
Eine kurze Einführung zum Themenkomplex Fluglärmbewertung

**Ullrich Isermann
DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik**

Göttingen, Mai 2004

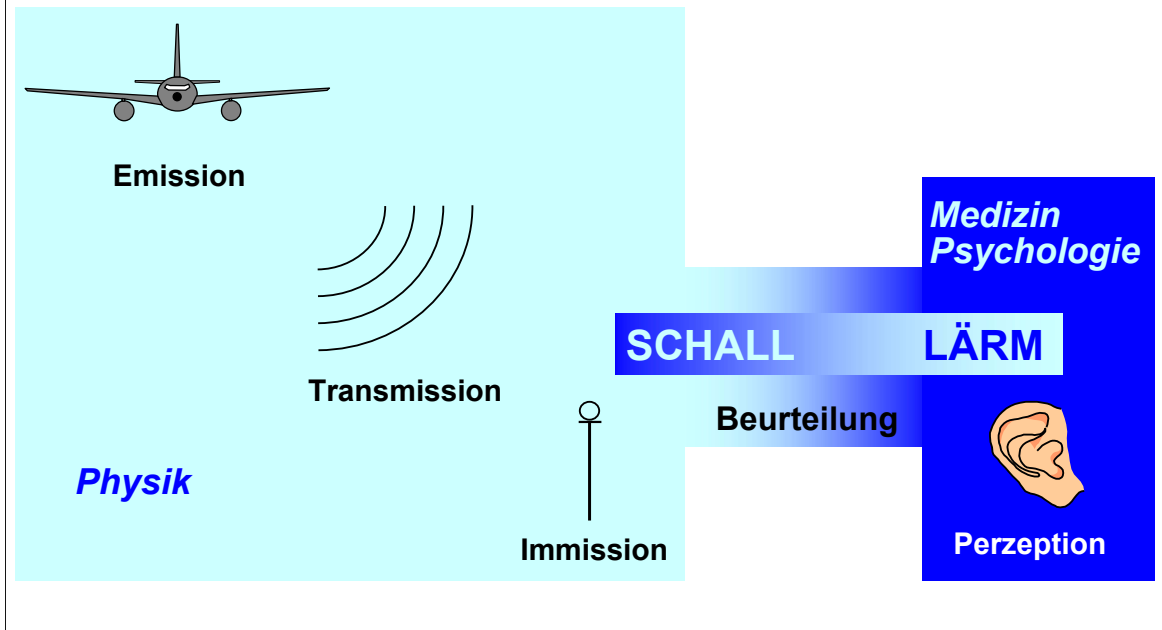
Dieser Vortrag soll eine kurze Einführung in den Themenkomplex Fluglärmbewertung geben. Er richtet sich primär an Laien, die nicht unbedingt eine solide mathematisch-naturwissenschaftliche Vorbildung haben. Aus diesem Grund wird weitestgehend auf mathematische Formeln verzichtet und eine gewisse wissenschaftliche Nachlässigkeit in manchen Definitionen in Kauf genommen – man sollte aber schon wissen, dass es einen Logarithmus gibt. Weitergehende Informationen zu diesem Thema finden sich im Internet unter

http://www.dlr.de/as/institut/abteilungen/abt_ts/arbeitsgebiete/fluglaermprognose/

Für einen Teil der Darstellungen wurde auf eine Präsentation von Herrn Georg Thomann von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt EMPA zurückgegriffen. Lieber Georg - ich hoffe, Du verzeihst mir dieses Raubrittertum, aber ich hätte es nicht besser machen können.

Dr. Ullrich Isermann
DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik
Bunsenstrasse 10
37073 Göttingen
Tel. 0551 709 2255
Fax 0551 709 2581
EMail ullrich.isermann@dlr.de

Fluglärm - die Wirkungskette



Diese Darstellung zeigt die Fluglärm-Wirkungskette von der Emission (also der Schallabstrahlung durch das Flugzeug) bis hin zur Perzeption (also der subjektiven Empfindung des Individuums). Natürlich gilt diese Darstellung sinngemäß auch für andere Lärmarten.

Die Phänomene der Schallentstehung und des Schalldurchgangs durch die Atmosphäre (der Transmission) bis hin zur Immission (also der Schalleinstrahlung am Empfangsort) sind rein physikalische Prozesse. In diesem Bereich spricht man noch von Schall.

Am Ende der Wirkungskette steht das subjektive Empfinden – also die Perzeption und die Reaktion des Individuums. Hier spielen medizinische und psychologische Effekte eine Rolle – man spricht von Lärm.

Die Kopplung zwischen beiden Bereichen liefert der Prozess der Beurteilung oder Bewertung. Er ordnet dem physikalischen Phänomen Schall das subjektive Phänomen Lärm zu – was sich in der Praxis nicht immer einfach gestaltet.

- **Gehörschäden**
- Erhöhtes Herzinfarkttrisiko ???

- **Beeinträchtigung des Nachtschlafs**
- **Belästigung, Störung**
- **Kommunikationsstörungen**
-

Welche Wirkungen hat Lärm?

- Als direkte – und leicht nachweisbare – körperliche Wirkungen sind z.B. Gehörschäden zu nennen. Darunter fallen temporäre oder permanente Verschiebungen der Hörschwelle, aber auch mechanische Schäden am Gehörapparat wie z.B. Risse des Trommelfells.
- In den letzten Jahren wurde auch des öfteren das Problem eines erhöhten Herzinfarkttrisikos durch Lärm thematisiert – nach Kenntnisstand des Autors ist dies aber wissenschaftlich noch nicht belastbar nachgewiesen.
- Ein in den letzten Jahre verstärkt untersuchtes Problem ist die Beeinträchtigung des Schlafes durch Lärm – insbesondere im Bereich des Luftverkehrs.
- Ein wesentlicher Effekt von Lärm ist Belästigung bzw. Störung (auch der Kommunikation) durch Lärm („Annoyance“). Zu diesem Thema existieren zahlreiche Studien, gleichwohl ist das Problem der Störwirkung immer noch nicht ausreichend quantifizierbar.

Die subjektiv empfundene Belästigung ist abhängig von

- Lautstärke
- Informationsgehalt
- persönliche Einstellung

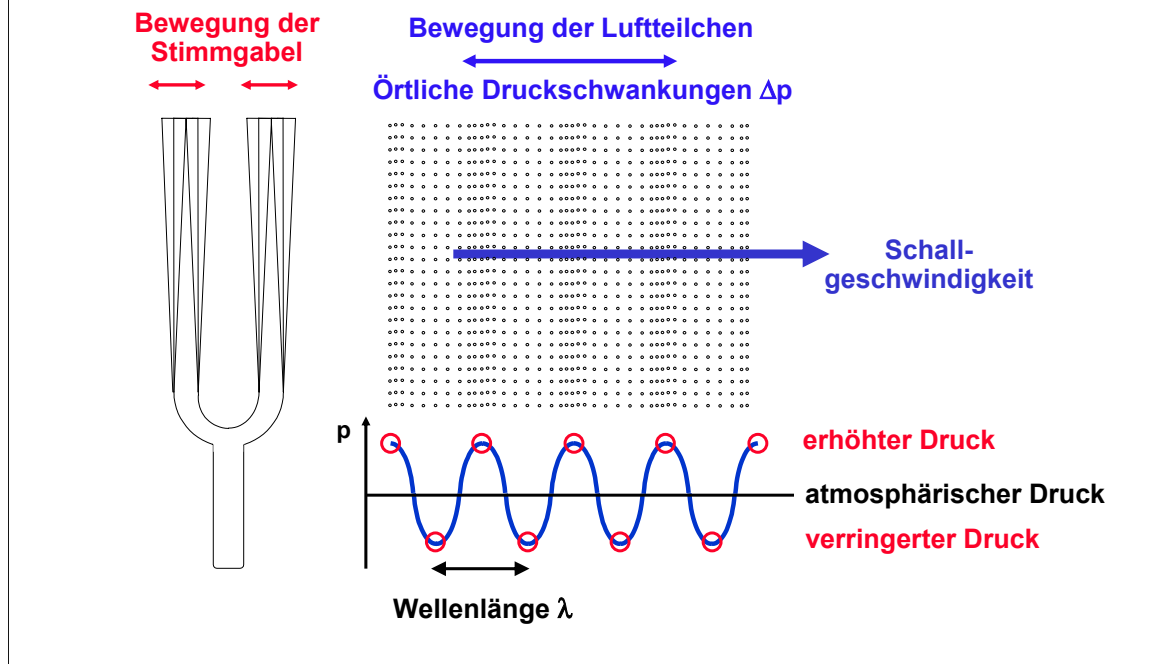
Sie ist erklärbar durch

- Akustik
- Lärmwirkung
- nicht identifizierbare Faktoren

Beurteilung ?

Die subjektiv empfundene Belästigung durch Lärm ist vor allem abhängig von der Lautstärke eines Geräusches, seinen Informationsgehalt (eine Beethoven-Symphonie ist bei gleicher Lautstärke weniger störend als ein Airbus), aber auch durch die persönliche Einstellung des Individuums zum Lärm bzw. zur speziellen Lärmart: Dem Heimwerker mag das Geräusch der Kreissäge als ein Maß seiner Kreativität dienen, für den Nachbarn ist es lediglich Krach. Hier wäre noch anzumerken, dass eine charakteristische Eigenschaft von Lärm diejenige ist, dass er grundsätzlich von Anderen erzeugt wird.

Die Belästigung ist also nur zum Teil erklärbar durch Effekte der Akustik und der Lärmwirkung. Es bleibt ein Rest nicht genau zu identifizierender Faktoren (der nach Ansicht mancher Fachleute etwa ein Drittel ausmacht) – und gerade dieser Rest macht die Beurteilung von Lärm alles andere als einfach.



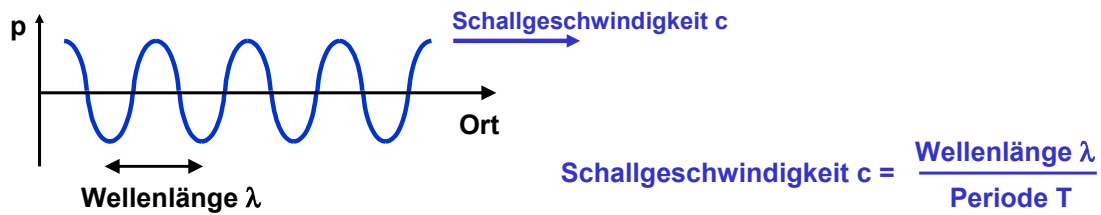
Das physikalische Phänom Schall stellt vereinfachend gesagt nichts anderes dar als eine durch die Bewegung der Luftteilchen hervorgerufenen lokale Änderung des Luftdrucks: Wird eine Stimmgabel angeschlagen, so versetzt sie die umgebenden Luftmoleküle in Bewegungen, was zu örtlichen Schwankungen in der Luftdichte und im Luftdruck führt. Diese breiten sich mit einer definierten Geschwindigkeit, nämlich der Schallgeschwindigkeit, aus.

