen Studien zur Findung neuer Grenzwerte und Ermittlungsverfahren für Beurteilungspegel ist aber bei der akustischen Messtechnik ein Potenzial vorhanden, wenn es darum geht, neue Ansätze für Beschreibungsgrössen zu realisieren. Insgesamt ist der Handlungsbedarf bezüglich A.3. damit als "Mittel" zu bezeichnen.

Beim Ort der Ermittlung besteht aus rein akustischer Sicht kein Handlungsbedarf. Die bisher festgelegten Messorte ergeben stabile Ergebnisse.

**Tabelle 2-2: Bewertung des Handlungsbedarfs in der Leitfrage A.3 und A.2.**

Leitfrage	Thema	Handlungsbedarf
A.3	Haben sich die technischen Möglichkeiten der akustischen Messung seit Inkrafttreten der LSV derart verändert resp. verbessert, dass sich dies allenfalls auf die Festlegung der Lärmimmissionsgrenzwerte auswirken würde?	Mittel
A.2	Ist der von der LSV gewählte Geltungsort der Immissionsgrenzwerte aus akustischer Sicht geeignet, die Störwirkung beim Lärmbetroffenen zu erfassen?	Keiner

## 2.3 Methodische Ansätze und Möglichkeiten der akustischen Berechnungen (Leitfrage A.4)

### 2.3.1 Stand der Technik Anfang der 80er Jahre

[4], [5], [6], [7], [8], [23], [24]

Die Berechnungsmodelle, welche zu Beginn der 80er Jahre im Einsatz waren, basierten auf einem breiten Fundus von Messdaten. Ziel war es, mit Hilfe von einfachen Zusammenhängen diese Messdaten im Mittel zu reproduzieren. Die Quellenbeschreibung begnügte sich in der Regel mit wenigen Parametern, wie der Lage der Quelle oder der Anzahl Fahrzeuge pro Zeiteinheit, und verwendete nur wenige Unterscheidungen oder Kategorisierungen. Die Schallausbreitungsrechnung setzte sich generell aus einem Term zur Abbildung der Abstandsabhängigkeit sowie ergänzenden, weitgehend empirischen Korrekturen zusammen. Da die Ausbreitungsrechnung nicht spektral erfolgte, sondern direkt auf eine Reproduktion von A-bewerteten Mittelungspegeln abzielte, fielen die Korrekturen je nach Lärmart unterschiedlich aus. So wurde für Eisenbahnlärm als repräsentative Frequenz 2 kHz und für Strassenlärm 500 Hz für die Ausbreitungsrechnung verwendet. Dieser Umstand und die Tatsache, dass teilweise Phänomene der Schallabstrahlung integral mit solchen der Ausbreitung beschrieben wurden, führten dazu, dass die Berechnungsmodelle nur für die zugrundeliegende Lärmart und auch dort nur für die anvisierten Bedingungen Geltung hatten.

Als Standardsituation wurde bei den Messungen für Strassen- und Eisenbahnlärm jeweils eine Ausbreitungssituation mit weitgehend flachem Gelände, Grasland und Abständen von wenigen 100 Metern verwendet. Aufgrund der umfangreichen Basis an Messdaten sind die entsprechenden Berechnungsmodelle wie StL-86 oder SEMIBEL sehr wohl in der Lage, diese Situationen mit guter Genauigkeit zu berechnen. Die Modelle sind jedoch nicht darauf ausgelegt, veränderte Bedingungen abzubilden. So kann die Auswirkung geänderter Unter-

grundeigenschaften, z. B. von Grasland zu asphaltierten Flächen, wie sie häufig bei grenzwertrelevanten Situationen auftreten, nicht abgebildet werden, obwohl Messungen Pegelunterschiede von mehreren Dezibel belegen. Auch sind die Modelle nicht in der Lage, meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung nachzubilden. Dies hat namentlich bei grösseren Abständen eine signifikante Erhöhung der Berechnungsunsicherheit zur Folge. Neben den aufgrund der vorherrschenden Windrichtungen lokal im Vergleich zur Berechnung streuenden Pegeln zeigen sich aber auch systematische Unterschiede zwischen Tag und Nacht, als Folge der spezifischen Temperaturschichtung der Atmosphäre im Tagesverlauf. Nachts sind Temperaturinversionen häufiger als tags. Der Schall kann sich deshalb z.B. über niedrige Hindernisse nachts ungedämpft ausbreiten. Damit fallen die Immissionspegel in der Nacht in der Tendenz generell höher aus als am Tag. Da die den Modellen zugrundeliegenden Messdaten praktisch ausschliesslich am Tag gesammelt wurden, muss in der Berechnung von einer systematischen Unterschätzung der nächtlichen Immissionen ausgegangen werden.

Mindestens ebenso stark wie die ausbreitungsseitigen Phänomene fallen veränderte Bedingungen bei den Quelleneigenschaften ins Gewicht. Dies zeigt sich exemplarisch beim Eisenbahnlärm, bei welchem neuere Untersuchungen eindeutig die Bedeutung des Oberbautyps, sowie der Rauigkeit von Rad und Schiene belegen. Diese Einflussgrössen werden jedoch im Berechnungsmodell SEMIBEL nicht bzw. nur ungenügend und vor allem nicht in ihrer Wechselwirkung abgebildet. Bei der Auswertung der Messdaten, welche dem Emissionsmodell zugrunde liegen, konnten diese je nach Messstandort unterschiedlichen Schallemissionen praktisch nur über den Geschwindigkeitsparameter berücksichtigt werden. In der Folge ergaben sich je nach Fahrzeugtyp ganz unterschiedliche Geschwindigkeitsabhängigkeiten, welche physikalisch nicht erklärt werden können. Wird nun der Anwendungsbereich des Modells über den mit Messdaten abgedeckten Bereich ausgedehnt, ist deshalb mit deutlichen Abweichungen zwischen Messung und Berechnung zu rechnen. Ein aktuelles Beispiel für Eisenbahnlärm ist die Strecke Mattstetten-Rothrist, wo die Fahrgeschwindigkeiten heute über dem für Berechnungen gültigen Bereich des alten Modells liegen.

