

Was bedeuten „dBA“ und „Leq3“?

Historie

Autor	Datum	Änderungen
Hartwig Richter	19.1.2011	Erstfassung
Hartwig Richter	6.12.2011	Erweiterung um Leq3, Änderung Titel

Inhalt

Zur Charakterisierung der Stärke von Schall, der sich in Luft ausbreitet, wird oft die Größe „A-bewerteter Schalldruckpegel“ und ihre (Pseudo-)Abkürzung „dBA“ verwendet. dB(A), dBa und dba sind dabei gleichwertige Schreibweisen. Die Begriffe Schalldruck, Schallleistung, Schalldruckpegel sowie die Empfindung und Gewichtung von Schall durch das menschliche Ohr werden beschrieben. Eine bewegliche Schallquelle wird simuliert und ihre Schallenergie wird berechnet. Anschließend wird der Leq3 dieser Quelle nach dem Fluglärmgesetz ermittelt.

1. Was ist Schall?

Schall kann dabei Sprache, Musik, Tönen, Geräusch oder Lärm sein, immer ist er eine Schwingung zwischen Zuständen der Luft, in denen die Luft durch die Schallquelle zusammen- oder auseinandergedrückt ist und die Luftteilchen sich in Ruhe befinden, und Zuständen, in denen sich die Luftteilchen bewegen, aber kein Schalldruck herrscht. Die Geschwindigkeit, mit der sich Luftteilchen hin und her bewegen, wird als Schallschnelle bezeichnet. Die Schallschnelle ist zu unterscheiden von der Schallgeschwindigkeit, der Geschwindigkeit, mit der sich die Schallschwingung ausbreitet.

Die Leistung von Schall (Schallleistung) ergibt sich aus dem Produkt von Schalldruck, Schallschnelle und der beschallten Fläche, unter der Voraussetzung, dass Schalldruck und –schnelle über der Fläche konstant sind.

2. Vorfaktor und Logarithmierung

In der Physik und in der Technik ist es üblich, statt einer Leistung den zugehörigen Leistungspegel zu verwenden. Dazu teilt man die Leistung durch eine Bezugsleistung, berechnet von dem Quotienten den dekadischen Logarithmus und multipliziert das Ergebnis mit 10.

Obwohl ein so berechneter Pegel keine Einheit hat, gibt man ihm die Pseudo-Einheit dB. Das „d“ steht für Dezi, also ein Zehntel. Andere Anwendungen des Dezi sind z.B. der Meter (10 dm = 1 m) oder der Liter (2 dl = 0,2 l). Ziel des Einsatzes von Dezi ist, bequemer handhabbare Zahlenwerte (z. B. ohne Komma) zu bekommen. Das „B“ steht für Bel und ist nach dem Erfinder des Telefons Alexander Graham Bell benannt. Es wird ausschließlich zusammen mit „d“ als „dB“ verwendet. Man sagt z. B. zwei Leistungen, bei denen die eine 100 mal größer ist als die andere, hätten einen Abstand von 20 dB voneinander (der dekadische Logarithmus von 100 ist 2, multipliziert mit 10 ergibt 20). Sind beide gleich groß, ist ihr Unterschied 0 dB (siehe Bild 1). Und wenn die erste nur ein Hundertstel der zweiten ist, ist ihr Unterschied -20 dB.