Die Druckschwankungen sind dem atmosphärischen Luftdruck überlagert und in der Regel von wesentlich kleinerer Größenordnung. Bei reinen Tönen sind die Schwankungen periodisch, der räumliche Abstand zwischen zwei benachbarten Maxima oder Minima wird als Wellenlänge bezeichnet.

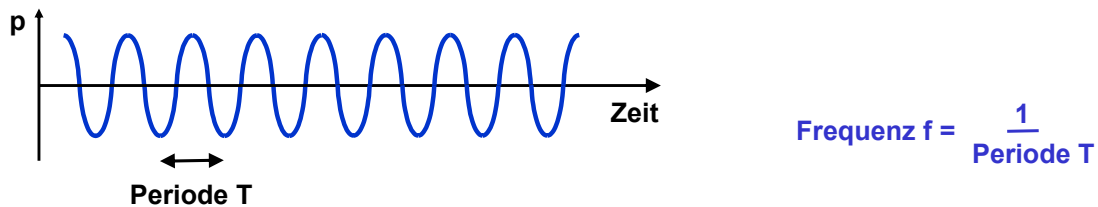
Schallwellen in Raum und Zeit



Druckverlauf bei festgehaltener Zeit (räumliche Periodizität)



Druckverlauf bei festgehaltenem Ort (zeitliche Periodizität)

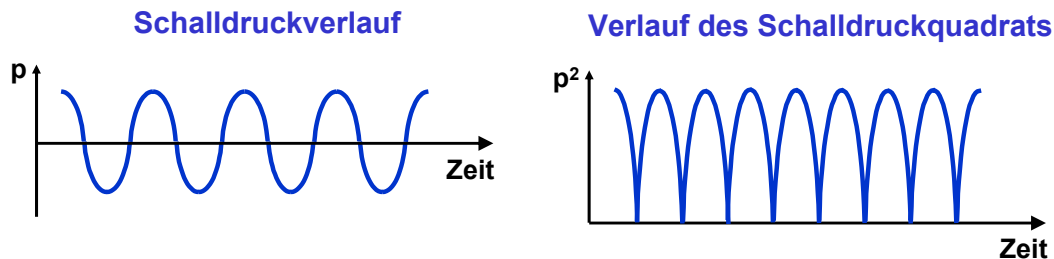


Neben dieser räumlichen Periodizität weisen Schallwellen aber auch eine zeitliche Periodizität auf: Betrachtet man den zeitlichen Druckverlauf an einem festen Ort, nimmt der Schalldruck periodisch zu und ab. Der Kehrwert dieser Schwingungsperiode wird als Frequenz bezeichnet – ein Begriff, der auch dem Laien vertraut ist. Die Frequenz ist dabei umgekehrt proportional zur Wellenlänge und mit dieser über die Schallgeschwindigkeit verknüpft. Je höher die Frequenz ist, um so höher ist ein Ton und um so kleiner ist seine Wellenlänge.

Schalldruck und Schallintensität



Das Quadrat des Schalldrucks ist proportional zur Schallintensität und damit auch zur Schallenergie !



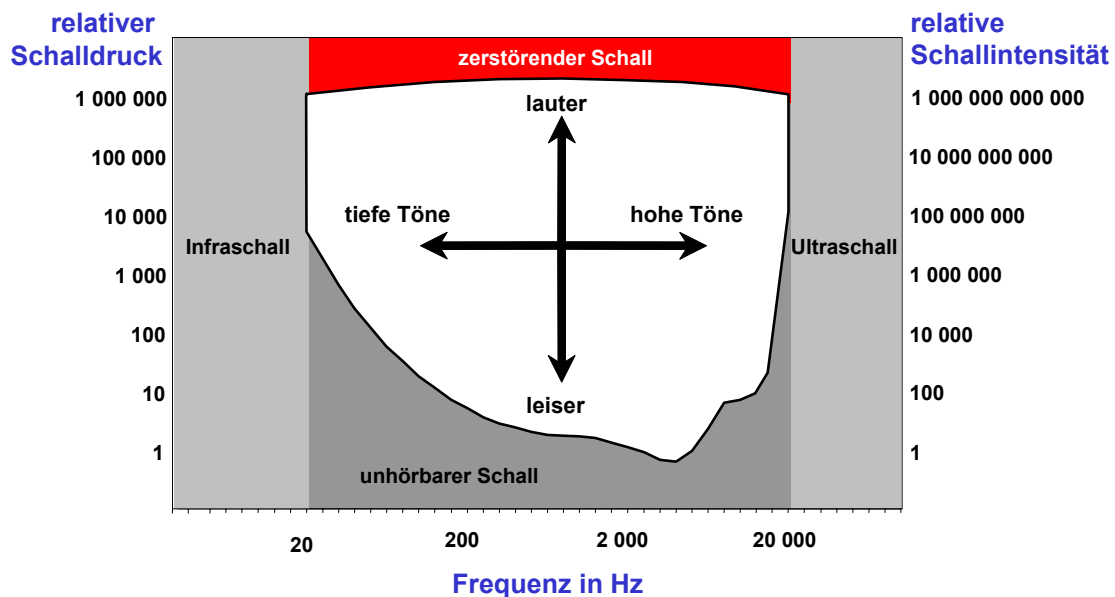
$$\text{relativer Schalldruck} = \frac{\text{effektiver Schalldruck}}{\text{Referenzschalldruck}}$$

$$\text{relative Schallintensität} = \frac{\text{effektive Schallintensität}}{\text{Referenzschallintensität}}$$

Eine Schallwelle transportiert Energie (im Fall der Stimmgabel gerade diejenige Bewegungsenergie, die die Zinken der Stimmgabel an die Luftmoleküle übertragen). Ein Maß für die Energie bzw. den Energietransport ist die Intensität. Sie wird in Watt/m^2 ausgedrückt und besagt, welche Energie pro Zeiteinheit durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufende Fläche tritt. Vergewaltigt man die exakte Physik ein wenig, so kann man sagen, dass die Intensität für Luftschall quadratisch zum Schalldruck ist (gilt streng genommen nicht immer).

In der Praxis arbeitet man in der Regel nicht mit absoluten Werten, sondern bezieht den Schalldruck bzw. die Schallintensität jeweils auf einen Bezugswert, der in etwa der menschlichen Hörschwelle entspricht. Man spricht in diesem Fall vom relativen Schalldruck bzw. der relativen Schallintensität.

Der menschliche Hörbereich



Der Mensch kann in der Regel Töne wahrnehmen, die in einem Bereich von etwa 20 bis 20000 Schwingungen pro Sekunde („Hertz“) liegen. Schall mit niedrigerer Frequenz wird als Infraschall, solcher mit höherer Frequenz als Ultraschall bezeichnet.

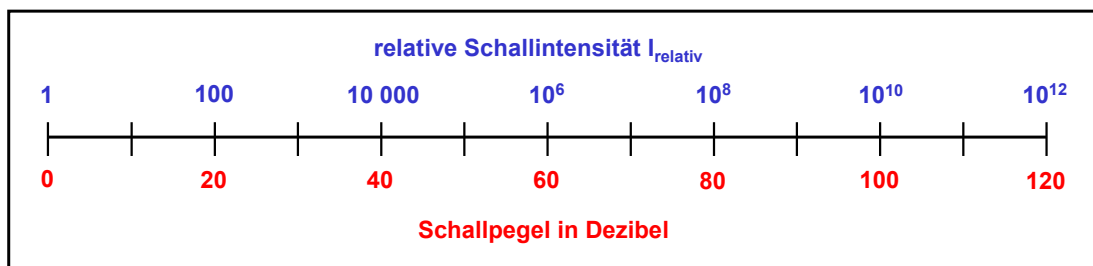
Unterhalb eines gewissen Schwellenwertes des Schalldrucks bzw. der Schallintensität kann der Mensch Töne nicht mehr wahrnehmen. Die Lage dieser Hörschwelle ist abhängig von der Frequenz des Schalls – am empfindlichsten reagiert das Ohr im Bereich von einigen Tausend Hertz. Oberhalb einer gewissen Grenze („Schmerzschwelle“) kann Schall auch schmerzhaft und im Extremfall sogar zerstörend wirken.

Der Übergang zum Dezibel



- Der Dynamikbereich des Gehörs beträgt etwa **12 Zehnerpotenzen in der relativen Intensität I_{relativ}**
- Das Gehör kann allerdings nur etwa **100 Intensitätsstufen auflösen !**
- Eine geeignete Skalenkompression mit dem dekadischen Logarithmus ergibt eine Gehördynamik in **120 Schritten (Schallpegel L in der Dezibel-Skala) !**

$$\text{Schallpegel } L = 10 \cdot \log_{10} (I_{\text{relativ}})$$



Der vorangegangenen Darstellung konnte entnommen werden, dass das Ohr einen Dynamikbereich von etwa 12 Zehnerpotenzen besitzt. Das besagt allerdings nicht, dass dieser gesamte Bereich auch in einer entsprechenden Genauigkeit aufgelöst werden kann. Vielmehr kann das Ohr nur etwa 100 Intensitätsstufen auflösen.

Um eine entsprechend angepasste Skala zu erhalten, führt man eine Skalenkompression durch: Man logarithmiert die relative Intensität und erhält so zunächst 12 Stufen, die als „Bel“ bezeichnet werden. Durch Multiplikation mit dem Faktor 10 erhält man dem menschlichen Empfinden gut angepasste 120 Stufen, ausgedrückt als „Dezibel“ oder dB.

Das Dezibel bezeichnet also nichts anderes als ein Verhältnis zwischen einer bestimmten Größe und einer Vergleichsgröße. Es ist also keine Einheit wie z.B. das Meter. Man könnte zwar auch Entfernungen in dB ausdrücken (wobei der Absolutwert davon abhängen würde, ob man sich z.B. auf einen Meter oder einen Kilometer bezieht) – allerdings macht eine derartige Skalierung keinen Sinn: Sie wäre im Gegensatz zum Schall nicht der Problemstellung angepasst, denn das Ohr reagiert auf eine Vervielfachung der Schallintensität mit einer additiven Erhöhung der Lautstärkeempfindung, während der Mensch bei der Vervielfachung einer zurückzulegenden Wegstrecke auch einen vervielfachten Energie- bzw. Zeitaufwand benötigt.