### 2.3.2 Stand der Technik heute

[1], [12], [13], [21], [22], [38], [47]

Moderne Berechnungsmodelle (wie sonROAD bzw. sonROAD-M oder sonRAIL) zielen nach wie vor auf eine Prognose von A-bewerteten Mittelungspegeln ab. Sowohl die Quellenbeschreibung als auch die Ausbreitungsrechnung sind jedoch spektral formuliert, vorzugsweise in Terzbändern. Als zentrale Eigenschaft moderner Berechnungsmodelle kann die konsequente Trennung der Schallentstehung bzw. -abstrahlung von den Phänomenen der Schallausbreitung angesehen werden. Dies erlaubt es, einheitliche Schallausbreitungsmodelle zu entwickeln, welche für alle Quellenarten Gültigkeit haben.

Generell ist feststellbar, dass die aktuellen Entwicklungen bei den Ausbreitungsmodellen weitgehend auf empirische, rein aus Messdaten abgeleitete Korrekturen verzichten und eine möglichst direkte Abbildung der physikalischen Phänomene anstreben. Dies zeigt sich insbe-

sondere beim Bodeneffekt, der heute physikalisch korrekt als Interferenzerscheinung zwischen Direktschall und bodenreflektiertem Schall berechnet werden kann. Neben der verbesserten Abbildung bereits früher berücksichtigter Aspekte werden in heutigen Modellen auch verschiedene zusätzliche Effekte reproduziert. Namentlich den bereits erwähnten meteorologischen Einflüssen aber auch den Reflexionen kommt in diesem Zusammenhang eine grosse Bedeutung zu.

Die Tendenz zu einer stärkeren Orientierung an der Physik zeigt sich auch bei der Quellenbeschreibung. Man beschränkt sich nicht mehr nur darauf, die entscheidenden Einflussgrößen der Schallemissionen zu identifizieren und in einen Zusammenhang mit den gemessenen Pegeln zu bringen. Es wird vielmehr mit aufwändigen Quellenmodellen versucht, die eigentliche Schallentstehung nachzubilden. Der grundlegende Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass es so möglich wird, Entwicklungen in der Berechnung vorwegzunehmen und so ihre Auswirkungen bereits vor der Umsetzung einer Massnahme beurteilen zu können. Als Beispiel kann hier die Wirksamkeit des Schienenschleifens im Eisenbahnlärm oder die Diskussion lärmarmen Start- und Landeverfahren im Fluglärm genannt werden.

Die Validierung heutiger Berechnungsmodelle erfolgt nicht mehr ausschliesslich im Vergleich zu Messungen sondern es werden in zunehmendem Masse akustische Referenzmodelle eingesetzt, welche Lösungen der Wellengleichung entweder im Zeit- oder Frequenzbereich suchen. Durch ihre konsequente Orientierung an den zugrundeliegenden physikalischen Vorgängen sind diese Modelle in der Lage, die auftretenden akustischen Phänomene sowohl einzeln als auch in ihrer Wechselwirkung korrekt wiederzugeben. Aufgrund des enormen Bedarfs an Speicher und Rechenzeit ist aber ein grossflächiger Einsatz vorläufig noch nicht realisierbar, weshalb als Beurteilungsinstrument weiter auf die einleitend beschriebenen Engineering-Modelle abgestellt wird.

### **2.3.3 Systematische Abweichungen bei verschiedenen methodischen Ansätze**

[12], [16], [22], [28], [30], [44], [48]

In Abschnitt 0 wird die Frage der Unsicherheit von Messungen und Berechnungen ausführlich behandelt. Die systematischen Unsicherheiten von Berechnungen sind aber so eng mit den verwendeten Methoden verknüpft, dass es sinnvoll erscheint, diese Frage bereits hier zu behandeln.

Solange bestimmte Einflussfaktoren auf die Unsicherheit von Berechnungen nicht als solche erkannt werden, ist das Ergebnis mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet. Solche Einflussfaktoren können z. B. durch die Verfeinerung der Berechnungsmethoden eliminiert werden. Das Ergebnis wird genauer, aber es weist nun möglicherweise eine systematische Abweichung gegenüber früheren Beurteilungsgrundlagen auf. Solche Abweichung müssen bei der Festlegung von Grenzwerten und bei der Berechnung von Beurteilungspegeln berücksichtigt werden.