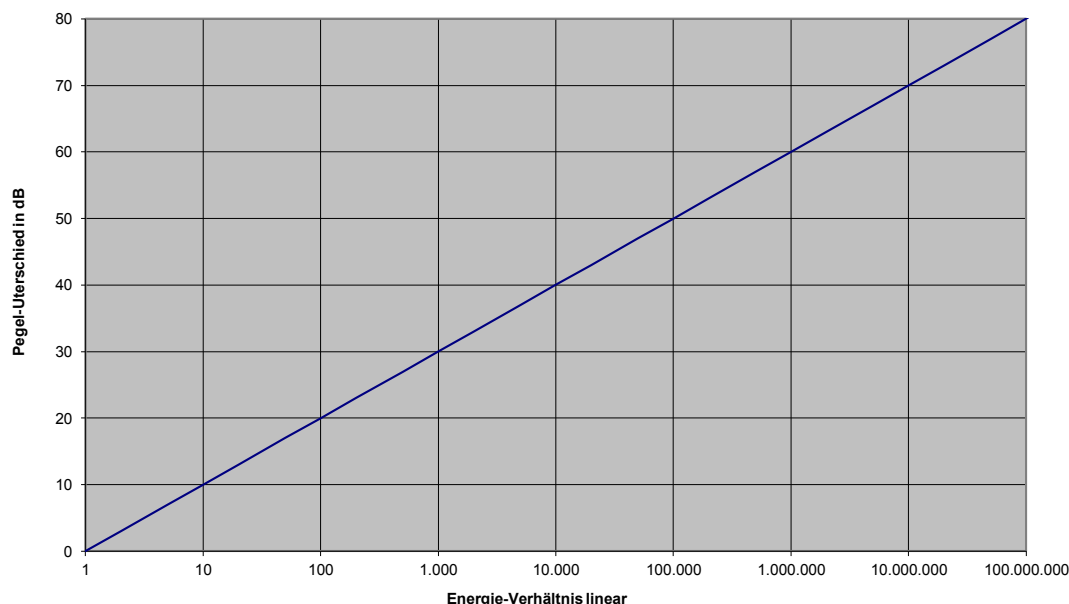


Bild 1 Umrechnung in dB

Ist die Bezugsleistung (im Nenner) bekannt, kann “dB” auch als Maß für die andere Leistung (die im Zähler) verwendet werden, jedoch ist dann ein Hinweis auf die Bezugsleistung erforderlich. Dieser Hinweis kann im begleitenden Text erfolgen oder durch Anhängen eines Buchstabens an “dB” wie z. B. in “dBA”.

In Luft stehen Schalldruck und Geschwindigkeit der Luftteilchen in einem festen Verhältnis. Verdoppelt man z. B. den Schalldruck, verdoppelt sich auch die Teilchengeschwindigkeit. Dieses Verhältnis ist abhängig von Wetterbedingungen wie Temperatur, atmosphärischem Luftdruck und Luftfeuchte.

Eine Schalleistung als Bezug bei der dB-Bildung wäre dann von diesen Wetterbedingungen abhängig. Deshalb ist es in der Schallmessung üblich, einen Schalldruck von 20 μ P (20 Millionstel Pascal) als Bezugswert zu nehmen. [1]

Da einerseits der Bezugswert bei der dB-Bildung eine Leistung ist, andererseits die Geschwindigkeit der Luftteilchen in einem festen Verhältnis zum Schalldruck steht, wird bei der Berechnung des Schalldruckpegels das Quadrat des Schalldrucks durch das Quadrat des Schalldruck-Bezugswertes (20 μ P) genommen.

Bei Standard-Wetterbedingungen und einer gleichmäßig beschallten Fläche von 1 m² ist die zu dem Bezugsschalldruck gehörende Schalleistung 1 pW (1 pW ist ein Millionstel eines Millionstel eines Watts, also 1 W geteilt durch 1 000 000 000 000). Ein solcher Bezugsschalldruck wurde gewählt, weil er in der Größenordnung der Hörschwelle liegt, des geringsten Schalldrucks, den das menschliche Ohr bei einer Frequenz von 1 kHz wahrnehmen kann. Diese Frequenz liegt etwas mehr als eine Oktave und zwei Halbtöne über dem Kammerton A von 440 Hz. Oberwellen werden dabei nicht mit gemessen.

Einen Schalldruckpegel mit diesem Bezugsschalldruck bezeichnet man mit Lautstärke. Als Einheit kann man dB relativ zu 20 μ P oder Phon nehmen, beide Einheiten sind identisch.

3. Gewichtung

Das menschliche Ohr empfängt Schall und wandelt ihn in Schallempfindung um. Die Stärke dieser Schallempfindung ist jedoch eine nichtlineare und frequenzabhängige Funktion des Schalldrucks. Für Töne mit einer Frequenz von 1 kHz wurde die Lautstärke definiert. Um auch andere Töne, Töne mit Oberwellen, Gemische aus beliebig zusammengesetzten Tönen oder Lärm, bei dem keine Töne erkennbar sind, messen zu können, wurde mit Tönen verschiedener Frequenz und unterschiedlichem Schalldruck einer Vielzahl von Menschen vorgespielt, die dann sagen sollten, bei welchem Schalldruck einer anderen Frequenz sie diesen Ton als genau so laut wie den Ton gleichen Drucks bei 1 kHz empfinden. Diese Versuche wurden für verschiedene Lautstärken wiederholt. Die Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt [2]. Die gestrichelte Kurve zeigt die Hörschwelle. Für die punktierten Kurven liegen nur wenige Messdaten vor, sie sind deshalb unsicher.