Pegelarithmetik: Addition von zwei Pegeln



Schreibweise: $L = L_1 \oplus L_2$

Rechenvorschrift: $L = 10 \cdot \log_{10} (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$

Beispiel:

0 dB	⊕	0 dB	=	3 dB
80 dB	⊕	80 dB	=	83 dB
80 dB	⊕	85 dB	=	86 dB
80 dB	⊕	100 dB	=	100 dB

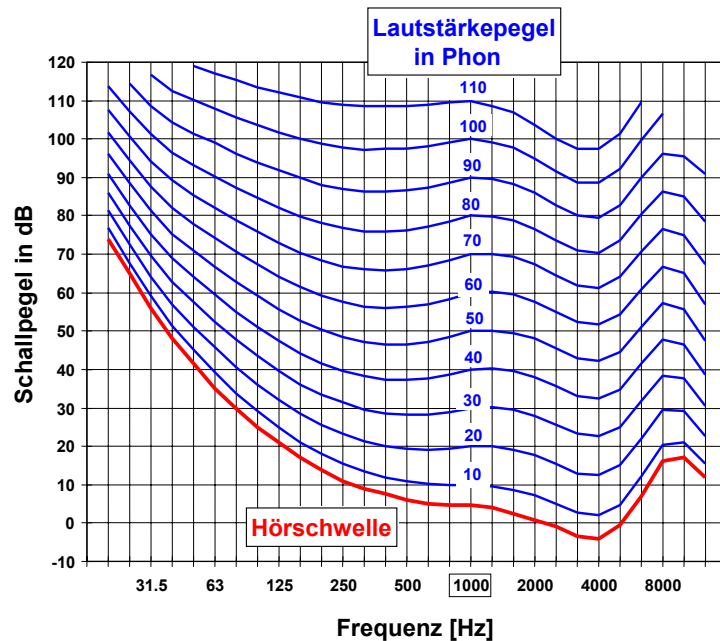
Mit der Einführung des Dezibels hat man zwar eine der menschlichen Empfindung angepasste Skala definiert, man handelt sich aber eine neue, wenig anschauliche Form der Arithmetik ein: Bei der Addition von Pegel dürfen nicht die Pegelwerte selbst, sondern es müssen die dahinter stehenden Intensitäten addiert werden – man muss also den Vorgang des Logarithmierens umkehren. Diese Aktion wird oft durch den Operator \oplus beschrieben und als „energetische“ oder „logarithmische“ Addition bezeichnet. Dabei gelten folgende Faustregeln:

- Addiert man zwei gleiche Pegelwerte, so ist der resultierende Pegel um drei Dezibel höher – unabhängig von der Höhe der Ausgangswerte.
- Beträgt die Differenz zwischen zwei Pegeln mehr als etwa 20 dB, so ist der Summenpegel in etwa gleich dem höheren Pegel. Auch hier spielt die Höhe der Ausgangspegel keine Rolle.

Subjektives Empfinden: Lautstärke



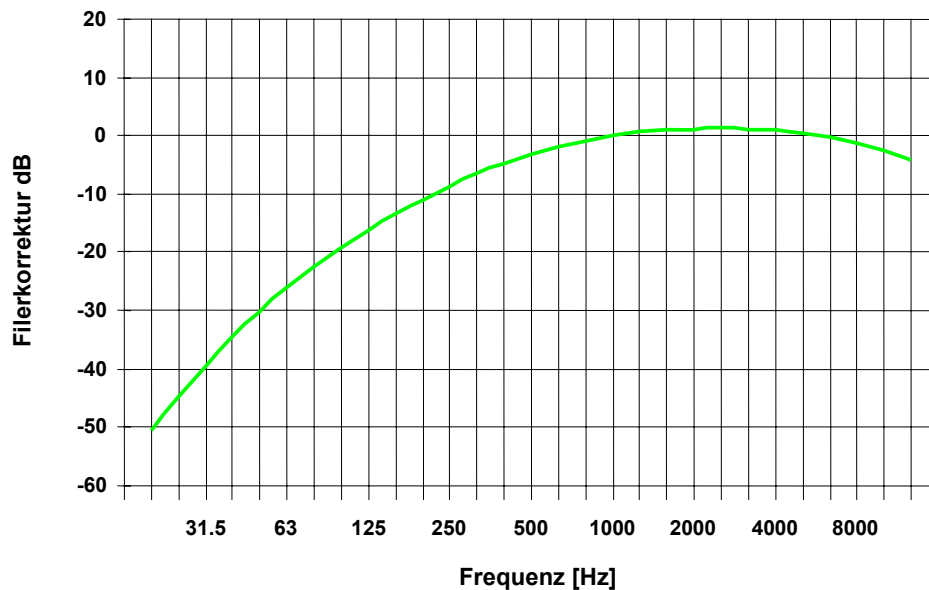
- Die Verdoppelung der Lautstärke entspricht einem Schritt von 10 phon.
- Das entspricht bei 1000 Hz einem Schritt von 10 dB.



Der Mensch ist in der Lage, Schallpegelunterschiede von 1-2 dB nur im Idealfall durch direkten Hörvergleich wahrzunehmen. Erst Unterschiede von 3 dB sind deutlich zu unterscheiden.

Dies sagt aber nichts darüber aus, wie der Mensch Schallpegelunterschiede empfindet. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff der Lautstärke bzw. des Lautstärkepegels eingeführt. Dieser ist vereinfacht gesagt ein Maß für die subjektive Empfindung und wird in Phon ausgedrückt. Der Mensch empfindet einen Schritt von 10 Phon wie eine Verdoppelung der Lautstärke. Dabei ist die Lautstärkeempfindung noch abhängig von der Frequenz des Tones, wie dieser Abbildung entnommen werden kann. Für Töne von 1000 Herz entspricht ein Schritt von 10 Phon gerade einer Schallpegeldifferenz von 10 Dezibel.

Die A-Bewertung



Die A-Bewertung ist eine praktikable Näherung an die Frequenzempfindung.

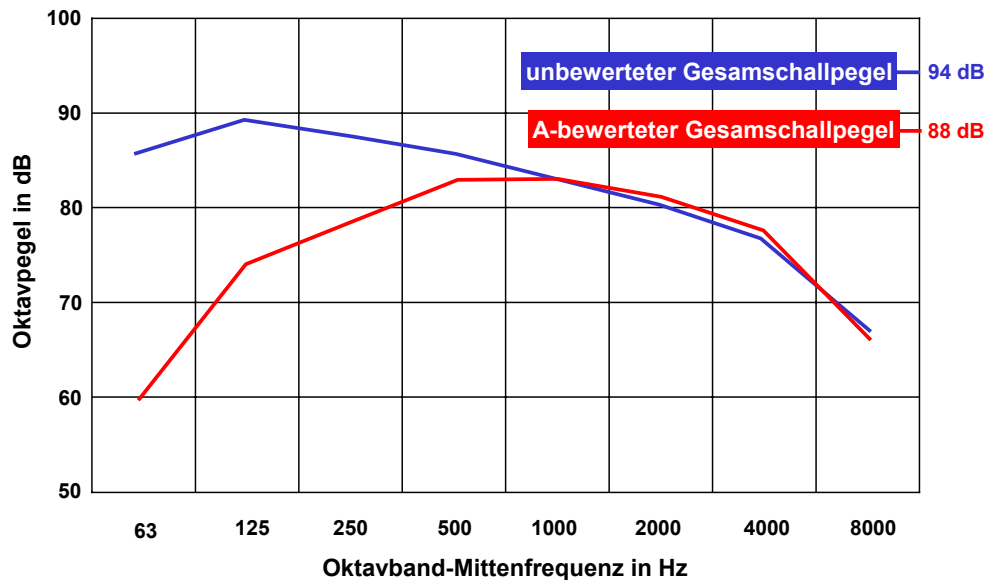
Eine praktikable Näherung an das menschliche Frequenzempfinden stellt die A-Bewertung dar. Sie ordnet bestimmten Frequenzen Korrekturen, sog. Filterwerte, zu. Der Verlauf der A-Filterkurve ist aus dem Lautstärke-Frequenz-Diagramm auf der vorangegangenen Abbildung abgeleitet, allerdings ist der Verlauf der A-Filterkurve nicht abhängig von der Pegelhöhe bzw. der Lautstärke eines Tones.

Die A-Filterung hat sich weltweit bei der Beurteilung von Geräuschen durchgesetzt. Es gibt zweifellos bessere Verfahren zur Frequenzbewertung (die Lautstärke in Phon ist eines davon). Allerdings lässt sich die A-Bewertung messtechnisch sehr einfach realisieren, so dass sie schon zu Zeiten eingesetzt werden konnte, zu denen die heute gebräuchliche technische Ausstattung nicht verfügbar war. Insofern hat der Gebrauch der A-Bewertung primär historische Gründe, sie hat sich allerdings in der Praxis weitestgehend bewährt.

Spektrum und Gesamtschallpegel



Unbewertetes und A-bewertetes Spektrum für ein Strahlflugzeug beim Start



Bisher wurden nur Töne – also Schall einer festen Frequenz – diskutiert. In der Praxis setzt sich aber ein Geräusch aus einer Vielzahl von einzelnen Frequenzen zusammen – einem sogenannten „Spektrum“.

Diese Abbildung zeigt ein typisches Frequenzspektrum, wie es ein Strahlflugzeug beim Start erzeugt. Dabei sind einzelne Frequenzbereiche zu sog. „Frequenzbändern“ zusammengefasst, die durch „Mittenfrequenzen“ beschrieben werden. Dargestellt sind hier Oktavbänder, die dadurch charakterisiert sind, dass sich die Mittenfrequenz beim Übergang zum nächsthöheren Band verdoppelt. Die acht Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 63 bis 8000 Herz decken dabei den Frequenzbereich von 50 bis 10000 Herz ab – ein Bereich, der für eine adäquate Beschreibung eines typischen Fluglärmgeräusches ausreichend ist. Neben dem Ausgangsspektrum ist noch das mit der A-Filterkurve bewertete Spektrum eingetragen.

Die Pegel der einzelnen Bänder können zu einem Einzahlwert – dem sog. „Gesamtschallpegel“ – kombiniert werden. Dies geschieht durch energetische Summation mit dem schon beschriebenen \oplus -Operator. Summiert man über die A-bewerteten Oktavpegel, so wird das Resultat als A-bewerteter Gesamtschallpegel bezeichnet – eine Größe, die in der Beurteilung von Lärm von maßgeblicher Bedeutung ist. Dieser Wert ist in der Praxis meist zahlenwertmäßig kleiner als der unbewertete Gesamtschallpegel, da aufgrund der gehörangepaßten Bewertung die niedrigen Frequenzen nicht so stark in die Summation eingehen.

Was charakterisiert Lärm ?