Die folgende unvollständige Liste von Beispielen illustriert die Problematik:

- Bei der Fluglärmrechnung bestehen verschiedene methodische Unterschiede bei der Quellenstärke: Berechnungen mit FLULA2 führen im Mittel zu 1 bis 2 dB höheren Pegeln als Berechnungen mit Verfahren wie INM oder DOC.29, welche für die Quellenbeschreibung NPD-Daten (Noise Power Distance) verwenden. Der Hauptgrund liegt in unterschiedlichen Definitionen der Quellenstärke. FLULA2 berechnet die Schallenergie des ganzen Flugs, während die NPD-Daten nur den Ausschnitt bis 10 dB unter dem Maximalpegel berücksichtigen. Weiter vernachlässigen die NPD-Daten die Tatsache, dass die Flugzeuge leicht seitlich höhere Schallpegel erzeugen als im senkrechten Überflug.
- Nicht in allen Ausbreitungsmodellen wird der Einfluss von Wind und Temperaturschichtungen berücksichtigt. Der Unterschied kann in der Nacht wegen der typischerweise vorherrschenden Inversionslagen auch im Jahresmittel mehrere Dezibel betragen.
- Eine detailliertere Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit in Empfängernähe führt bei akustisch harten Böden im Vergleich zu einfacheren Modellen zu einer Erhöhung der berechneten Immission.
- Stark vereinfachende Annahmen bei den Eingabedaten von Berechnungen reduzieren zwar den Berechnungsaufwand, können aber zu erhöhten Unsicherheiten führen. Beispiel: Verwendung mittlerer Flugbahnen anstelle von mehreren im Raum verteilter Einzelflugbahnen.

Je nach Aufgabenstellung ist ein entsprechendes Rechenmodell einzusetzen. Für eine rasche Überslagsberechnung genügt ein einfaches Modell mit grösserer Unsicherheit. Wenn die Belastung aber nahe beim entsprechenden Grenzwert liegt, muss mit einer Präzisionsberechnung und entsprechend grossem Aufwand die Unsicherheit so klein wie möglich gehalten werden.

Die Zuverlässigkeit verwendeter Berechnungs-Werkzeuge müssen durch Validierungen, z. B. durch den Vergleich mit genau kontrollierten Messungen, ausgewiesen werden.

#### **2.3.4 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs**

Engineering-Modelle der neuesten Generation sind in der Lage, die klassische Zielgrösse der Lärmbeurteilung, den A-bewerteten Mittelungspegel, mit gegenüber den empirischen Modellen aus den 80er Jahren bedeutend grösserer Genauigkeit resp. mit geringerer Unsicherheit abzubilden (vgl. dazu auch Abschnitt 0). Die Orientierung an den physikalischen Mechanismen der Schallentstehung und -abstrahlung und die spektrale Berechnung erlauben es, die Auswirkung von Veränderungen sowohl bei den Emissionen als auch bei den Ausbreitungsbedingungen richtig wiederzugeben. Innerhalb der bestehenden Modelle besteht punktuell Verbesserungsbedarf. Einerseits indem bereits berücksichtigte Phänomene verfeinert und andererseits indem bisher nicht oder nur pauschal abgebildete Effekte wie z. B. der Turbulenzeinfluss bei der Schallausbreitung ergänzt werden. Das entsprechende Optimierungspotenzial ist jedoch beschränkt. Mit einem eigentlichen Quantensprung ist erst zu rechnen,

wenn es gelingt, die heute nur in Referenzmodellen verfügbaren wellentheoretischen Ansätze auch für breite Anwendungsgebiete zu erschliessen.

Wie bereits erwähnt, sind die heute zur Verfügung stehenden Modelle darauf ausgerichtet, die akustischen Basisgrössen zu reproduzieren, welche für Beurteilungen im Vergleich zu heutigen Grenzwerten benötigt werden. Sie liefern somit nur integrale Grössen, sei es nun ein Mittelungs- oder ein Maximalpegel. Ohne Informationen über den zeitlichen Signalverlauf reichen diese Resultate jedoch nicht aus, um sämtliche denkbaren akustischen Beschreibungsgrössen zu reproduzieren. Während für einige psychoakustische Masse wie z. B. die Lautheit eine zeitlich und spektral hoch aufgelöste Darstellung von Mittelwerten für die Berechnung ausreicht, erfordern andere Masse wie z. B. die Rauigkeit Kenntnis des Schalldruckzeitverlaufs. Die Prognose solcher Zeitverläufe erscheint aus heutiger Sicht auf absehbare Zeit hinaus nicht möglich. Dagegen ist die Berechnung von zeitabhängigen Spektren in Reichweite. Ansatzweise wird dies bereits heute gemacht, beispielsweise in FLULA2, welches Überflüge in ihrem zeitlichen Verlauf nachbilden kann oder mit dem Verfahren SL-2000 resp. SonGun, welches aufgrund einer Laufzeitinformation Geschoss- und Mündungsknall zeitlich richtig überlagert.

Ein erster Forschungsbedarf ergibt sich in der Verbesserung der Prognoseverfahren derart, dass die Forderungen aus der Lärmwirkungsforschung (wie z.B. die Berechnung der Flankesteilheit des Pegelanstiegs bei einer Zugsdurchfahrt) erfüllt werden können.

Wichtiger erscheint aber die Frage der systematischen Abweichungen von Berechnungsmodellen gemäss Abschnitt 2.3.3 in ihrer Auswirkung auf die Belastungs-Wirkungsbeziehungen. Es muss davon ausgegangen werden, dass nationale und internationale Studien zu Lärmwirkung, bei welchen die Belastung mittels älteren Berechnungsverfahren ermittelt wurde, durch die systematischen Fehler bei der Immissionsberechnung verfälscht wurden. Da die Belastungs-Wirkungsbeziehungen direkt in die Grenzwertfestlegung einfließen, wirkt sich die Qualität der verwendeten Berechnungsmodelle unmittelbar auf die resultierenden Grenzwerte aus. Die Verwendung moderner Berechnungsmodelle bei der Beurteilung führt dann im Vergleich mit den Grenzwerten zu Inkonsistenzen, sofern letztere basierend auf überholten Modellen erarbeitet wurden. Das Festhalten an alten Modellen kann grundsätzlich nicht die Lösung sein, da im Sinne einer Gleichbehandlung der Betroffenen erkannte systematische Fehler behoben werden müssen. Die Schlussfolgerung lautet dementsprechend umgekehrt, dass die Datengrundlagen existierender Lärmwirkungsstudien regelmässig überprüft und bei Bedarf angepasst werden müssen.

