

ERFA-Seminar 25. Februar 2002**Grundlagen der Akustik und Lärmbekämpfung**

K. Eggenschwiler, EMPA Dübendorf

1. Lärmwirkung auf den Menschen**2. Gesetzliche Grundlagen**Lärmschutzverordnung
SIA-Norm 181, Schallschutz im Hochbau**3. Einführung in die Akustik**Luftdruck - Schalldruck - Schallausbreitung
Tonhöhe - Frequenz
Lautstärke - Schalldruckpegel
A-Bewertung - FAST-Zeitkonstante
Maximalpegel - Mittelungspegel
Dezibelarithmetik
Frequenzanalyse - Spektrum
Schallausbreitung**4. Beurteilungsgrössen gemäss Lärmschutzverordnung**

1. Lärmwirkung auf den Menschen

Lärm kann die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen schädigen. Die Lärmwirkungen sind abhängig von Lautstärkepegel (vor allem bei lauten Schallen) und Informationsgehalt (Störung und Belästigung). Die Folgen sind

- Gehörschäden
- Schlafstörungen
- Beeinträchtigung geistiger Arbeit durch Ablenkung und Störung der Konzentration

- Störung der Sprachverständlichkeit
- Beeinträchtigung von Freizeittätigkeiten, einschliesslich Ruhe und Erholung.

Im Alltag wird die gehörschädigende Wirkung, z.B. beim Musikgenuss oft unterschätzt. Auch wissenschaftlich ist die Beurteilung der Lärmwirkungen nicht einfach, besonders wenn es um Störung und Belästigung geht. Die quantitative Angabe des Schalldruckpegels kann nur Anhaltspunkte geben, z. B. in Form der *Tabelle 1*.

Tabelle 1 Lärmwirkungen

Belastung	L_{eq}	38*	55*	75*	85	$dB(A)$
	L_{max}	40*	65*	100*	130	$dB(A)$
Beanspruchung	Schlafbeeinflussung		physiolog. u. psych. Reaktionen			
			soziol. Reaktionen (Kommunikations- und Reaktionsstörungen)			
			Aufwachen			
			Leistungs- und Emotionsbeeinflussung			
			hohe Verärgerung (z.B. über Fluglärm)			
Medizinische Beurteilung			beginnende extraaurale Reaktionen			
			extraaurale Übersteuerung?			
			Lärmschwerhörigkeit			
	Abwägungsbereich					
	gesund		eher gesund	indifferent	eher krank	krank
Richtwert	belästigend		erheblich belästigend		gefährdend	
	benachteiligend		erheblich benachteiligend			
Richtwert	Planungswerte					
	Schwellenwerte					
			Zumutbarkeitswerte			
					Entschädigungswerte	
				Unzumutbarkeitswerte		

*Anhaltswerte

aus Griefahn B., Jansen G. Schallwirkungen auf den Menschen und Fragen des Gehörschutzes. Heckl M., Müller H. A, Taschenbuch der technischen Akustik.

2. Gesetzliche Grundlagen

Die schweizerische Lärmbekämpfung basiert auf dem 1985 in Kraft getretenen Umweltschutzgesetz (USG)¹ und der darauf aufbauenden **Lärmschutzverordnung LSV**, die am 1. April 1987 in Kraft gesetzt wurde.

Die Lärmbekämpfung orientiert sich am Vorsorgeprinzip: Lärmeinwirkungen sind unabhängig von der bestehenden Belastung so weit zu begrenzen, dass sie auch auf weitere zeitliche Sicht betrachtet weder lästig noch schädlich werden können. In der Lärmschutzverordnung sind zur Zeit die folgenden Lärmquellen geregelt:

- Strassenverkehrslärm
- Eisenbahnlärm
- Fluglärm (Regionalflughäfen und Flugfelder)
- Industrie- und Gewerbelärm
- Lärm von Schiessanlagen
- Lärm von Militärflugplätzen

Das Konzept der Lärmbekämpfung beruht in erster Linie auf Massnahmen zur Reduktion der Abstrahlung an der Quelle (Lärmemissionen):

- Technische Massnahmen (beste Lärmschutztechnik konsequent angewendet).
- Betriebliche, verkehrslenkende, verkehrsberuhigende Massnahmen.
- Bauliche Massnahmen bei der Quelle (z.B. Lärmschutzwände).

Erst in zweiter Linie sind immissionsseitige Massnahmen vorgesehen, also z.B. Schallschutz an Gebäuden (Schallschutzfenster), Baubeschränkungen etc.