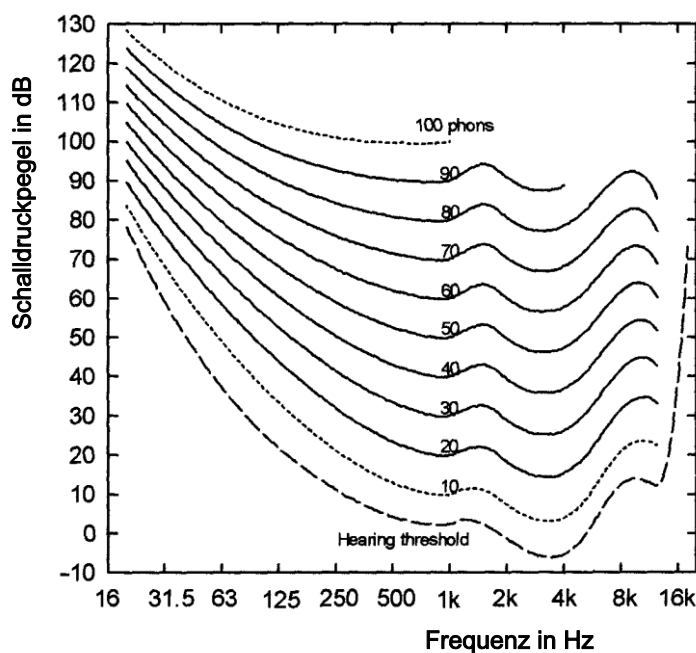


Bild 2: Kurven gleichen Hörempfindens für verschiedene Lautstärken (aus [2])

Auffällig ist, dass diese Kurven gleichen Hörempfindens bei unterschiedlicher Lautstärke nicht durch eine Parallelverschiebung nach oben oder unten gebildet werden, sondern für jede Lautstärke - insbesondere für Frequenzen unter 500 Hz - eine andere Form haben.

Deshalb definierte man vier Lautstärkebereiche:

- A-Bereich um 40 Phon
- B-Bereich um 70 Phon
- C-Bereich um 100 Phon und
- D-Bereich um 130 Phon.

Bei der Einteilung zählt natürlich nicht der Lärm der Quelle, sondern wie viel beim Empfänger ankommt. Für eine häusliche Umgebung, in der Unterhaltung in verständlicher Lautstärke stattfindet, ist deshalb der A-Bereich sinnvoll, auch wenn der Lärm von Quellen erzeugt wird, die viel lauter, aber weit weg sind.

Für Schallmessinstrumente, die Ergebnisse entsprechend den Empfindungen der Menschen liefern sollen, wurden Gewichtungsfunktionen bestimmt, die dieses Verhalten nachbilden und trotzdem einfach zu bauende Messinstrumente ermöglichen. Für den A-Bereich wurde eine Formel festgelegt, die in Bild 3 gezeigt ist und als A-Gewichtung bezeichnet wird. Sie beruht auf Messungen von Fletcher und Munson [3] aus dem Jahre 1933, die für Frequenzen oberhalb 200 Hz zu ähnlichen Ergebnissen wie die 40-phon-Kurve aus Bild 2 gekommen waren, unterhalb von 50 Hz sind die Unterschiede allerdings größer als 10 dB.

Die Formel für die A-Gewichtung gibt die Inverse der 40-phon-Kurve aus [3] wieder. Zu beachten ist, dass sie oberhalb von 15 000 Hz ungültig wird und dass sie unterhalb 200 Hz nicht mehr den neueren Messungen entspricht (siehe Fig. 5 in [2]).

Die Bildung der Inversen stellt sicher, dass Frequenzen, die schlecht gehört werden, ein geringes Gewicht bekommen. So ergibt sich beispielsweise, dass die Menschen Schall zwischen 1000 Hz und 6000 Hz als lauter empfinden als Schall bei 1000 Hz, auch wenn der Schall denselben Druck hat. Bei Frequenzen kleiner als 200 Hz dagegen muss der Schalldruck mehr als 10-mal größer sein, um als gleich laut empfunden zu werden.

In diesen Instrumenten wird der Schalldruck in seine Frequenzanteile zerlegt (Fourier-Analyse). Die in Bild 3 gezeigte Gewichtung legt dann fest, wie stark jeder Frequenzanteil in das Messergebnis eingeht. Das so gewonnene Messergebnis ist also die gewichtete Summe aller Frequenzanteile. Über die Gewichtungsfunktionen wird berücksichtigt, dass das menschliche Ohr für Frequenzen anders als 1 kHz ein anderes Hörempfinden hat.