Auf Grund der bedeutenden Entwicklung der Berechnungsverfahren seit Festlegung der Grenzwerte und der grossen Bedeutung von systematischen Abweichungen erachten wir deshalb den Handlungsbedarf aus Sicht der Leitfrage A.4. hoch.

Tabelle 2-3: Bewertung des Handlungsbedarfs in der Leitfrage A.4

Leitfrage	Thema	Handlungsbedarf
A.4	Haben sich die methodischen Ansätze und die Möglichkeiten in der akustischen Simulationstechnik seit Inkrafttreten der LSV derart verändert resp. verbessert, dass sich dies allenfalls auf die Festlegung der Lärmimmissionsgrenzwerte auswirken würde?	Hoch

## 2.4 Grössenordnungen von Mess- und Berechnungsunsicherheiten und ihre Konsequenzen

### 2.4.1 Problemstellung

[12], [25], [44], [48], [49], [50]

Berechnungen und Messungen weisen zufällige und systematische Unsicherheiten auf. Unterschiedliche Berechnungsverfahren können für dieselbe Situation unter identischen Betriebsbedingungen Belastungswerte liefern, die mehrere Dezibel voneinander abweichen. Eine ungenaue Bestimmung der Belastung macht eine Beurteilung schwierig und unsicher. Dies relativiert auch die daraus abgeleiteten Massnahmen und Entscheidungen.

Mess- und Berechnungsunsicherheiten sind nichts Ungewöhnliches. Technik und Naturwissenschaft haben gelernt, mit ihnen umzugehen. In der Umweltakustik hat man die entsprechenden Fragen oft etwas verdrängt, jedoch hat sich im letzten Jahrzehnt ein deutlich verstärktes Bewusstsein entwickelt. Für ein Akustikgutachten eines seriösen Ingenieurbüros sollte es heute selbstverständlich sein, zum Mess- und Berechnungsergebnis auch die Unsicherheiten anzugeben und die Folgen der Unsicherheit zu diskutieren. Bei den Behörden und in der rechtlichen Beurteilung ist man sich häufig über den Umgang mit Unsicherheiten nicht im Klaren und es fehlen oft explizite Regeln dazu.

Bei der Frage der Festlegung von Grenzwerten spielen Unsicherheiten selbstverständlich eine Rolle. Die den Grenzwerten zugrunde gelegte Belastungs-Wirkungsbeziehungen basieren auf Messungen oder Berechnungen der Lärmbelastung an den Befragungsorten. Die Lärmwirkungsforscher vernachlässigen dabei häufig den Umstand, dass die ermittelte akustische Belastung zum Teil mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Sie gehen von der Annahme aus, dass es sich beim rechnerisch oder messtechnisch ermittelten Wert um einen Mittelwert handelt, welcher der beste Schätzer für den wahren, jedoch unbekanntem Wert ist. Unter Umständen können aber nicht erkannte systematische Effekte das Mess- oder Berechnungsergebnis und damit die Belastungs-Wirkungsbeziehung verfälschen. Die Grenzwerte und auch Boni/Mali werden auf Basis der entsprechenden Studien festgesetzt. In den nachfolgenden Jahren oder Jahrzehnten werden die Belastungen mittels Messungen und/oder Berechnungen ermittelt, die sich aber methodisch sowie in ihren Resultaten erheblich von

den Verfahren unterscheiden können, die bei der Ermittlung der Dosis-Wirkungskurven angewendet wurden.

#### **2.4.2 Grössenordnungen von Messunsicherheiten**

[12], [25], [48]

Die Messunsicherheit wird durch die verwendeten Messgeräte sowie durch lokale Einflussfaktoren bestimmt. Dabei gilt es zu unterscheiden zwischen Messungen, die manuell durchgeführt und begleitet werden und Messungen, die automatisch erfolgen.

Die rein apparative Messunsicherheit einer modernen Messkette beträgt rund ein halbes Dezibel.

Begleitete Messungen sind naturgemäss gut kontrolliert. Am Messort befindet sich eine ausgebildete Person, welche die Messung überwacht, den Einfluss von Fremdgeräuschen situationsbezogen beurteilen und entsprechende Korrekturmassnahmen ergreifen kann. Bei kontrollierten Messungen kann für die Messpunkte selbst von einer totalen Unsicherheit von typisch weniger als 1 dB ausgegangen werden. Meist werden die Ergebnisse allerdings auf ganze Gebiete übertragen, wodurch die Aussageunsicherheit zunimmt.

Bei automatischen Messanlagen ist eine lückenlose Kontrolle sehr schwierig, weil sie im Nachhinein im Labor stattfinden muss. Ohne weiteres möglich sind allerdings Stichproben. Algorithmen zur automatischen Trennung von Fremdgeräuschen und Signal sind in vielen Fällen noch mit grösseren Fehlern behaftet (siehe Abschnitt 2.2.4). Insgesamt können sich bei automatischen Messstationen systematische Fehler ergeben, die deutlich über 1 dB liegen können.

Neben dem Fremdgeräusch sind speziell bei Mikrofonen von Fluglärm-Monitoringstationen als weitere lokale Einflussfaktoren Reflexionen an Hausdächern etc. zu beachten. Sie können im Vergleich zum gesuchten Wert im freien Gelände zu systematischen Fehlern von 2 bis 3 dB führen.

Die oben aufgeführten Aussagen gelten für aktuelle Messungen. Die gleiche Grössenordnung dürfte jedoch auch für Messungen zutreffen, die anfangs der 80er Jahre durchgeführt und teilweise zur Bildung von Belastungs-Wirkungsbeziehungen verwendet wurden.