Die Lärmschutzverordnung LSV regelt den Aussenlärm. Beurteilt wird der Lärm auf der Fassade eines Gebäudes (im offenen Fenster). Für den Schallschutz an Gebäuden verweist die LSV auf die anerkannten Regeln der Baukunde, insbesondere auf die **SIA-Norm 181**. Es wird der Schallschutz bei Aussenbauteilen, Trennbauteilen, Treppen und haustechnischen Anlagen geregelt. Die Norm gilt für neue Gebäude und Teile von bestehenden Gebäuden, die umgebaut, ersetzt oder neu eingebaut werden.

3. Einführung in die Akustik

Luftdruck - Schalldruck - Schallausbreitung

Physikalisch handelt es sich beim Luftschall um winzige Schwankungen des Luftdruckes (*Abb. 1*). Der Luftdruck beträgt auf der Erdoberfläche etwa 100'000 Pascal (1 Pascal = 1 Pa = 1 N/m² = 1 µbar). Wetteränderungen innerhalb Tagen kann ihn um 5000 Pa erhöhen oder erniedrigen. Eine Kniebeuge ändert den Luftdruck am Ohr um rund 10 Pa, normal laute Gespräche nur um 0.01 bis 1 Pa.

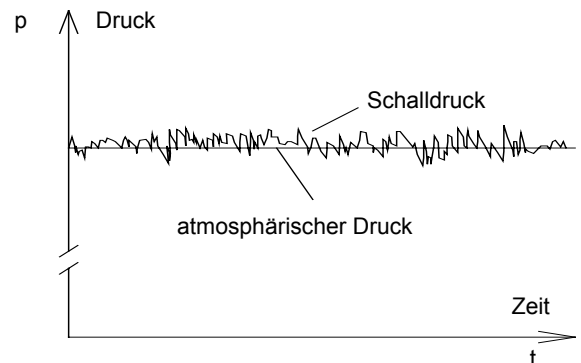


Abb. 1 Luftdruck - Schalldruck

Der Hörbereich des Menschen umfasst den Druckbereich von $2 \cdot 10^{-5}$ Pa bis 20 Pa (1 zu 1 Million). Wahrgenommen werden die Änderungen des Luftdruckes, wenn sie zwischen 20 und 20'000 Mal in der Sekunde erfolgen (20 Hz - 20'000 Hz)

Der Schall breitet sich mit Schallgeschwindigkeit $c = 340$ m/s als Welle aus. Es wird dabei Energie transportiert, nicht aber Materie (siehe *Abb. 2*).

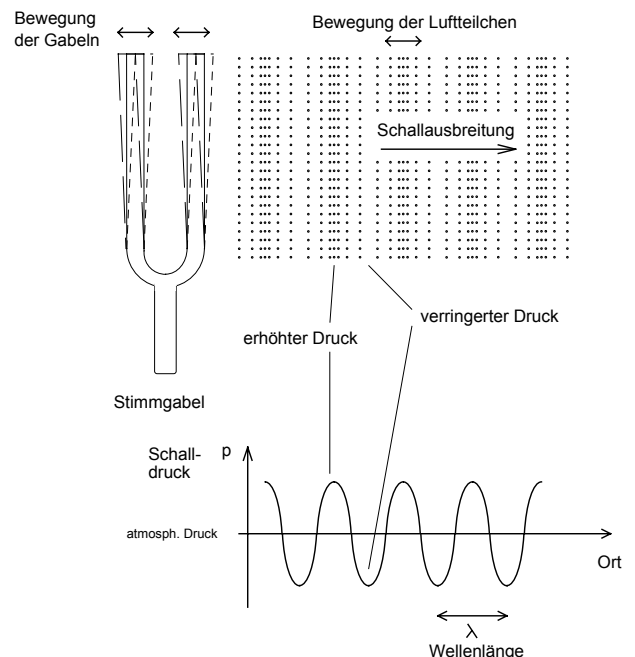
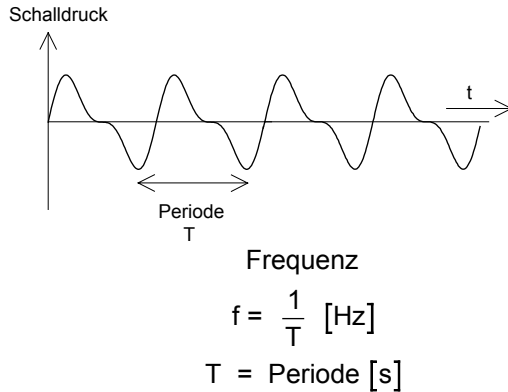


Abb. 2 Schallausbreitung

¹ Art. 1 des USG: "Dieses Gesetz soll die Menschen, Tiere und Pflanzen ... gegen schädliche oder lästige Einwirkungen schützen ..."