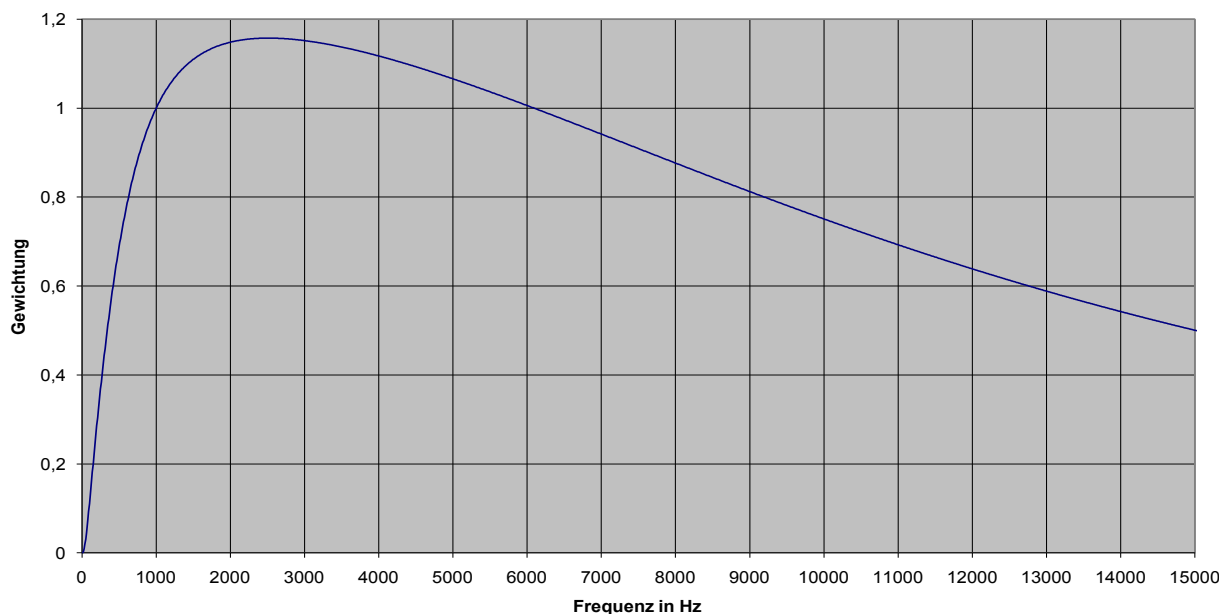


Bild 3: A-Bewertung

Die Vorgehensweise bei der Schalldruckpegelmessung ist also folgende:

- Der Frequenzbereich wird in verschiedene Teilbereiche unterteilt
- Für jeden Teilbereich wird der Schalldruck gemessen
- Jeder so gewonnene Teilschalldruck wird mit dem Gewichtungswert aus Bild 3 multipliziert
- Die so gewonnenen Ergebnisse (eins für jeden Teilfrequenzbereich) werden addiert
- Diese Summe wird durch den Schalldruck-Bezugswert ($20 \mu\text{P}$) geteilt
- Dieses Verhältnis wird logarithmiert
- Der Logarithmus wird mit 20 multipliziert
- Das Ergebnis ist der A-bewertete Schalldruckpegel und wird in dBA angegeben.

4. Summierung zweier Schallquellen

Wegen der Logarithmus-Bildung ist eine Darstellung in dBA nicht für die Aufsummierung von Schallquellen oder die Bewertung von sich zeitlich ändernden Schallquellen (z. B. Mittelwertbildung) geeignet. Hier muss man zunächst zurückrechnen und den Schalldruck (in μP) bestimmen. Erst dann kann man die Aufsummierung oder die Mittelwertbildung durchführen. Das so gewonnene Schalldruckergebnis ist dann wieder in einen Schalldruckpegel (in dBA) umzurechnen.

Bild 4 zeigt die Aufsummierung zweier Schallquellen. Die x-Achse ist das Verhältnis der kleineren zur größeren Quelle, umgerechnet in dB. Man beachte, dass durch diese Division der Bezugswert von $20 \mu\text{P}$ heraus gekürzt wird und deshalb dB und nicht dBA als x-Achsenheit steht. Auch die y-Achse beschreibt ein Verhältnis (Summenleistung beider Quellen geteilt durch Leistung der größeren Quelle) und ist deshalb ebenfalls in dB anzugeben.

Beispiel 1: Zwei Autos, die beide Lärm von 80 dBA erzeugen, stehen dicht nebeneinander. Da ihr Lärm gleich groß ist, ist der Pegelunterschied 0 dB. Für 0 dB ist in Bild 4 eine Erhöhung von 3 dB abzulesen. Der Gesamtpegel ist daher 83 dBA (und nicht 160 dBA, wie bei einer linearen Einheit wie z. B. μP zu erwarten wäre).