#### **2.4.3 Grössenordnung von Berechnungsunsicherheiten**

[12], [25], [48]

Bei Berechnungen ist zwischen der Unsicherheit in der Beschreibung der Schallquelle und der Unsicherheit in der Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge zu unterscheiden.

Die Unsicherheit der Beschreibung der Schallquelle hängt vom Detaillierungsgrad der akustischen Charakterisierung ab. Sie ist von Lärmart zu Lärmart verschieden. Überdies ist zu

unterscheiden, ob Aussagen zu einem ganzen Quellenmix oder zu einzelnen Quellen benötigt werden. So ist beispielsweise beim Strassenlärm der Quellenwert des durchschnittlichen Lastwagens sehr genau bekannt währenddem die Emissionen von Lastwagen zu Lastwagen um mehrere Dezibel variieren können. Beim Fluglärm muss man im Mittel von einer Standardunsicherheit in der Quellenbeschreibung von ein bis zwei Dezibel ausgehen. Beim neuen Eisenbahnlärmmodell sonRAIL wird eine Unsicherheit des Emissionsmodells kleiner als 1 dB angestrebt.

Die Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge dagegen ist prinzipiell unabhängig von der Lärmart. Die sich dabei ergebenden Unsicherheiten hängen stark von der Ausbreitungssituation ab. So ist die bodennahe Ausbreitung über grössere Distanzen starken, meteorologisch bedingten Schwankungen unterworfen, die die Berechnungsunsicherheit vergrössern. Abschirmungen und Reflexionen an Objekten erschweren die Berechnung weiter. Im Sinne eines groben Richtwerts kann die Berechnungsunsicherheit moderner Modelle für bodennahe Ausbreitung auf ca. 1 dB pro 100 m Ausbreitungsdistanz abgeschätzt werden.

Untersuchungen beim Fluglärm zeigen ebenfalls, dass die Unsicherheit der Modelle mit der Distanz zwischen Quelle und Empfänger zunimmt und hauptsächlich durch meteorologische Effekte dominiert wird. Beim Fluglärm ist die Standardunsicherheit in der Modellierung der Schallausbreitungsvorgänge wegen der nicht bodennahen Ausbreitung kleiner als bei anderen Lärmarten. Sie dürfte in einer Distanz von einem Kilometer rund 1 bis 2 dB betragen und mit rund 0.5 dB pro Kilometer zunehmen.

Die vorgängig aufgeführten Unsicherheitswerte gelten für heutige Berechnungsmodelle und -verfahren. Sie beziehen sich auf den Pegel von Einzelereignissen. Die Standardunsicherheit des Mittelungspegels dürfte bei heutigen Modellen tiefer liegen. Die Unsicherheit älterer Rechenverfahren dürfte rund doppelt so hoch sein, da insbesondere meteorologische Effekte noch gänzlich unberücksichtigt blieben.

#### **2.4.4 Konsequenzen der Mess- und Berechnungsunsicherheiten**

[12], [48]

Wie soll nun aber mit den beschriebenen Unsicherheiten umgegangen werden? Wie soll beispielsweise die Rechtssicherheit gewahrt werden, wenn verschiedene Berechnungsverfahren eingesetzt werden, die nachweislich unterschiedliche Ergebnisse liefern? Wie sind Grenzwertüberschreitungen zu beurteilen, wenn bei der Ermittlung des Ist-Zustands einer Belastung Rechenmodelle eingesetzt werden, die sich in ihren Resultaten von denjenigen systematisch unterscheiden, die bei der Festlegung der Grenzwerte verwendet wurden?

Einige Empfehlungen und Anregungen der Dissertation Thomann (Mess- und Prognoseunsicherheit beim Fluglärm) werden im Folgenden als Diskussionsbeitrag aufgeführt:

- Bei der Festlegung der Immissionsgrenzwerte und bei der Ermittlung und Beurteilung von gesetzlich relevanten Belastungen sollten generell nur Berechnungsverfahren eingesetzt

werden die validiert sind und keine systematischen Abweichungen gegenüber Belastungswerten zeigen, die von Messungen stammen.

- Falls Verfahren und Modelle zur Ermittlung und Beurteilung von gesetzlich relevanten Belastungen eingesetzt werden, sollten ihre Standardunsicherheiten einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten (nachfolgend als „Grenzunsicherheit“ bezeichnet); die Ermittlung und Festlegung dieser Grenzunsicherheit sollte sich dabei am gültigen Belastungsgrenzwertschema orientieren.
- Grenzunsicherheiten sollten von den eingesetzten Berechnungsverfahren (und Messverfahren) auf einem noch zu definierenden Konfidenzniveau eingehalten werden; die Festlegung dieses Konfidenzniveaus sollte sich dabei an den technischen Möglichkeiten orientieren (was können Berechnungsverfahren bezüglich Berechnungsunsicherheit überhaupt leisten?) und juristisch begründet werden (welche Irrtumswahrscheinlichkeiten sind aus rechtlichen Überlegungen noch tolerierbar?).
- Werden zur Beurteilung von Grenzwertüberschreitungen verschiedene Berechnungsverfahren angewendet, sollten die jeweiligen Standardunsicherheiten als Vorhaltemass zum berechneten Belastungswert addiert werden. Dieser erhöhte Belastungswert kann dann zur Beurteilung der Lärmbelastung verwendet werden. Abschätzverfahren mit hoher Ungenauigkeit ergeben auf diese Weise in der Regel höhere Werte als genaue Verfahren mit kleinen Unsicherheiten.