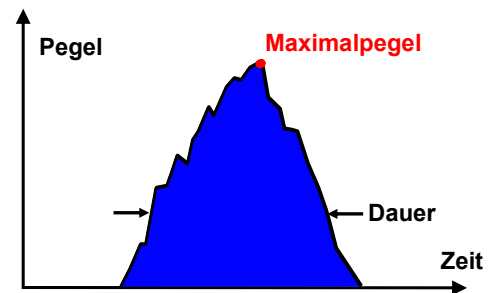
Einzelgeräusch

- Maximalpegel
- Dauer / Schallenergie

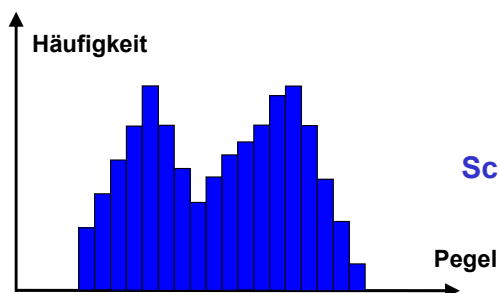
Mehrere Geräusche

- Häufigkeit

messbar
berechenbar



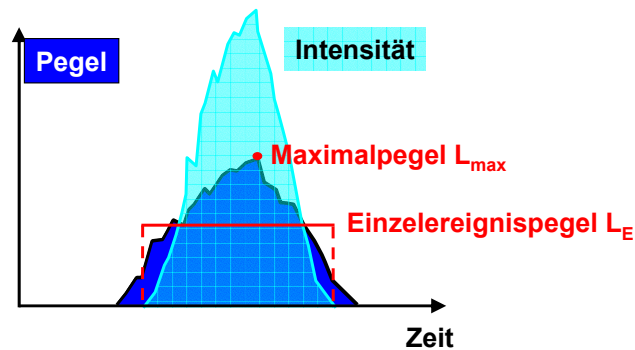
Zeitlicher Schallpegelverlauf
eines Geräusches



Schallpegelhäufigkeitsverteilung
für viele Geräusche

Wir haben im Zusammenhang mit dem Spektrum den Begriff des Geräusches eingeführt. Ein solches hat aber auch eine andere wichtige Eigenschaft, nämlich seinen zeitlichen Verlauf. Dieser kann durch zwei wichtige Größen charakterisiert werden, nämlich einen Maximalpegel (d.h. den höchsten im Geräusch auftretenden Pegelwert) und eine typische Dauer. Für letztere gibt es eine Reihe von Definitionen, die hier nicht erläutert werden sollen – wichtig ist, dass die Dauer des Geräusches ein Maß für seinen Energiegehalt ist.

Wenn Lärm beurteilt werden soll, hat man es in der Regel aber nicht nur mit einem Einzelgeräusch zu tun, sondern mit vielen. Eine Anzahl von Geräuschen kann durch eine sog. „Pegelhäufigkeitsverteilung“ charakterisiert werden, die gewissen Pegelklassen gewisse Häufigkeiten zuordnet. Dabei kann es sich um Maximalpegel, aber auch um Einzelereignispegel handeln, die im folgenden beschrieben werden sollen. Eine Pegelhäufigkeitsverteilung charakterisiert die Immissionssituation an einem bestimmten Ort.



- Der **Einzelereignispegel** ist ein Maß für den Energiegehalt des Einzelgeräusches.
- Er kann aus **Maximalpegel** und **Geräuschkdauer** berechnet werden:

$$L_E = L_{max} + 10 \cdot \log_{10}(t/t_0)$$

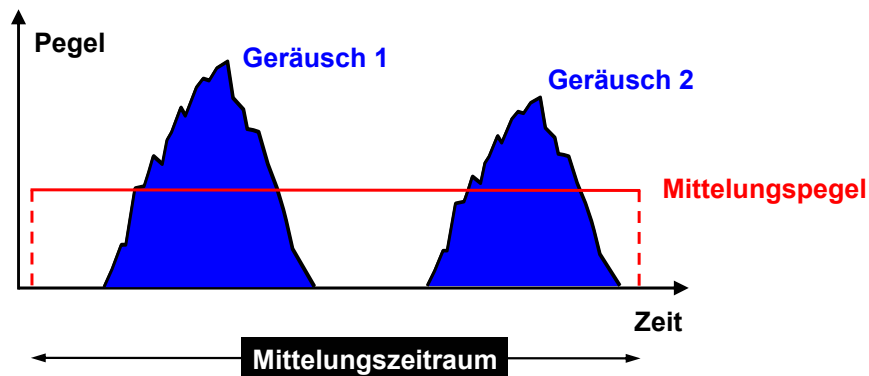
- **Abhängig von der Normierungszeit t_0** kann der Einzelereignispegel auch höher als der Maximalpegel sein (z.B. **SEL** mit $t_0 = 1$ sec).

Ein Maß für den Energiegehalt eines Geräusches ist der „Einzelereignispegel“ L_E . Er kann vereinfachend ausgedrückt durch eine zeitliche \oplus -Summation über die Momentanwerte des zeitlichen Pegelverlaufs berechnet werden (exakt handelt es sich um eine zeitliche Integration des Intensitätsverlaufs).

Durch diese spezielle Form der Summation tragen hohe Pegel wesentlich stärker zum Gesamtschallpegel bei als niedrige.

Näherungsweise kann man den Einzelereignispegel aus dem Maximalpegel L_{max} , der Geräuschkdauer t und einer Normierungszeit berechnen. Je nach Wahl dieser Normierungszeit kann der Einzelereignispegel zahlenwertmäßig höher oder kleiner als der Maximalpegel sein. Ein Beispiel ist der in der Praxis oft benutzt „Sound Exposure Level“ SEL, bei dem die Normierungszeit 1 Sekunde beträgt. Solange das Geräusch länger als eine Sekunde dauert (also in allen in der Praxis auftretenden Fällen) ist der SEL höher als der Maximalpegel.

Mittelung über mehrere Geräusche



- Der **Mittelungspegel** ist ein Maß für die durchschnittliche am Immissionsort einfallende Schallenergie – **man kann Mittelungspegel daher nicht „hören“**.
- Er berechnet sich aus **Einzelereignispegeln** und **Mittelungszeitraum**.
- **Gebräuchliche Mittelungspegel** sind die **äquivalenten Dauerschallpegel** L_{EQ} .

Will man die gesamte Lärmexposition über einen längeren Zeitraum (den sog. Mittelungszeitraum) beschreiben, so summiert man die Einzelereignispegel der in diesen Zeitraum fallenden Geräusche energetisch auf (\oplus -Summe) und normiert auf den Mittelungszeitraum (im Prinzip durch Division mit dieser Zeitspanne). Der daraus resultierende Pegelwert wird als Mittelungspegel bezeichnet und ist ein Maß für die durchschnittliche, am Immissionsort einfallende Schallenergie.

Wichtig ist, dass man Mittelungspegel (im Gegensatz zu Maximalpegeln) nicht „hören“ kann – sie beschreiben ja letztendlich kein einzelnes Geräusch.

Im folgenden sollen die sog. „äquivalenten Dauerschallpegel“ diskutiert werden, die weltweit die wohl gebräuchlichste Form von Mittelungspegeln darstellen. Zuvor soll aber noch der wichtige Begriff des „Halbierungsparameters“ eingeführt werden.

Hinsichtlich der Störwirkung entspricht eine Absenkung des Maximalpegels um **q** dB

- einer Halbierung der Geräuschkhäufigkeit (**Pegel-Häufigkeits-Äquivalenz**)
- einer Halbierung der Geräuschkdauer (**Pegel-Dauer-Äquivalenz**).

Der **Halbierungsparameter q** hat üblicherweise den Wert 3, im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm den Wert 4 („ $L_{eq(4)}$ “).

In die Berechnung von Mittelungspegeln gehen – wie beschrieben – die Parameter Maximalpegel, Dauer und Häufigkeit der Einzelgeräusche ein. Hinsichtlich der Störwirkung sind diese Größen aber nicht unabhängig voneinander, vielmehr gibt es zwei wichtige Äquivalenzbeziehungen:

- Eine Halbierung der Geräuschkhäufigkeit korrespondiert mit einer Absenkung des Mittelungspegels um einen Wert von q Dezibel („Pegel-Häufigkeits-Äquivalenz“).
- Eine Halbierung der Geräuschkdauer korrespondiert beim Einzelgeräusch mit einer Absenkung des Maximalpegels um q Dezibel („Pegel-Dauer-Äquivalenz“).

Der Wert q wird als dementsprechend als „Halbierungsparameter“ bezeichnet. In der Regel wird ein Wert $q = 3$ angenommen, was jeweils einer Halbierung der akustischen Energie entspricht. Allerdings haben frühe Untersuchungen zu diesem Effekt für Fluglärm auf einen Wert $q = 4$ gedeutet, was z.B. heißt, dass der Mittelungspegel um 4 dB steigt wenn man die Geräuschkzahl verdoppelt. Auf dieser Grundlage wurde der äquivalente Dauerschallpegel nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm aus dem Jahr 1971 definiert („ $L_{eq(4)}$ “).

Äquivalente Dauerschallpegel als Beurteilungsmaß



$$L_{EQ} = k \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T} \sum_i 10^{(L_{\max,i} + \Delta_i)/k} \cdot t_i \right] + C$$

- k** Äquivalenzparameter (proportional zum Halbierungsparameter)
- T** Bezugszeitraum (meist 6 oder 12 Monate)
- i** laufende Nummer des Geräusches im Bezugszeitraum
- Δ_i** von der Beurteilungszeit (Tag, Abend, Nacht) abhängiger Aufschlag
- $L_{\max,i}$** Maximalpegel des i-ten Geräusches
- t_i** Dauer des i-ten Geräusches
- C** Konstante

Der Aufschlag Δ_i ordnet Geräuschen während sensibler Zeiten (Abend, Nacht) einen Malus zu \Rightarrow Übergang zur Beurteilung !

Die obige Gleichung definiert in generischer Form den einen „äquivalenten Dauerschallpegel“, wie er sich aus den innerhalb eines Bezugszeitraums auftretenden Einzelgeräuschen berechnet (im Prinzip wieder über eine energetische \oplus -Summation).

In die Summation geht neben den bekannten Parametern Dauer, Häufigkeit und Maximalpegel hier ein von der Beurteilungszeit (in der Regel eine bestimmte Tageszeit) abhängiger Aufschlag Δ_{ein} , der z.B. die erhöhte Störwirkung von Geräuschen während der sensiblen Tagesrandzeiten oder der Nacht berücksichtigt. Die Pegel-Dauer- und Pegel-Häufigkeitsäquivalenz wird durch den Äquivalenzparameter k , der sich aus dem Halbierungsparameter ergibt, berücksichtigt.

Durch die Einführung der Aufschläge Δ und des Äquivalenzparameters k erfolgt ein Übergang von der rein energetischen Betrachtung der Geräuschsituation zu einer Beurteilung derselben. Äquivalente Dauerschallpegel stellen daher sog. „Beurteilungspegel“ dar.