Tonhöhe - Frequenz

Die vom Menschen wahrgenommene Tonhöhe wird von der oben erwähnten Anzahl Änderungen des Luftdruckes pro Sekunde bestimmt. Sie wird technisch als Frequenz f bezeichnet und in Hertz (Hz) gemessen (siehe *Abb. 3*). Eine Periode der Zeitdauer T enthält eine periodisch auftretende Kurvenform.



27 Hz	Tiefster Klavierton
440 Hz	Stimmton (Kammerton)
1 kHz	Erster Ton des Radio-Zeitzeichens
15 kHz	Pfeifton des Fernsehbildschirmes

Abb. 3 Tonhöhe - Frequenz

In Anlehnung an die Musik und in Übereinstimmung mit der menschlichen Wahrnehmung wird eine Verdoppelung der Frequenz als Oktave bezeichnet. Entsprechend wird auch die Terz benutzt. Drei Terzsprünge ergeben eine Oktave.

Lautstärke - Schalldruckpegel

Das Gehörorgan kann - wie oben erwähnt - einen riesigen Schalldruckbereich verarbeiten. Die Werte sind unübersichtlich (siehe *Tabelle 2*) und entsprechen auch in keiner Weise dem Lautstärkeindruck (Die Wahrnehmung der Lautstärke ist nicht proportional dem Schalldruck oder der Schallintensität).

Tabelle 2 Zahlenwerte für verschiedene Höreindrücke

Schalldruck [Pa]	Schallintensität [W/m^2]	
0,00002	10^{-12}	Hörschwelle
0.1	$2.5 \cdot 10^{-5}$	Gespräch
2	0.01	Autohupe, in 5 Meter Abstand:
63	10	Schmerzschwelle

Aus diesen Gründen wurde der Schallpegel L in Dezibel (dB) eingeführt, welcher diese Nachteile zum grössten Teil vermeidet:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ [dB]}$$

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Der quadrierte Schalldruck p^2 wird in Bezug gesetzt zu einer Referenzgrösse p_0^2 , welche ungefähr der Hörschwelle entspricht. Der Pegel bei der Hörschwelle ist also 0 dB, jener an der Schmerzgrenze etwa 130 dB.

Das Schalldruckquadrat ist proportional zur Schallintensität (Schallenergie pro Sekunde pro Quadratmeter). Physikalisch ist die Schallintensität die zentrale Grösse der Akustik.

A-Bewertung, FAST-Zeitkonstante

Das Gehör ist nicht für alle Tonhöhen gleich empfindlich. Der oben definierte Schallpegel entspricht deshalb oft nicht der empfundenen Lautstärke eines Schalles.

Eine bessere Annäherung an die menschliche Wahrnehmung wird durch den Einsatz des sogenannten A-Filters gewonnen. Das A-Filter vermindert oder verstärkt das Schallsignal in den verschiedenen Tonhöhenbereichen gemäss der Empfindlichkeit des Gehörs. Die auf diese Weise gemessenen Pegel werden mit dB(A) bezeichnet. Man versucht auch, den Zusammenhang zwischen zeitlicher Struktur des Schallsignals und der dynamischen Eigenschaft des Gehörs zu berücksichtigen: Die "Trägheit" des Ohres wird bei der Messung durch den Einsatz einer Zeitbewertung simuliert (Zeitkonstante FAST). Die FAST-Zeitkonstante spielt vor allem bei der Messung des Maximal-Pegels (Schliesslärm) eine Rolle.

Gebräuchliche Schreibweisen für A-bewertete, mit der Zeitkonstante FAST gemessene Pegel sind die folgenden:

$$L = 63 \text{ dB(A,F)}$$

$$L_{A,F} = 63 \text{ dB}$$

Beispiele von Schallpegelwerten sind in der *Tabelle 3* angegeben.