Beispiel 2: Das zweite Auto erzeugt Lärm von 60 dBA. Dies ist nur noch ein Zehntel des Lärms des ersten Autos. Mit einem Faktor von -20 dB kann man in Bild 4 eine Erhöhung von 0,1 dB ablesen, der Lärm beider Autos ist also 80,1 dBA und deshalb nur unwesentlich größer als der des ersten Autos allein.

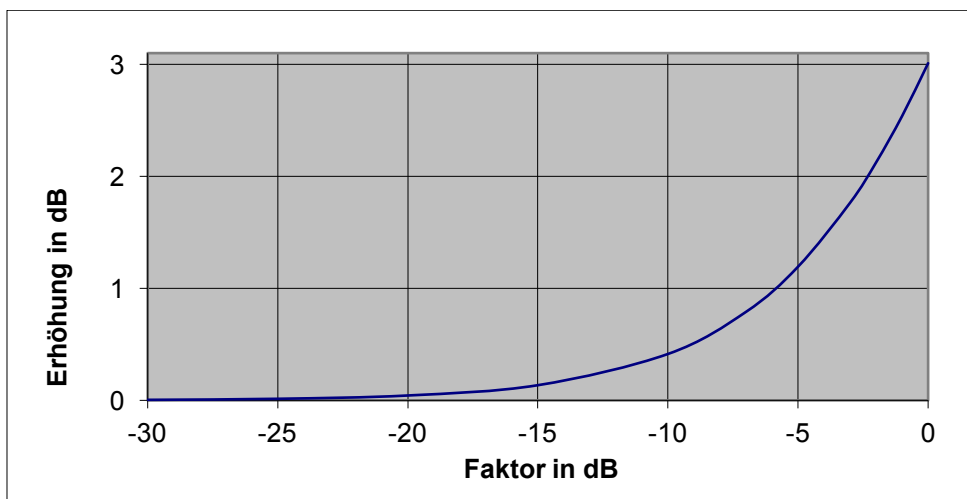


Bild 4: Summe zweier Schallquellen

5. Zeitliche Änderungen der Schalleistung

Für die Bewertung von sich zeitlich ändernden Schallquellen ist die Zeit in so kleine Abschnitte zu zerlegen, dass die Schalleistung in diesen Zeitabschnitten als unverändert angesehen werden kann. Für jeden Zeitabschnitt ist dann das Produkt Schalleistung mal Zeitabschnittsdauer zu bilden, diese Produkte sind dann zu addieren. Nach Teilung durch die Zeit hat man dann die Durchschnittsleistung, aus der der Durchschnittsschalldruckpegel berechnet werden kann. Dieser Wert wird als energetischer Mittelwert bezeichnet.

Für den Hörer als Empfänger des Schalls ist es unerheblich, ob die Schallquelle ändert oder ob die Schallquelle zeitlich konstanten Schall erzeugt, sich die Entfernung zwischen Schallquelle und Schallempfänger ändert oder eine Kombination aus beidem.

Bei Änderung der Entfernung sind zwei Effekte zu beachten. Zum Einem können Energie- oder Leistungsverluste entfernungsabhängig sein. Zum Anderen verteilt sich die Energie oder Leistung auf eine immer größere Fläche und der Anteil, der auf das Ohr trifft, wird mit wachsender Entfernung immer kleiner.

6. Schallempfindung

Das bisher gesagte gilt für die Funktion eines Instrumentes zum Messen von Schall, die Bewertungskurve von Bild 3 ist dabei im Instrument nachgebildet. Menschen empfinden jedoch nicht nur Töne verschiedener Frequenzen als unterschiedlich laut (in Bild 2 eine Bewegung entlang einer phon-Kurve), sondern ordnen unterschiedlichen Lautstärken derselben Frequenz auch andere Lautstärke-Empfindungen zu als dem Verhältnis der Schalldrücke entspricht (in Bild 2 der Sprung von einer phon-Kurve zur nächsten). So sagen sie, eine Schallquelle B sei doppelt so laut wie eine Quelle A, wenn der von Quelle B erzeugte Schalldruck um den Faktor 10 dB größer ist als der aus Quelle A. Beispiel: Lärm von 70 dBA wird als doppelt so laut empfunden wie Lärm von 60 dBA.

Ein solches Hörempfinden würde bedeuten, dass die Kurven von Bild 2 durch äquidistante Verschiebung entstanden wären.

Für den Frequenzbereich größer 500 Hz ist dies zwar nicht streng, aber im Rahmen der Messunsicherheit noch gut erfüllt, insbesondere für Pegel größer 40 dBA. In diesem Bereich ist es gerechtfertigt, zu sagen, dass das menschliche Hörempfinden eine logarithmische Funktion des Schallpegels ist.