Beispiele für äquivalente Dauerschallpegel



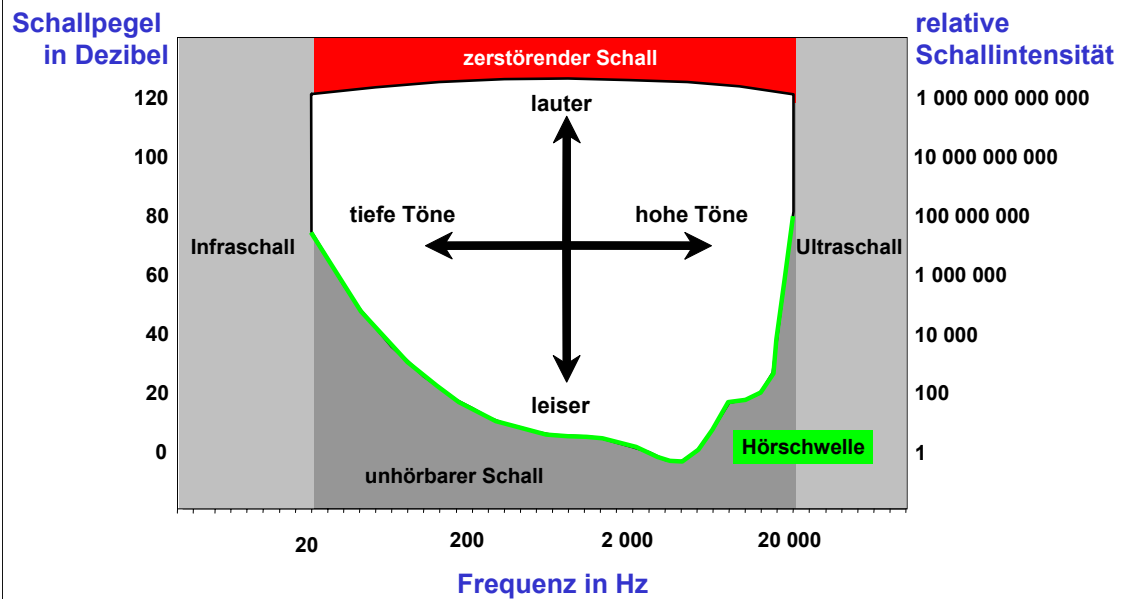
		k	Δ_{Tag}	Δ_{Abend}	Δ_{Nacht}	Varianten
Energieäquivalenter Dauerschallpegel	$L_{\text{eq}(3)}$	10	0	0	0	$L_{\text{eq}(3),\text{Tag}}$ $L_{\text{eq}(3),\text{Nacht}} = L_{\text{Night}}$ $L_{\text{eq}(3),24\text{h}}$
Dauerschallpegel nach Fluglärngesetz	$L_{\text{eq}(4)}$	13.3	2.3 0	2.3 0	0 9.3	Fall A ⁽¹⁾ Fall B ⁽²⁾
Day-Night Equivalent Noise Level	L_{DN}	10	0	0	10	
Day-Evening-Night Equivalent Noise Level	L_{DEN}	10	0	5	10	

- (1) Kommt bei tagesdominierten Flugbetrieben zum Tragen
 (2) Kommt bei signifikantem Nachtflugbetrieb zum Tragen

Diese Tabelle zeigt verschiedene gebräuchliche Varianten von Dauerschallpegeln:

- Der energieäquivalente Dauerschallpegel beinhaltet keine Aufschläge. Er wird meist den 24-Stunden-Tag, auf 16 Tagestunden oder 8 Nachtstunden bezogen. Der von der EU vorgeschriebene L_{night} ist ein solcher Nacht- L_{eq} .
- Der äquivalente Dauerschallpegel nach dem Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm unterscheidet 2 Fälle: Im Fall A werden Nachtbewegungen nicht berücksichtigt und Tagesbewegungen mit einem Aufschlag von 2.3 dB versehen. Dies entspricht gerade einer Multiplikation der Häufigkeiten mit 1.5, wodurch die 16 Tagesstunden auf 24 Stunden hochgerechnet werden. Im Fall B werden die Tagesbewegungen nicht gewichtet, die Nachtbewegungen erhalten einen Aufschlag von 9.3 dB (entsprechend einer Multiplikation mit 5).
- Beim Day-Night Equivalent Noise Level werden Nachtbewegungen mit einem Aufschlag von 10 dB versehen (äquivalent zu einer Erhöhung der Häufigkeit um den Faktor 10). Der L_{DN} ist weltweit wohl das gebräuchlichste Beurteilungsmaß für Flug- und Verkehrslärm.
- Beim Day-Night-Evening Equivalent Noise Level (wie er in der EU-Umgebungslärmrichtlinie vorgeschrieben wird) kommt zusätzlich noch ein Zuschlag von 5 dB für die Tagesrandzeit zum Tragen.

Zusammenfassung: Hörbereich und Dezibel



Hier noch einmal eine zusammenfassende Darstellung des menschlichen Hörbereichs und der Zuordnung von Pegeln zu Intensitäten ...

Merkregeln:

Verdoppelung der Schallenergie	+ 3 dB
Vervierfachung der Schallenergie	+ 6 dB
Verzehnfachung der Schallenergie	+ 10 dB
Verhundertfachung der Schallenergie	+ 20 dB
Halbierung der Schallenergie	- 3 dB
Viertelung der Schallenergie	- 6 dB

.... hier die Merkgeln für Pegelarithmetik ...

Zusammenfassung: Wahrnehmbarkeit



Schallpegeländerung	Wahrnehmbarkeit
< 1-2 dB	nicht wahrnehmbar
3 dB	gerade wahrnehmbar, kleine Veränderung
5 dB	deutlich wahrnehmbare Veränderung
10 dB	Halbierung des subjektiven Lautstärkeempfindens

Diese Anhaltswerte gelten für Maximalpegel oder momentane Pegel, nicht aber für zeitliche Mittelungspegel !

... und hier die Übersicht über die Wahrnehmbarkeit von Schallpegeländerungen.

Geräusche

- werden charakterisiert durch die Größen **Maximalpegel** und **Dauer**
- hinsichtlich der Störwirkung gibt es eine **Pegel-Dauer-Äquivalenz**

Beurteilungsmaße / Dauerschallpegel

- sind ein **gewichtetes Mittel der Schallenergie** über viele Geräusche
- können erhöhte Störwirkung zu sensiblen Zeiten berücksichtigen
- es existiert eine **Pegel-Häufigkeits-Äquivalenz**
- sind aus Messungen ableitbar (**Fluglärmüberwachung**)
- sind berechenbar (**Fluglärmrechnung**)

Hier noch eine zusammenfassende Darstellung zu Geräuschen und Beurteilungsmaßen, wobei noch darauf hinzuweisen ist, dass Beurteilungsmaße nur auf Größen beruhen, die messbar oder berechenbar sind. Ersteres ist von Bedeutung im Zusammenhang mit Fluglärmüberwachung, letzteres ist Grundvoraussetzung für den Einsatz von rechnerischen Prognoseverfahren als Mittel zur Lärmschutzgesetzgebung und Raumplanung.

Grenzwerte

- dienen zur Festlegung von Schutz- und Planungsmaßnahmen,
- können abgestuft definiert werden (Schwellenwert, präventiver Richtwert, kritischer Toleranzwert)
- sollten sich an **Dosis-Wirkungs-Beziehungen** orientieren
- müssen auf die spezielle Wahl des Beurteilungsmaßes abgestimmt sein

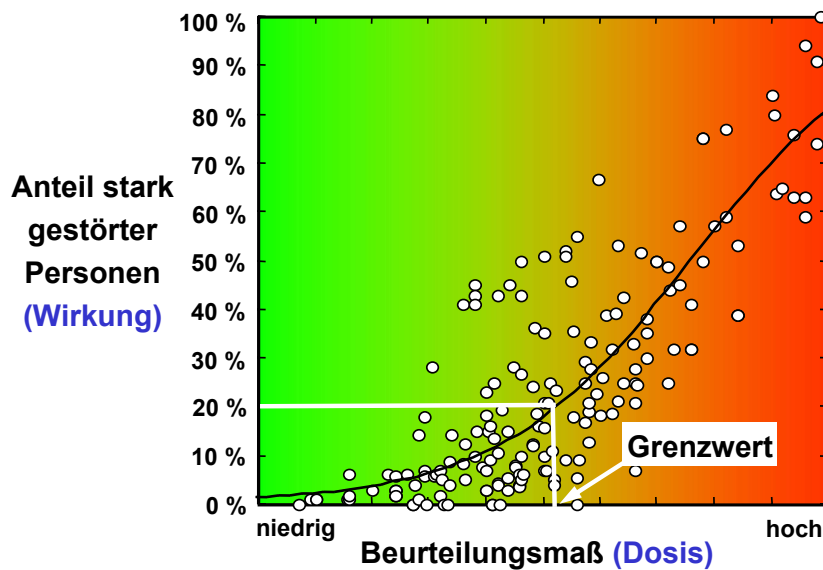
Bei einem Wechsel des Beurteilungsmaßes muss überprüft werden, ob ein Wechsel der entsprechenden Grenzwerte notwendig ist !

Die Wahl eines Maßes zur Beurteilung der Lärmbelastung allein ist natürlich nicht ausreichend – letztendlich muss ein Grenzwert (oder ein System von Grenzwerten) existieren, an dem sich die Beurteilung orientiert.

Derartige Grenzwerte sollten sich an sog. „Dosis-Wirkungs-Beziehungen“ orientieren, die im folgenden diskutiert werden. Wichtig ist dabei aber auf jeden Fall, dass Grenzwerte auf die spezielle Wahl des Beurteilungsmaßes abgestimmt sind.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die meisten Formen von äquivalenten Dauerschallpegeln gut untereinander korrelieren und auch – unter gewissen Voraussetzungen – direkt ineinander umrechenbar sind. Daraus folgt aber, dass bei einem Wechsel des Beurteilungsmaßes auch überprüft werden muss, ob dabei auch ein Ändern der Grenzwerte notwendig ist (was in der Regel der Fall sein dürfte).

Dosis-Wirkungs-Beziehungen



Dosis-Wirkungs-Beziehungen beschreiben durchschnittliche Reaktionen, nicht individuelle Reaktionen einzelner Personen !

Diese Abbildung zeigt eine sog. „Dosis-Wirkungs-Beziehung“. Auf der horizontalen Achse ist (in willkürlichen Einheiten von „niedrig“ bis „hoch“) die Größe des Beurteilungsmaßes aufgetragen, auf der vertikalen Achse der Anteil an stark gestörten Personen, wie er dem entsprechenden Beurteilungsmaß zugeordnet werden kann.