Tabelle 3 Beispiele von Schallpegeln:

20 dB(A)	Ticken einer Taschenuhr:
30-40 dB(A)	Wohnquartier ohne Verkehr:
80-90 dB(A)	Lastwagen, anfahrend, in 5 Meter Abstand:
100 dB(A)	Autohupe, in 5 Meter Abstand:
120 dB(A)	Start eines Militärjets, in 50 Meter Abstand:

Die *Tabelle 4* enthält Entsprechungen von Schallpegelveränderungen und Wahrnehmungen. Achtung:

Eine Verdoppelung (resp. Halbierung) der gehörmässigen Lautstärkeempfindung entspricht bei Pegel über 40 dB rund einer Erhöhung resp. Verminderung des Schalldruckpegels um rund 10 dB, und nicht wie oft irrtümlich vertreten 3 oder 6 dB. Unter 40 dB kann schon eine Erhöhung von weniger als 10 dB als Lautstärkeverdoppelung empfunden werden.

Tabelle 4 Wahrnehmung von Schallpegel-Veränderungen:

Schallpegel-Veränderung	Beschreibung der Wahrnehmung
< 2 dB	kaum wahrnehmbar
2 - 4 dB	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderung
5 - 10 dB	deutlich wahrnehmbare Veränderung
11-19 dB	grosse und überzeugende Veränderung
> 20	überaus grosse und überzeugende Wahrnehmung

Achtung: Diese Tabelle gilt nur für Momentanpegel und nicht in allen Fällen für den Beurteilungspegel L_r gemäss Lärmschutzverordnung LSV

Maximalpegel L_{Max} - Mittelungspegel Leq

Da der Momentanpegel natürlich stark schwankt, ist eine geeignete Mittelwertbildung notwendig. In der Lärmschutzverordnung des Bundes wird überall der A-bewertete Mittelungspegel Leq als akustische Ausgangsgrösse benutzt, ausser beim Schiesslärm von 300m-Anlagen, wo der Einzelschusspegel (Maximalpegel) als akustisches Mass eingesetzt wird.

Die Abkürzung Leq steht für "energie-äquivalent". Es wird der Durchschnitt der Schalldruckquadrate - also der Schallintensitäten - an einem Immissionsort, über längere Zeit gebildet und dann der Pegel berechnet.

Wenn wir uns eine zeitliche Folge von Schallpegelwerten vorstellen, dann wird der Mittelwert also nicht wie gewohnt aus diese Werten arithmetisch berechnet, sondern nach den Regeln der Dezibelarithmetik: Arithmetisch gemittelt werden die quadrierten Schalldrucke (Schallintensitäten) vor dem Logarithmieren.

Der Maximalpegel L_{Max} hat, wie oben erwähnt, eine grosse Bedeutung bei der Beurteilung von impulsartigem Lärm. Dabei ist immer darauf zu achten, dass bei der Messung die richtige Zeitkonstante benutzt wird (in der Regel FAST).

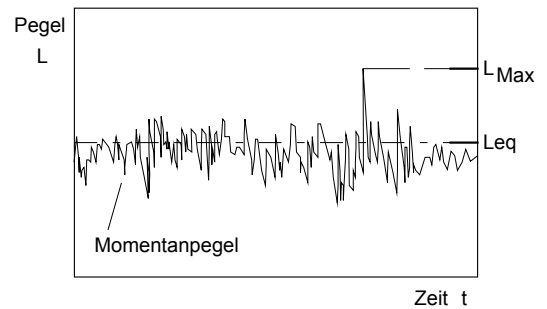


Abb. 4 Schallpegelaufzeichnung mit den Pegel-Grössen L_{Max} und Leq

Dezibelarithmetik. 0 dB + 0 dB = 3 dB

Das Arbeiten mit Dezibel bringt eine übersichtliche Darstellung, verursacht aber den meisten Leuten Kopfzerbrechen, weil die normalen Regeln der Arithmetik nicht mehr angewendet werden können. Die sonst einfachen Operationen wie Addition und Mittelwertbildung können erst vollzogen werden, nachdem die Pegel "entlogarithmiert" wurden. Vom Resultat muss schliesslich wieder der Logarithmus berechnet werden. Aus der Definition des Pegels ergeben sich folgende Rechenregeln:

• Pegeladdition²:

$$L_1 \oplus L_2 = 10 \cdot \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$$

Beispiele:

$$60 \oplus 60 = 10 \cdot \log(10^{60/10} + 10^{60/10}) = 63 \text{ dB}$$

$$60 \oplus 65 = 10 \cdot \log(10^{60/10} + 10^{65/10}) = 66 \text{ dB}$$

• Mittelwertbildung → "energetischer Mittelwert"

$$\bar{L} = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_N/10}}{N}\right)$$

Beispiel:

Pegel: 43 dB, 43 dB und 49 dB

Mittelwert:

$$\bar{L} = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{43/10} + 10^{43/10} + 10^{49/10}}{3}\right) = 46 \text{ dB}$$

• Ein Faktor F wird in der Dezibelarithmetik zu einem Summanden S:

$$S = 10 \cdot \log(F)$$

²Das Zeichen \oplus steht für Dezibeladdition.