#### 2.4.5 Fazit und Beurteilung des Handlungsbedarfs

Das Festlegen von Belastungsgrenzwerten und Berechnungs- resp. Messverfahren für Beurteilungspegel, welche den Grenzwerten gegenübergestellt werden sollen, gehört zusammen. Diese Zusammengehörigkeit ist beim Strassen- und Eisenbahnlärm nicht mehr gegeben. Heute werden andere Verfahren und Modelle eingesetzt als bei der Festlegung der Immissionsgrenzwerte verwendet wurden. Aus diesem Grunde und unter Einbezug der im vorherigen Abschnitt 2.4.4 zur Diskussion gestellten Fragen wird der Handlungsbedarf als mittel eingestuft.

**Tabelle 2-4: Bewertung des Handlungsbedarfs in der Leitfrage A.5**

Leitfrage	Thema	Handlungsbedarf
A.5	Messungen und Berechnungen sind mit quantifizierbaren Unsicherheiten behaftet. Welchen Stellenwert haben diese Unsicherheiten bei der Festlegung der Immissionsgrenzwerte?	Mittel

### 3 Gesamtbeurteilung und Handlungsbedarf

In der nachfolgenden Tabelle werden die Beurteilungen und Bewertungen des Handlungsbedarfs in der Dimension Akustik bezogen auf die unter Kapitel 1.3 gestellten Leitfragen zusammengefasst.

**Tabelle 3-1: Übersicht der Bewertung des Handlungsbedarfs in der Dimension Akustik.**

<b>Leitfrage</b>	<b>Thema</b>	<b>Handlungsbedarf</b>
A.4	Haben sich die methodischen Ansätze und die Möglichkeiten in der akustischen Simulationstechnik seit Inkrafttreten der LSV derart verändert resp. verbessert, dass sich dies allenfalls auf die Festlegung der Lärmimmissionsgrenzwerte auswirken würde?	Hoch
A.3	Haben sich die technischen Möglichkeiten der akustischen Messung seit Inkrafttreten der LSV derart verändert resp. verbessert, dass sich dies allenfalls auf die Festlegung der Lärmimmissionsgrenzwerte auswirken würde?	Mittel
A.5	Messungen und Berechnungen sind mit quantifizierbaren Unsicherheiten behaftet. Welchen Stellenwert haben diese Unsicherheiten bei der Festlegung der Immissionsgrenzwerte?	Mittel
A.1	Genügt das Konzept der Beurteilungspegel als Summe eines Mittelungspegels und einer oder mehrerer Korrekturen, um die Beeinträchtigung durch Lärm (Belästigung, Schlafstörung, Gesundheitsgefährdung) angemessen abbilden zu können?	Keiner
A.2	Ist der von der LSV gewählte Geltungsort der Immissionsgrenzwerte aus akustischer Sicht geeignet, die Störwirkung beim Lärmbetroffenen zu erfassen?	Keiner
<b>Handlungsbedarf aus Sicht der Akustik:</b>		<b>Mittel</b>

In Ergänzung zur Bewertung von Tabelle 3-1, werden in der nachfolgenden Tabelle 3-2 die in Kapitel 1.4 aufgelisteten Leitfragen der Dimension „Lärmwirkung“, welche einen starken Bezug zur Akustik haben, bezüglich Handlungsbedarf bewertet.

**Tabelle 3-2: Übersicht der Bewertung des Handlungsbedarfs bei Leitfragen in der Dimension Lärmwirkung, die sich auf die „Akustik“ beziehen.**

Leitfrage	Thema	Handlungsbedarf
W.3	Sind die in der LSV implementierten Betrachtungszeiträume (z.B. Mittelung über ein Jahr) noch sinnvoll bzw. dem Lärmgeschehen angemessen?	Klein
W.7	Ergibt sich aus der Nicht-Berücksichtigung der Kombinationswirkung verschiedener gleich- als auch verschiedenartiger Lärmquellen ein Handlungsbedarf?	Klein
W.5	Sind alle in der LSV behandelten Quellen akustisch ausreichend beschrieben?	Mittel

**W.3:** In Fragen der Betrachtungszeiträume hat die Akustik heute wesentlich bessere Möglichkeiten zur Messung und vor allem Berechnung. Wenn sich aus der Sicht der Lärmwirkungsforschung Bedarf nach z. B. feineren Auflösungen der Berechnung ergibt, kann dies technisch vollzogen werden. So sind bereits heute Fluglärmrechnungen im 1h-Raster möglich. Es muss selbstverständlich die Frage des Aufwands der Bereitstellung der Betriebsdaten im Verhältnis zum Nutzen beantwortet werden. Aus rein akustischer Sicht lässt sich nur ein geringer Handlungsbedarf ausmachen. Die Frage muss von der Lärmwirkungsforschung beantwortet werden.

**W.7** Auch diese Frage ist hauptsächlich aus Sicht der Lärmwirkungsforschung zu beantworten. Mit den heutigen technischen Mitteln wäre es bei Vorliegen von funktionierenden Konzepten zur Berücksichtigung von Kombinationsbelastung viel einfacher als früher, Messungen und vor allem Berechnungen durchzuführen. Aus rein akustischer Sicht lässt sich nur ein geringer Handlungsbedarf ausmachen.