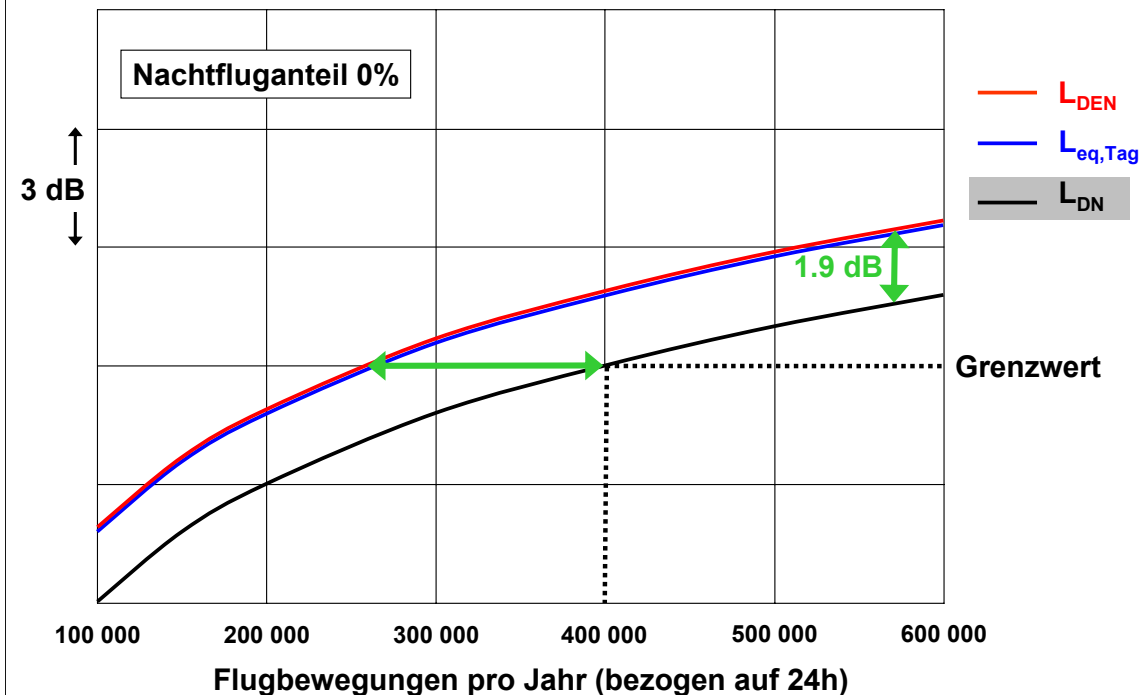
In der Regel wird bei der Festsetzung eines Grenzwerts festgelegt, wieviel Prozent stark gestörter Personen noch toleriert werden können. Der entsprechende Grenzwert ergibt sich dann aus der Regressionskurve.

Die Abbildung verdeutlicht auch, dass eine derartige Beziehung nur die durchschnittlichen Reaktionen beschreiben kann – die die individuellen Reaktionen beschreibenden Einzelpunkte streuen z.T. erheblich. Diese Tatsache wird bei der Interpretation von Grenzwerten häufig nicht berücksichtigt.

Die folgenden Darstellungen sollen veranschaulichen, welche Effekte beim Zusammenspiel von Grenzwerten und Beurteilungsmaßen auftreten können. Die Vergleiche basieren auf dem auf 16 Tagesstunden bezogenen energieäquivalenten Dauerschallpegel sowie dem L_{DEN} und dem L_{DN} (als auf 24 Stunden bezogene Mittelungspegel).

Der L_{DN} wurde hier mit einbezogen, weil viele der in der Literatur veröffentlichten Dosis-Wirkungs-Beziehungen auf diesem Beurteilungsmaß aufsetzen.

Beurteilungsmaß und Grenzwert (1)



Zugrunde liegt dieser Darstellung ein typischer Flugbetrieb, der vollständig während der 16 Tagesstunden abgewickelt wird. Die horizontale Achse zeigt die Gesamtanzahl der Flugbewegungen, die pro Jahr bezogen auf den gesamten 24-Stunden-Tag abgewickelt werden. Die vertikale Achse zeigt den Wert des Mittelungspegels – ein Gitterschritt entspricht hier 3 Dezibel.

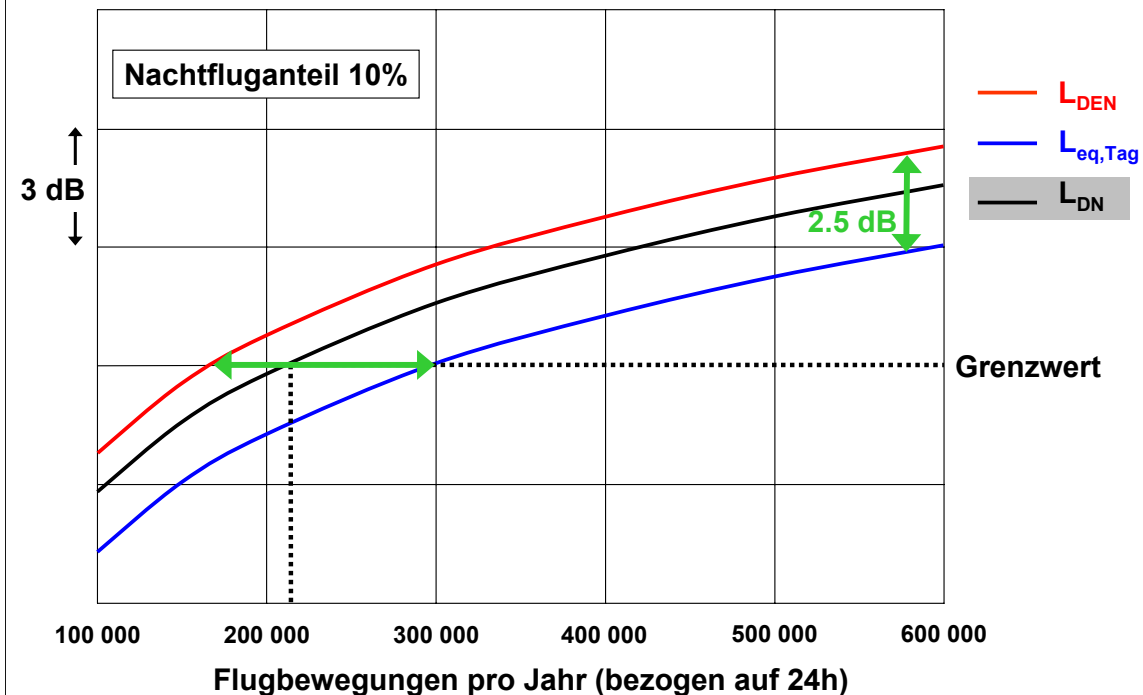
Da alle drei Mittelungspegel auf einem Halbierungsparameter von 3 beruhen, verlaufen die Kurven parallel und mit Verdoppelung der Bewegungszahl erhöht sich der Mittelungspegel um 3 dB.

Beim L_{DN} kommt die Nachtgewichtung nicht zum Tragen, da reiner Tagesbetrieb vorherrscht. Erwartungsgemäß ist der Tages- L_{eq} höher als der L_{DN} , da er nur auf 16 statt auf 24 Stunden bezogen ist. Umrechnung auf 24 Stunden würde einer Erhöhung der Bewegungszahl um 50% entsprechen, was gerade 1.8 dB entspricht. Der L_{DEN} liegt um 1.9 dB über dem L_{DN} , da die Abendbewegungen einen Aufschlag von 5 dB erhalten.

Geht man von einem hypothetischen L_{DN} -Grenzwert aus, bei dem noch 400 000 Bewegungen abgewickelt werden können, so würden bei ungeändertem Grenzwert und Übergang zu den anderen Mittelungspegeln

- lediglich etwa 260 000 Bewegungen möglich sein, falls sich die durch den Grenzwert definierten Schutzzonen nicht vergrößern dürfen, oder
- die Mittelungspegel würden sich um knapp 2 dB erhöhen. Dies entspräche einer Vergrößerung der Schutzzonen um etwa 40% und damit evtl. verbundenen höheren Aufwendungen für Schallschutz oder Bauverbote.

Beurteilungsmaß und Grenzwert (2)



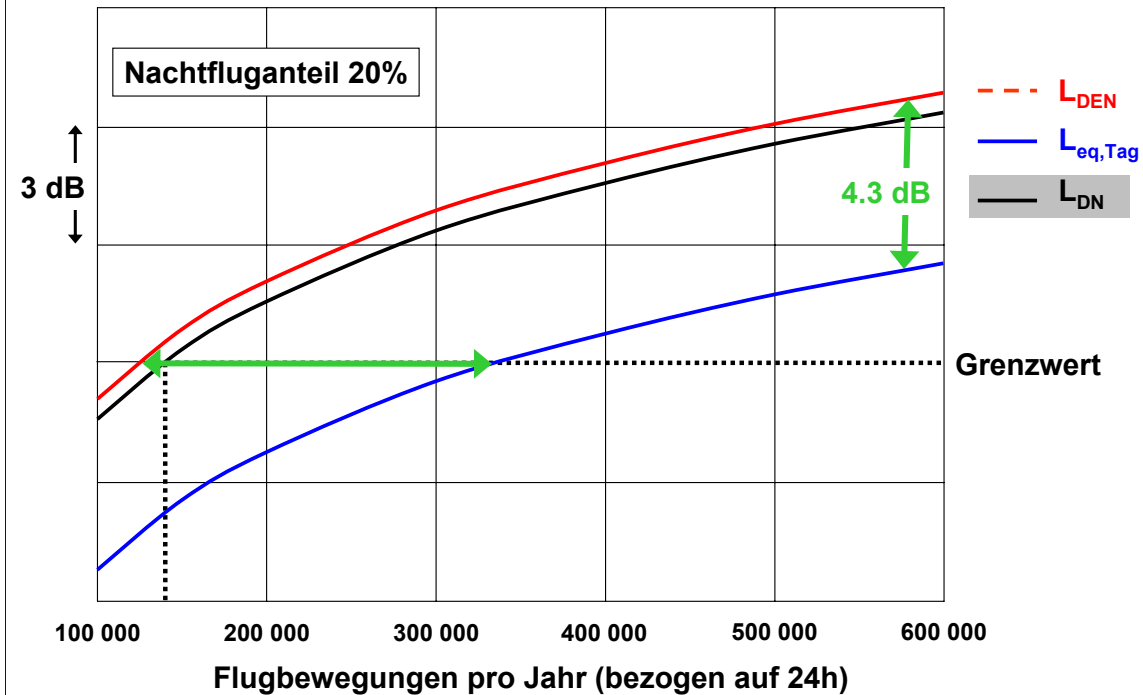
Treten nun 10% der Bewegungen in der Nacht auf (ein typischer Wert für den Flughafen Frankfurt), so hat dies bei gleicher Gesamtbewegungszahl folgende Effekte:

- Der Tages- L_{eq} sinkt, da weniger Tagesbewegungen abgewickelt werden.
- L_{DN} und L_{DEN} steigen, da auf Grund des Nachtaufschlages von 10 dB jede Nachtbewegung bei der Beurteilung 10 Tagesbewegungen entspricht.

Die größte Differenz tritt nun zwischen L_{DEN} und Tages- L_{eq} auf. Sie beträgt etwa 2.5 dB. Flächenmäßig entspricht dies einem Unterschied von knapp 60%.

Bei vorgegebener Schutzzone könnten bezogen auf den Tages- L_{eq} nunmehr etwa 300 000 Bewegungen pro Jahr abgewickelt werden. Bezogen auf L_{DEN} bzw. L_{DN} wären aber nur mehr 170 000 bzw. etwa 220 000 Bewegungen möglich.