Für Frequenzen kleiner 500 Hz sind die Abweichungen jedoch erheblich. Die Ungenauigkeit ist bei einem angezeigten Wert von 40 dBA am geringsten, dies liegt an der unvollkommenen Nachbildung des Hörempfindens durch die in Bild 3 gezeigte Kurve. Die Ungenauigkeit steigt mit wachsendem Schalldruck, weil im Frequenzbereich kleiner 500 Hz die Messkurven in Bild 2 nicht mehr äquidistant sind. Deshalb sind hier auch die Unterschiede zwischen A-, B-, C- und D-Bewertung am größten. Die Auswirkungen dieser Unterschiede sind natürlich besonders groß, wenn die Quelle starke Frequenzanteile zwischen 20 und 500 Hz enthält. Das bedeutet, dass in diesem Frequenzbereich ein in dBA kalibriertes Messinstrument die Lärmempfindungen der Menschen nur sehr unvollkommen wiedergeben kann.

7. Modellrechnung für eine bewegliche Schallquelle

Die folgende Modellrechnung soll eine für Verkehrslärm typische Situation nachbilden. Dabei werden folgende Voraussetzungen gemacht:

1. Schallquelle zeitlich konstant
2. Schallquelle strahlt gleichmäßig in alle Richtungen
3. Schallquelle bewegt sich auf gerader Bahn mit konstanter Geschwindigkeit „v“
4. Kürzeste Entfernung „a“ zum Schallempfänger wird zu der Zeit „t = 0“ erreicht
5. Luft ruhig (kein Wind)
6. Schallausbreitung verlustfrei
7. Doppler-Effekt vernachlässigt
8. Werte für Modellrechnung: a=1000 m, v=700 km/h, Maximaler Schallpegel 60 dBA.

Für die Entfernung zwischen Schallquelle und Schallempfänger gilt „ $z = \text{Wurzel}(a^2 + (v \cdot t)^2)$ “. Bei konstanten „a“ und „v“ ist z eine Hyperbel. Mit a=1000 m und v=700 km/h erhält man die in Bild 5 gezeigte Kurve.

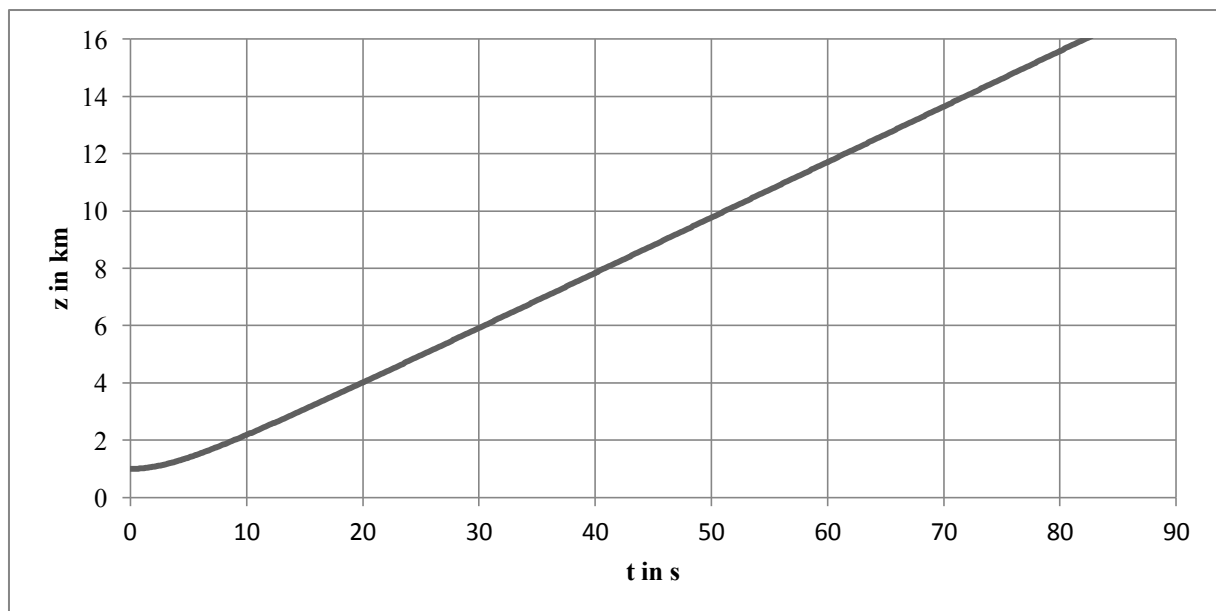


Bild 5: Entfernung

Unter den oben genannten Voraussetzungen sind alle Bilder 5 bis 9 symmetrisch zu „t = 0“.