**W.5:** Zweifellos könnte die rein akustische Beschreibung verfeinert werden. Gerade bei beim laufenden Eisenbahnlärmprojekt SonRail [1] sind entsprechende Bestrebungen auch im Gang. Der Vorteil bei dieser Lärmart liegt wie beim Fluglärm darin, dass der Betrieb nach Fahrplan verläuft und recht genau bekannt ist, welche akustischen Quellen erwartet werden können. Bei Fluglärm könnte die akustische Beschreibung noch verbessert werden, in dem der Einfluss verschiedener Parameter bei Start und Landung berücksichtigt wird. Bei Straßenlärm wäre eine feinere Beschreibung der Quellen technisch denkbar, jedoch ist der Aufwand wegen der Verschiedenheit der Quellen und der individuellen Fahrweise um Grössenordnung komplizierter. Inwiefern durch die verfeinerte Beschreibung der Quellen eine Verbesserung der Beurteilung des Belästigung und Schlafstörung erreicht wird, muss abgeklärt werden. Aus rein akustischer Sicht ergibt sich ein mittlerer Handlungsbedarf.

## Fazit

Bei der Beurteilung von Lärm haben sich in den letzten Jahren einige wenige akustische Belastungsmasse etabliert. Sie basieren in der Regel auf dem Mittelungspegel und dem Maximalpegel, aus denen schliesslich mit verschiedenen Korrekturen Beurteilungspegel gebildet werden. Die Fortschritte der akustischen Messtechnik und der akustischen Prognoseverfahren seit den 80er Jahren sind gross. Es wäre heute bei Messungen gut möglich, komplexere akustische Masse zu ermitteln. Bei den Berechnungsverfahren sind aus verschiedenen Gründen Grenzen gesetzt. Weiterentwicklungen sind aber anzustreben. Offen bleibt, welche Ideen für neue akustische Belastungsmasse zukünftig aus der Lärmwirkungsforschung hervorgehen.

Trotz der starken Entwicklung der Messtechnik besteht eine gute Vergleichbarkeit der früheren mit den heutigen Verfahren. Grössere Unterschiede zeigen sich bei den Berechnungsverfahren. Dabei können heute Berechnungen für Situationen durchgeführt werden, die früher nicht möglich waren (z. B. Einfluss Meteo in der Nacht). Zudem sind heute die akustischen Quellen besser beschrieben. In diesem Sinne können sich heutige Berechnungsergebnisse deutlich von früheren unterscheiden. Die Berechnungsverfahren haben sich heute so weit entwickelt, dass in vielen Situationen eine Messung nicht mehr notwendig ist, weil die Unsicherheit von Berechnung und (mit vernünftigem Zeitaufwand durchgeführte) Messung in der gleichen Grössenordnung liegen.

Im letzten Jahrzehnt ist das Bewusstsein für die Problematik der Mess- und Berechnungsunsicherheit in der Akustik gestiegen.

Wegen der deutlichen Verbesserung der akustischen Verfahren und des erhöhten Einbezugs der Unsicherheitsproblematik kann insgesamt aus Sicht der Akustik ein mittlerer Handlungsbedarf zur Überprüfung der Lärmgrenzwerte und der Verfahren zur Ermittlung der Beurteilungspegel abgeleitet werden. Die Akustik kann der Lärmwirkungsforschung neue und bessere Werkzeuge zur Verfügung stellen oder neu entwickeln. Sie kann damit einen Beitrag für eine verbesserte Qualität von Untersuchungen leisten, welche erforderlich sind um den im Inputpapier "Lärmwirkung" aufgeführten Handlungsbedarf zu erfüllen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bafu (2008): *SonRail. Lärmsimulation für Eisenbahnen*,  
<http://www.bafu.admin.ch/laerm/01146/06267/index.html?lang=de>
- [2] Beranek L. L. (1971): *Noise and Vibration Control*, McGraw- Hill
- [3] Beranek L. L. (1988): *Acoustics Measurements*, ASA American Institut of Physics
- [4] BUS (Hrsg.) (1983): *Strassenlärmmodell für überbaute Gebiete*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 15, Bundesamt für Umweltschutz (BUS), Bern
- [5] BUS (Hrsg.) (1986): *StL-86 ComputermodeLL zur Berechnung von Strassenlärm*, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 60, Bundesamt für Umweltschutz, Bern (StL-86+: Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung Nr. 6 (1995), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.)
- [6] BUS (Hrsg.) (1987): *Anleitung zur Ermittlung und Beurteilung von Lärmimmissionen an Strassen*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 57, Bundesamt für Umweltschutz, Bern
- [7] Buwal (Hrsg.) (1989): *Grobverfahren zur Bestimmung von Eisenbahnlärm*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 114, Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft, Bern
- [8] Buwal (Hrsg.) (1990): *SEMIBEL, Version 1, Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm*, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 116, Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft, Bern
- [9] Buwal (Hrsg.) (1995): *Methode zur Ermittlung der Aussenlärm-Immissionen bei geschlossenem Fenster*. Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung Nr. 7, Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft, Bern
- [10] DIN 45631 (1991): *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum; Verfahren nach E. Zwicker*
- [11] DIN 45681 (2005): *Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen*
- [12] Eggenschwiler K., Heutschi K., Wunderli J. M., Emrich F., Bütikofer R. (2008): *Lärmbekämpfung*. Vorlesungsskript ETH, Studiengang Umweltingenieurwissenschaften. Empa Dübendorf
- [13] Empa (2004): *Übersicht über Fluglärmrechnungsverfahren – Situationsanalyse und Standortbestimmung im Rahmen der vom Buwal zur erlassenden Empfehlung für Fluglärmrechnungsverfahren (LSV Art. 38 Abs. 2)*. Empa, Abteilung Akustik, Bericht Nr. 433'411 - 1 / 513.2216, 22. Dezember 2004