Beurteilungsmaß und Grenzwert (3)

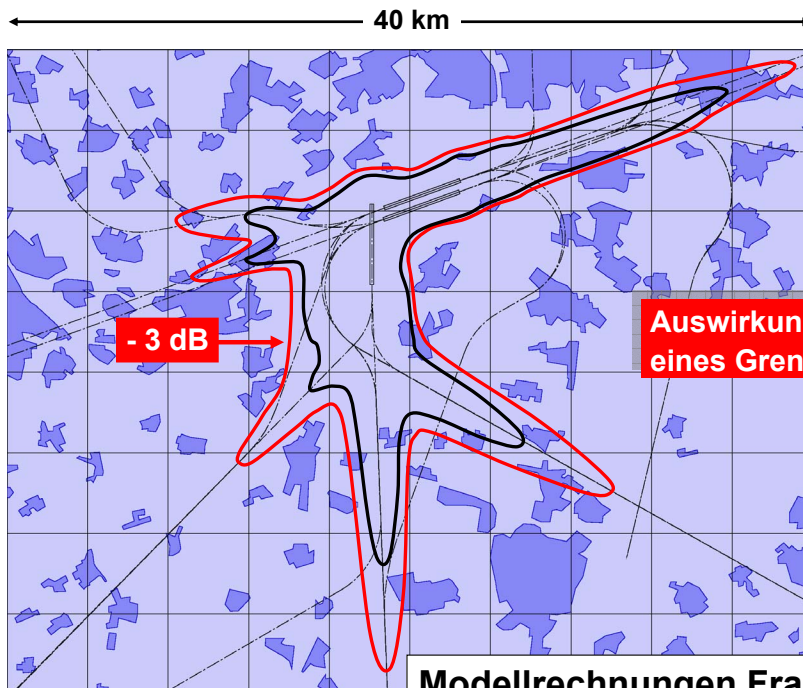


Bei einem Nachtbewegungsanteil von 20% (typisch für den Flughafen Köln-Bonn) klappt die Differenz weiter auseinander. Der Tages- L_{eq} sinkt weiter, während sich der L_{DN} dem L_{DEN} annähert.

Diese Beispiele verdeutlichen folgendes:

- Die Wahl des Grenzwertes muss auf jeden Fall an das entsprechende Beurteilungsmaß geknüpft werden. Es macht z.B. wenig Sinn, sich bei der Grenzwert-Definition am L_{DN} zu orientieren und dann einen Tages- L_{eq} zu benutzen. Beide Maße verhalten sich in Abhängigkeit von der Verkehrszusammensetzung stark unterschiedlich. Dies trifft – wenn auch in weniger starkem Maß – auf einen Vergleich zwischen L_{DN} und L_{DEN} zu.
- Beurteilungsmaß und Beurteilungszeit müssen einander angepasst sein. Sowohl L_{DN} als auch L_{DEN} sind reine 24-Stunden-Maße, die nicht für eine Tagesbeurteilung herangezogen werden sollten: Eine Verringerung der Tagesbelastung durch Verschieben von Verkehr in die Nacht lässt die Größe dieser Mittelungspegel stark zunehmen, konterkariert also die während der Tageszeit auftretende Abnahme des Lärms.

Effekt von Grenzwertabsenkungen (1)

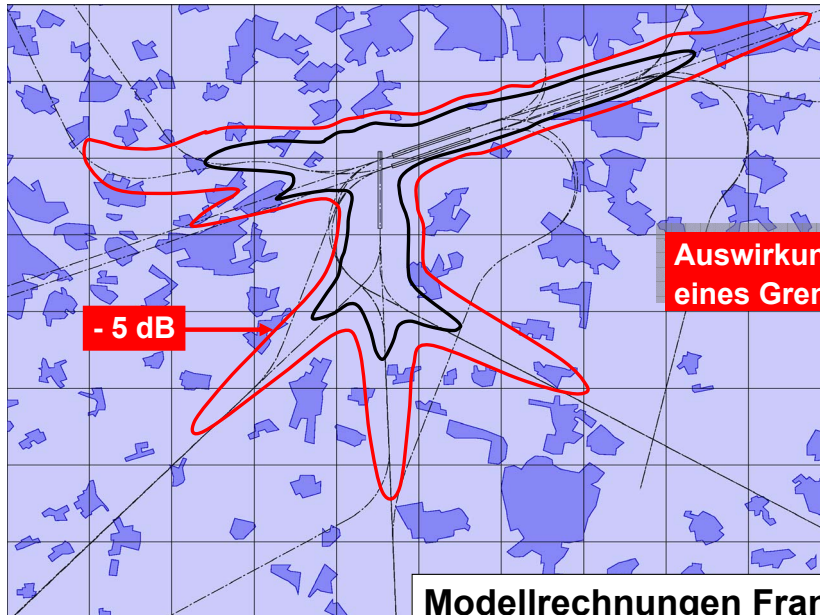


Dieses Beispiel zeigt, wie sich die Flächen einer Mittelungspegel-Kontur ändern, wenn man den Grenzwert um 3 dB absenkt. In guter Näherung entspricht eine Absenkung um 1 dB einer Flächenzunahme der Kontur um etwa 20%.

Effekt von Grenzwertabsenkungen (2)



← 40 km →



Modellrechnungen Frankfurt Rhein/Main

Hier ein Beispiel für eine Grenzwert-Absenkung um 5 dB – allerdings mit einer anderen Zusammensetzung des Flugverkehrs.

NAT = "Number Above Threshold"

- definieren die maximal erlaubte Überschreitungshäufigkeit eines Maximalpegel-Schwellenwerts
- werden u.a. zur Beurteilung der Wirkung nächtlichen Fluglärms herangezogen (Aufweckreaktionen)

Das Kriterium

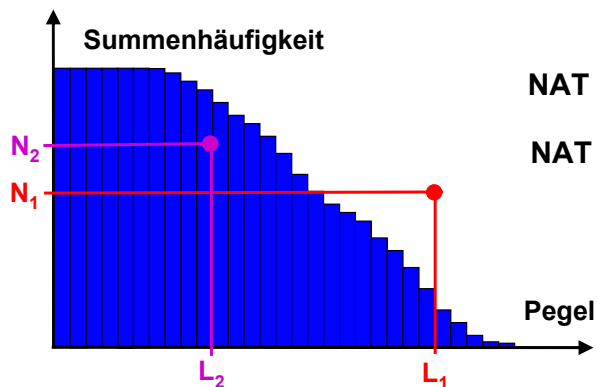
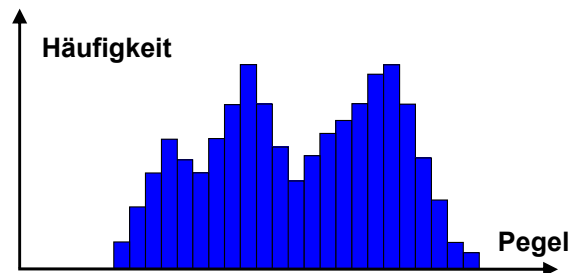
NAT $N \times L$ dB

ist erfüllt, wenn pro Nacht ein Maximalpegel von L dB mindestens N mal erreicht oder überschritten wird.

Ein anderes, insbesondere in Deutschland benutztes, Beurteilungskriterium stellen sog. „Schwellenwert-Kriterien“ (NAT = „Number Above Threshold“) dar. Diese Kriterien definieren maximal erlaubte Überschreitungshäufigkeiten einer bestimmten Maximalpegelschwelle und werden in der Praxis meist zur Beurteilung der Wirkung nächtlichen Fluglärms herangezogen. Grundannahme ist hier, dass ab einem gewissen Schwellenwert Aufweckreaktionen auftreten können, deren Häufigkeit aus medizinischen Aspekten auf einen gewissen Wert pro Nacht beschränkt werden sollte. Wenn NAT-Kriterien zur Beurteilung der Tagesbelastung benutzt werden, orientieren sie sich in der Regel an schalltraumatischen Hörschäden (Schwerhörigkeit etc.), die allerdings erst bei hohen Einzelpegeln (über 90 dB) zu erwarten sind.

Ein Kriterium NAT $N \times L$ dB ist dann erfüllt, wenn pro Durchschnittsnacht ein Maximalpegel von L dB mindestens N -mal erreicht oder überschritten wird.

Häufigkeitsverteilung und NAT-Kriterium

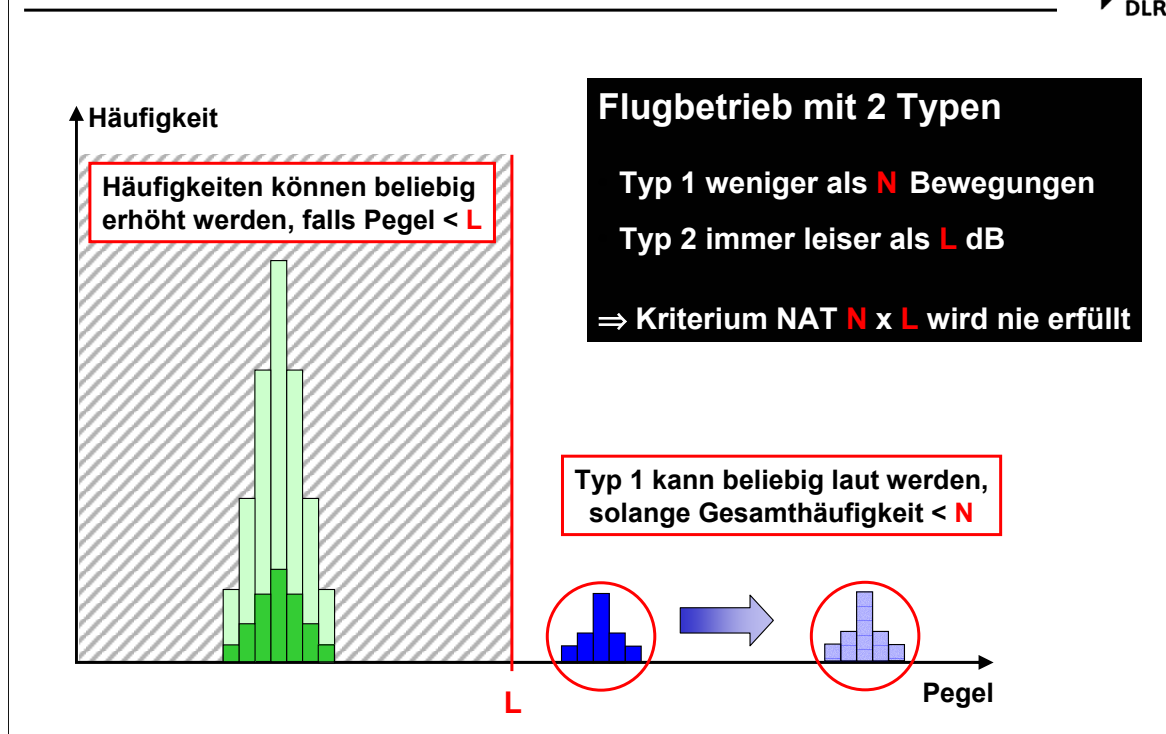


NAT $N_1 \times L_1$ dB **nicht erfüllt**

NAT $N_2 \times L_2$ dB **erfüllt**

Ob ein Schwellenwert-Kriterium erfüllt ist, lässt sich aus der Schallpegel-Summenhäufigkeitsverteilung erkennen. Diese kann sich aus der Pegel-Häufigkeitsverteilung dadurch ableiten, dass man sie von hohen zu niedrigen Pegeln hin aufsummiert. Dadurch erhält man für jeden Pegel die Information, wie oft er erreicht oder überschritten ist.