Für den empfangenen Schalldruck (siehe Bild 6 rote Kurve) gilt

$$p(t) = A / \text{Wurzel}(a^2 + (v \cdot t)^2),$$

die Konstante „A“ ist dabei so gewählt, dass der Schalldruckpegel (siehe Bild 7 rote Kurve) bei „t = 0“ 60 dBA beträgt. Bild 7 zeigt die zu Bild 6 gehörigen Schalldruckpegel entsprechend $20 \cdot \log_{10}(\text{Schalldruck} / \text{Schallreferenzdruck})$.

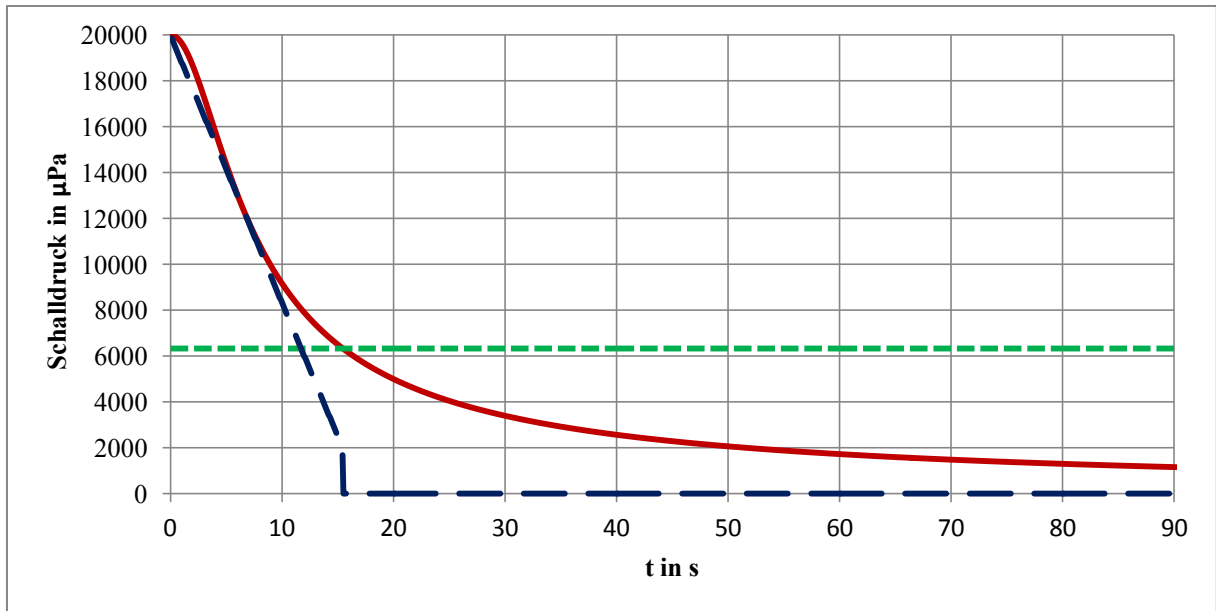


Bild 6: Schalldruck

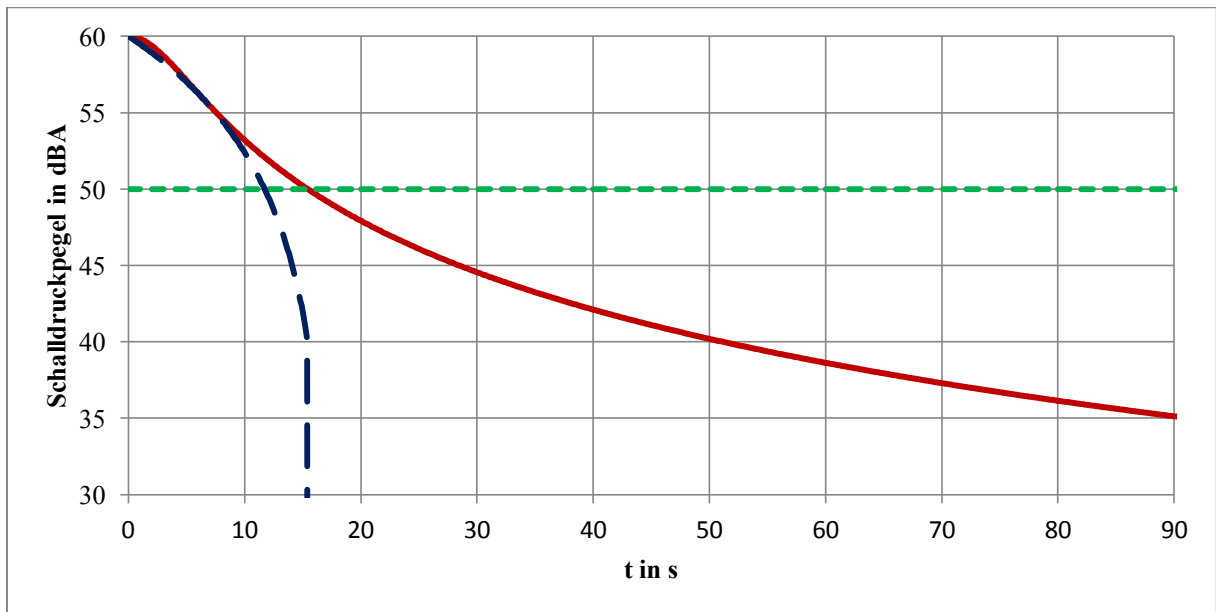


Bild 7: Schalldruckpegel

Für eine energetische Mittelwertbildung (wie z. B. im Fluglärmgesetz verlangt) ist die Schalleistung zu berechnen. Hierzu ist das Quadrat des Schalldrucks durch die Schallimpedanz zu teilen (Bild 8 rote, durchgezogene Kurve). Die