Faktor	Pegel-Summand
2	+3 dB
4	+6 dB
10	+10 dB
100	+20 dB
0.5	-3 dB

Beispiel: Eine Verdoppelung des Verkehrs auf einer Strasse verursacht bei den Anwohnern eine Erhöhung des Mittelungspegels um 3 dB.

Frequenzanalyse - Spektrum

Die feinen Analyse-Fähigkeiten des menschlichen Gehörorgans sind durch die technischen Apparate eigentlich noch nicht übertroffen. Dies ist einer der Gründe, weshalb gemäss Anhang 6 (Industrie- & Gewerbelärm) der LSV die Beurteilung der Ton- und Impulshaltigkeit von Lärm subjektiv erfolgen soll. Trotzdem ist die sogenannte Spektral-Analyse ein zentrales Arbeitsinstrument der Lärmbekämpfung. Das Schallsignal (Abb. 5a) wird in Frequenzbänder unterteilt und der Pegel in jedem Band bestimmt (Abb. 5b und 5c).

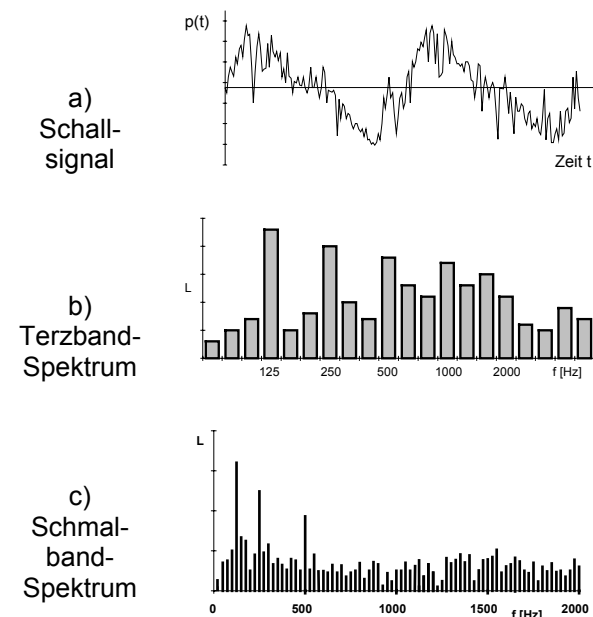


Abb. 5 Frequenzanalyse:
a) Signal im Zeitbereich
b) Terzbandspektrum
c) Schmalbandspektrum

Beim Terz- resp. Oktavbandspektrum sind die Bänder eine Terz- resp. eine Oktave breit (Abb. 5b). Das Terzbandspektrum eignet sich vor allem für Anwendungen der Lärmbekämpfung (Lärmwirkungen auf den Menschen). Die FFT-(Schmalband)-Analyse wird vor allem bei technischen Fragen verwendet. Hier ist der zu analysierende Frequenzbereich in Bänder immer gleicher Breite, z.B. 25 Hz aufgeteilt (siehe Abb. 5c).

Schalldruckpegel - Schalleistungspegel

Häufig werden die Begriffe Schalldruck- und Schalleistungspegel verwechselt.

In den Anhängen der Lärmschutzverordnung [2] werden Beurteilungsverfahren und Grenzwerte bezüglich Immissionen behandelt. Deshalb ist dort immer der Schalldruckpegel die Ausgangsgrösse. Er sagt aus, wieviel Schallenergie beim Empfänger pro Sekunde durch einen Quadratmeter fliesst (siehe oben).

Der Schalleistungspegel ist dagegen eine Grösse, welche die Emissionen einer Schallquelle beschreibt (siehe Abb. 6). Er ist die zentrale Grösse, wenn es um Fragen der Emissionsbegrenzung gemäss Abschnitt 2 der LSV geht. Die Schalleistung steht für die Schallenergie, welche von der Schallquelle pro Sekunde abgestrahlt wird (Einheit Watt). Es handelt sich um erstaunlich kleine Zahlen (siehe Tabelle 5) Der Schalleistungspegel ist die entsprechende logarithmische Grösse.