Da dies gerade die Grundlage für die Definition eines NAT-Kriteriums ist, stellt ein solches einen Punkt in der Pegel-Summenhäufigkeitsdarstellung dar. Liegt dieser Punkt unterhalb der Summenhäufigkeitskurve (in der Darstellung also im eingefärbten Bereich), so ist das Kriterium erfüllt.



Da NAT-Kriterien nur eine Kombination aus zwei diskreten Werten darstellen, basieren sie nicht auf einer Dosis-Wirkungsbeziehung. Insbesondere können sie auch gegenüber starken Änderungen in der Immissionssituation stabil sein:

Im obigen Beispiel sei ein Flugbetrieb angenommen, der von zwei Typen dominiert wird (Beispiel: Nachtbetrieb eines typischen Integrators). Ist für diesen Fall ein NAT-Kriterium der Form $N \times L$ dB vorgeschrieben, so ist dies an einen bestimmten Immissionsort nie erfüllt, solange

- der lautere Typ immer weniger als N Bewegungen durchführt und
- der leisere Typ an diesem Ort Pegel hervorruft, die unterhalb des Schwellenwerts liegen.

Das impliziert aber, dass unter diesen Voraussetzungen (1) der laute Typ beliebig laut sein darf und (2) vom leiseren Typ beliebig viele Operationen durchgeführt werden können. Ein Mittelungspegel könnte unter diesen Vorgaben dramatisch in die Höhe schnellen, ein NAT-Kriterium ist gegen derartige maßgebliche Änderungen resistent.

Äquivalente Dauerschallpegel L_{eq}

- Äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} korrelieren gut mit der mittleren Störwirkung über längere Zeiträume.
- Alle L_{eq} -Varianten sind daher gleich gut zur Beurteilung geeignet – allerdings müssen L_{eq} und Grenzwert aufeinander abgestimmt sein.
- Die Wahl eines L_{eq} sollte dem Anwendungsbereich angepasst sein.

- Ein äquivalenter Dauerschallpegel ist nicht zur Beschreibung von Aufweckreaktionen geeignet.
- Er ist nur begrenzt geeignet zur Beschreibung von Betriebsszenarien mit wenigen Flugbewegungen.

Hier noch einmal zusammenfassend die Eigenschaften von äquivalenten Dauerschallpegeln. Diese Mittelungspegel haben sich in der Praxis weltweit seit langen Jahren bewährt, sollten jedoch immer dem Anwendungsbereich angepasst sein.

Äquivalente Dauerschallpegel sind nicht zur Beurteilung von nächtlichen Aufweckreaktionen geeignet und eignen sich auch nur begrenzt zur Beschreibung von Flugbetriebsszenarien, die durch wenige Flugbewegungen charakterisiert sind (bei denen also die Maximalpegel im Mittel wesentlich höher als der Mittelungspegel sind).

Schwellenwert oder NAT Kriterien

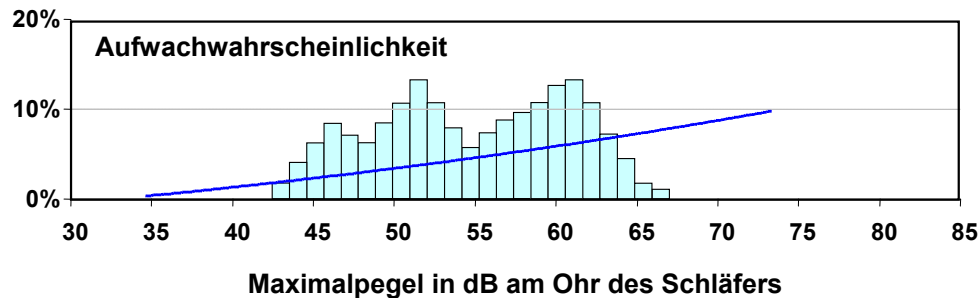
- NAT-Kriterien können zur Beschreibung von Aufweckreaktionen herangezogen werden.
- Sie basieren nicht auf einer Dosis-Wirkungs-Beziehung.
- Sie sollten daher nicht als Stand-Alone-Kriterium herangezogen werden, sondern nur in Zusammenhang mit einem Beurteilungsmaß, das auf einer Dosis-Wirkungs-Beziehung beruht.
- Die rechnerische Ermittlung von NAT-Kriterien bedarf besonderer Sorgfalt

Besser wäre ein Dosis-Wirkungs-basiertes Nachtfluglärmkriterium !

NAT-Kriterien können zur Beschreibung von Aufweckreaktionen herangezogen werden. Allerdings sollten sie nicht als alleiniges Maß zur Beurteilung benutzt werden, da sie nicht auf einer Dosis-Wirkungs-Beziehung aufsetzen. Aus diesem Grund werden sie in der deutschen Praxis auch fast durchweg in Kombination mit Mittelungspegeln benutzt.

Ein besserer Ansatz wäre allerdings ein Nachtfluglärm-Kriterium, das auf einer solchen Dosis-Wirkungs-Beziehung beruht. Ein solches soll abschliessend noch vorgestellt werden.

Das DLR-Nachtfluglärmkriterium



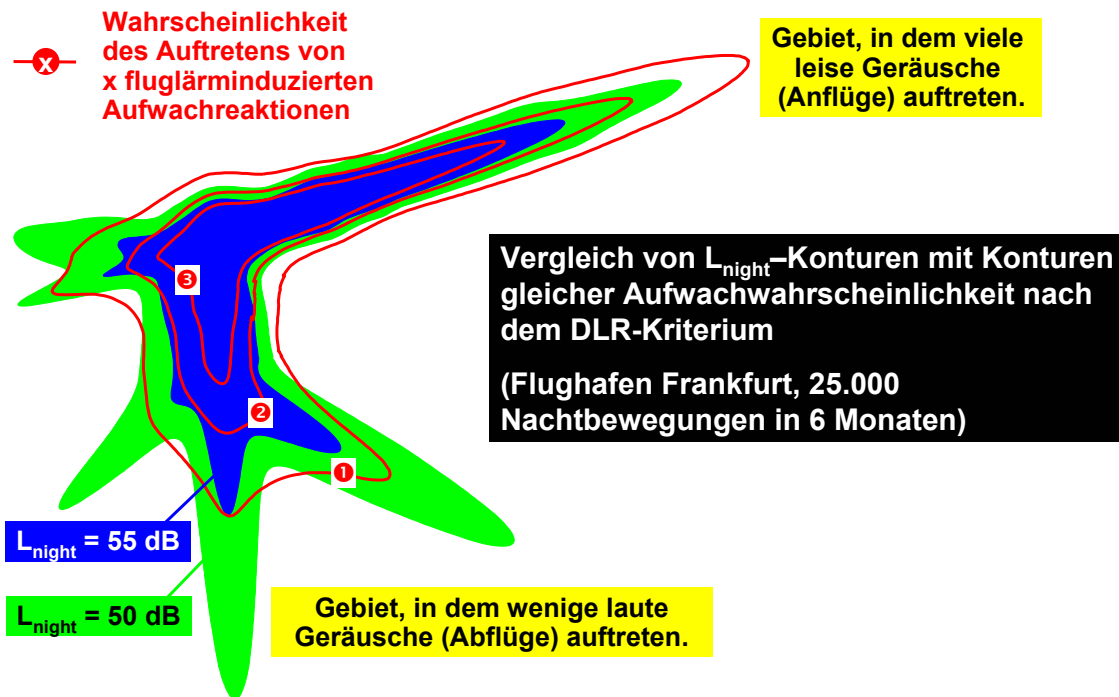
- Jeder Pegelklasse wird eine **prozentuale Aufwachwahrscheinlichkeit** zugeordnet (⇒**Wirkung**).
- Diese wird mit der Anzahl der in diese Pegelklasse fallenden Geräusche **multipliziert** (⇒**Dosis**).
- Die Anzahl der zu erwartenden **Aufwachreaktionen** ergibt sich aus der **Summation über alle Geräusche**

Aus den Resultaten der DLR-Nachtfluglärmstudie im Rahmen des Projekts „Leiser Flugverkehr“ ergab sich ein Zusammenhang zwischen der fluglärminduzierten Aufwachwahrscheinlichkeit und dem Maximalpegel am Ohr des Schlafers. Damit ist eine Dosis-Wirkungs-Beziehung definiert, die es ermöglicht, an einem bestimmten Immissionsort die Anzahl der durch Fluglärm hervorgerufenen Aufwachreaktionen zu ermitteln:

- Ausgangspunkt ist die am Immissionsort auftretende Pegel-Häufigkeits-Verteilung.
- Jeder Pegelklasse dieser Verteilung kann eine definierte Aufwachwahrscheinlichkeit zugeordnet werden (Wirkung).
- Durch Multiplikation dieser Wahrscheinlichkeit mit der Anzahl der in die Pegelklasse fallenden Geräusche (Dosis) und anschließende Summation ergibt sich so die Anzahl der insgesamt zu erwartenden Aufwachreaktionen.

Im Gegensatz zu einem NAT-Kriterium tragen hier alle Geräusche oberhalb eines Schwellenwerts von ca. 33 dB zur Aufwachwahrscheinlichkeit bei, wobei lautere Geräusche eher zu Aufwachreaktionen führen als leise.

Umsetzung des DLR-Nachtfluglärmkriteriums



Dieses Bild zeigt das Ergebnis einer ersten Berechnung von Konturen konstanter Wahrscheinlichkeit des Auftretens fluglärminduzierter Aufwachreaktionen nach dem DLR-Kriterium mit L_{night} -Konturen. Die Berechnung erfolgte für den Flughafen Frankfurt mit 25 000 nächtlichen Flugbewegungen in 6 Monaten.

In den Anflugbereichen, in denen viele Bewegungen mit vergleichsweise niedrigen Pegeln dominieren, liefert das DLR-Kriterium noch deutliche Beiträge. Der äquivalente Dauerschallpegel dominiert demgegenüber in Bereichen, in denen vergleichsweise wenige laute Geräusche auftreten (Abflüge hauptsächlich schweren Fluggeräts nach Süden). Dies liegt an der Tatsache, dass hohe Pegel den Wert des äquivalenten Dauerschallpegel dominieren (Pegel-Häufigkeits-Äquivalenz).