- [14] Empa (2006): *Zürcher Fluglärmindex ZFI – Berechnungsvorschrift*. Bericht im Auftrage der Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich. Bericht Nr. 441'255, Empa, Abteilung Akustik, Dübendorf, 13.09.2006.
- [15] Europäischen Parlaments und des Rat (2002): *Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*
- [16] European Civil Aviation Conference (2005): *Report on Standard Method of Computing Noise Contours Around Civil Airports*, Volume 1: Applications Guide. Volume 2: Technical Guide. ECAC/CEAC Doc No. 29, 3rd Edition. European Civil Aviation Conference
- [17] Fasold W., Kraak W., Schirmer W. (1984): *Taschenbuch der Akustik*, Verlag Technik, Berlin
- [18] Gulding J.M., J.R. Olmstead, G.G. Fleming (1999): *Integrated Noise Model (INM), Version 6.0, User's Guide*. Federal Aviation Administration (FAA), Department of Transportation, Report No FAA-AEE-99-03
- [19] Heckl M., Müller H. A. (1994): *Taschenbuch der technischen Akustik*, Springer
- [20] Hellbrück J., Ellermeier W. (2004) *Hören. Physiologie, Psychologie und Pathologie*. Hogrefe Verlag, 2. aktualisierte und erweiterte Auflage
- [21] Heutschi K. (2004): *SonRoad. Berechnungsmodell für Strassenlärm*, Schriftenreihe Umwelt SRU, Buwal, Bern
- [22] Heutschi K., Hofmann J. (2006): *SonRoad-M. Strassenlärm in grossen Abständen*. Forschungsauftrag ASTRA 2001/053
- [23] Hofmann R., Rosenheck A. (1978): *Berechnungsmodell für Eisenbahnlärm*, Empa Dübendorf
- [24] Hofmann, R. (1987): *Lärmbekämpfung in der Schweiz*. Vorlesungsskript Eidgenössische Technische Hochschule, Hrsg. Empa, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung, Dübendorf
- [25] Hofmann, R. (1997): *Lärm und Lärmbekämpfung in der Schweiz*. Vorlesungsskript Eidgenössische Technische Hochschule, Studiengang Umweltingenieurwissenschaften. Hrsg. Empa, Abteilung Akustik, Dübendorf
- [26] Hohmann B. (2008): *Soundscape – Ansatz zu einer Begriffsklärung*, DAGA 2008 Dresden.
- [27] IEC 651 (1979): *Sound Level Meters*. International Electrotechnical Commission
- [28] ISO/DIS 20906 (2008): *Acoustics - Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports*.

- [29] Kalivoda M., Steiner J. W. (1998): *Taschenbuch der angewandten Psychoakustik*, Springer
- [30] Krebs W. (2006): *Spectral Tree-Dimensional Sound Directivity Models for Fixed Wing Aircraft*. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 92 (2006), 269-277
- [31] Lauber A. (1976): *Lärmbekämpfung, Strassenverkehrslärm*, Vorlesungsskript ETHZ
- [32] Lazarus H., Sust Ch., Steckel R., Kulka M., Kurtz P. (2007): *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*, Springer
- [33] Lercher P., Schulte-Fortkamp B. (2003): *Die Relevanz der Soundscape-Forschung für die Bewertung der Lärmbelastigung im kommunalen Bereich*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 50 (2003). Nr. 6 - November
- [34] Möser, M. (Hrsg.) (2009): *Messtechnik der Akustik*. Springer
- [35] Müller G., Möser M. (2004): *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer-Verlag, Berlin 2004, 3. Auflage
- [36] Rossing T. D. (Ed.) (2007): *Springer Handbook of Acoustics*. Springer
- [37] Schick A. (1990): *Schallbewertung. Grundlagen der Lärmforschung*. Springer
- [38] Schmid M., Heutschi K, Wunderli J.-M., Höin R. (2006): *PC-Programm SonGun V 1.0 zur Berechnung von Schiesslärm*. Umwelt-Vollzug Nr. 0635. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [39] SN EN ISO 80000-8 (2007): *Grössen und Einheiten - Teil 8: Akustik* (ISO 80000-8:2007, berichtigt 2007-08-15)
- [40] SN EN 60804 (1994): *Integrierende mittelwertbildende Schallpegelmesser*
- [41] SN EN 60942 (2003): *Elektroakustik - Schallkalibratoren*. (IEC 60942: 2003)
- [42] SN EN 61260 (1995): *Elektroakustik - Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven* (IEC 61260:1995)
- [43] SN EN 61672-1 (2003): *Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen*. (IEC 61672-1: 2002)
- [44] SN ENV 13005 (2000): *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. (Originaltitel: GUM, Guide to the expression of uncertainty in measurement)
- [45] SN ISO 1996-1 (2006): *Akustik - Beschreibung, Messung und Beurteilung von Umgebungslärm - Teil 1: Grundlegende Grössen und Beurteilungsverfahren*.
- [46] SN ISO 1996-2 (2007): *Akustik - Beschreibung, Beurteilung und Messung von Umweltlärm - Teil 2: Bestimmung des Umgebungslärmpegels*

- [47] Thomann, G. et al (2005): *FLULA2 - Ein Simulationsverfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung*. Technische Programmdokumentation. Empa, Abteilung Akustik
- [48] Thomann, Georg (2007): *Mess- und Berechnungsunsicherheit von Fluglärmbelastungen und ihre Konsequenzen*. Dissertation an der ETH Zürich, Nr. 17433, November 2007
- [49] VDI 3723 Blatt 1 (1993): *Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen*
- [50] VDI 3723 Blatt 2 (2006): *Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen - Teil 2: Qualitätsprüfung bei der Beurteilung von Geräuschsituationen*
- [51] Zwicker E., Fastl H. (2007): *Psychoacoustics. Facts and Models*. Springer