Tabelle 5 Schalleistung bekannter Schallquellen

Schallquelle	Schalleistung P	Schalleistungspegel L_W
Geige, fortissimo	0.001 W	90 dB
Hifi-Lautsprecher	0.1 W	110 dB
Presslufthammer	1 W	120 dB
Orgel, fortissimo	10 W	130 dB

Der Schalldruckpegel im Abstand s von einer Quelle mit einem Schalleistungspegel von L_W , welche Schall in alle Richtungen gleichmässig abstrahlt, beträgt im Freien:

$$L = L_W - 20 \cdot \log(s) - 11$$

Wenn die Quelle über einer reflektierenden Fläche steht, dann muss zum Schalldruckpegel 3 dB dazugezählt werden. Bei Quellen in einem Raum, ungleichförmige Abstrahlung etc. ist die Berechnung komplizierter.

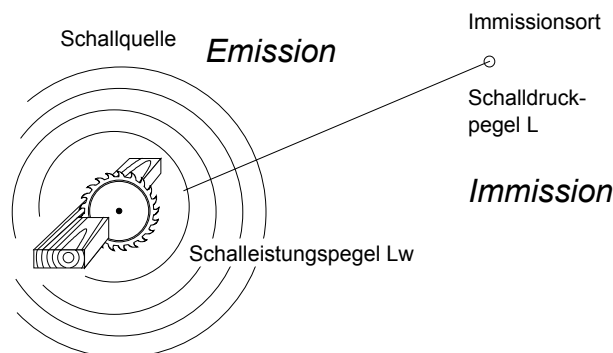


Abb. 6 Schallquelle, welche Schalleistung emittiert - Schalldruckpegel am Empfangsort

Schallausbreitung

Es ist einleuchtend, dass sich die Schallenergie bei der Ausbreitung von der Quelle "verdünnt". Für die zwei folgenden Fälle ist die Rechnung relativ einfach:

- Für eine Quelle, die in alle Richtungen gleichmässig (kugelförmig) abstrahlt und deren Schalldruckpegel im Abstand von s_1 von der Quelle L_1 beträgt, gilt im Abstand s_2 von der Quelle

$$L_2 = L_1 - 20 \cdot \log\left(\frac{s_2}{s_1}\right)$$

Dies bedeutet eine Pegelverminderung von 6 dB pro Verdoppelung des Abstandes.

- Wenn die Quelle zylinderförmig abstrahlt, wie dies bei einer Strasse oder Bahnlinie der Fall ist, dann gilt

$$L_2 = L_1 - 10 \cdot \log\left(\frac{s_2}{s_1}\right),$$

was also einer Pegelverminderung von 3 dB pro Verdoppelung des Abstandes entspricht.

Im allgemeinen ist bei der Ausbreitung nicht nur der behandelte Verdünnungseffekt zu berücksichtigen, sondern je nach Fall auch

- die Wirkung von Hindernissen
- die Reflexionen an Bauten, Wald oder Felsen
- der Effekt der Reflexionen am Boden
- die Dämpfung der Luft
- die Wirkung von Wind und Temperaturschichtungen der Luft.

Bei Messungen bedeutet der Einfluss des Wetters eine Erhöhung des Aufwandes für weiter entfernte Immissionsorte (mehrere Wiederholungen der Messung bei verschiedenen Wettersituationen).

4. Beurteilungsgrössen gemäss Lärm-schutzverordnung

Eine Lärmmessung im eigentlichen Sinn gibt es nicht. Lärm wird beurteilt, gemessen werden physikalische Grössen.

Durch Kombination von akustischen Messdaten (Pegel) mit empirischen Regeln über die Lästigkeit spezifischer Geräusche (Korrekturen) gelingt es trotzdem, Massstäbe für die Beurteilung von Lärmsituationen zu definieren, welche die Durchschnittsreaktion angemessen beschreiben. Das Ergebnis ist eine Grösse, die Beurteilungspegel L_r genannt wird und in dB angegeben wird. Sie ist ein Störungsmass und hat prinzipiell den Aufbau

$$L_r = AM + K$$

AM = Akustisches Mass (z.B. L_{eq} oder L_{max})
(gemessen, resp. berechnet)

K = empirische Korrektur

Das am besten geeignete akustische Mass und die Form der Korrektur K müssen aus Erkenntnissen der Lärmwirkungsforschung festgelegt werden. Auskunft über das Mass der Störung erhält man vor allem durch Befragungen, entweder von grossen Gruppen über die Lärmbelastigung am Wohn- oder Arbeitsort, oder von kleinen Gruppen unter Laborbedingungen mit künstlich produzierter akustischer Umgebung.