Schallenergie ist die Fläche unter der roten Kurve, da im Bild der negative Teil der Zeit fehlt, ist diese Energie zu doppeln. Die grüne, kurz gestrichelte Kurve gibt eine Schwelle 10 dB unter der Spitze der roten Kurve wieder. Die blaue, lang gestrichelte Kurve ist eine Gerade zwischen der Spitze der roten Kurve und dem Schnittpunkt der roten mit der grünen Kurve. Im negativen Zeitbereich ist sie zu spiegeln. Für Schalleistungen kleiner als die grüne Schwelle ist die blaue Kurve Null.

Eine gute Näherung für die Schallenergie erhält man, wenn man das Dreieck aus grüner Schwelle und blauer Gerade bildet, der negative Zeitbereich ist zu berücksichtigen.

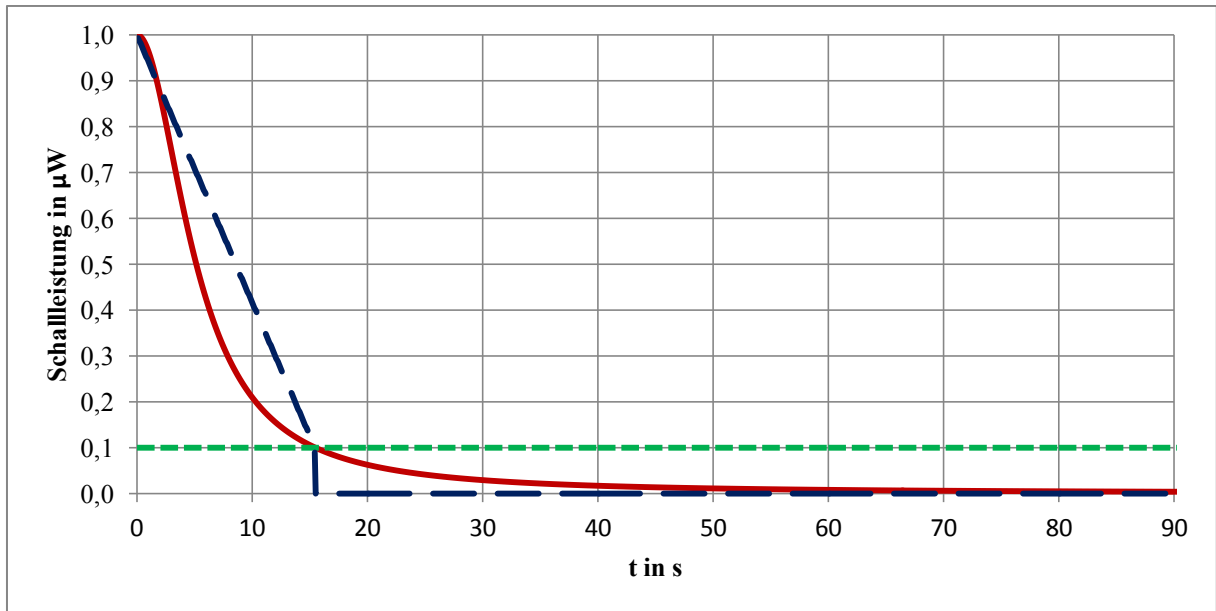


Bild 8: Schalleistung

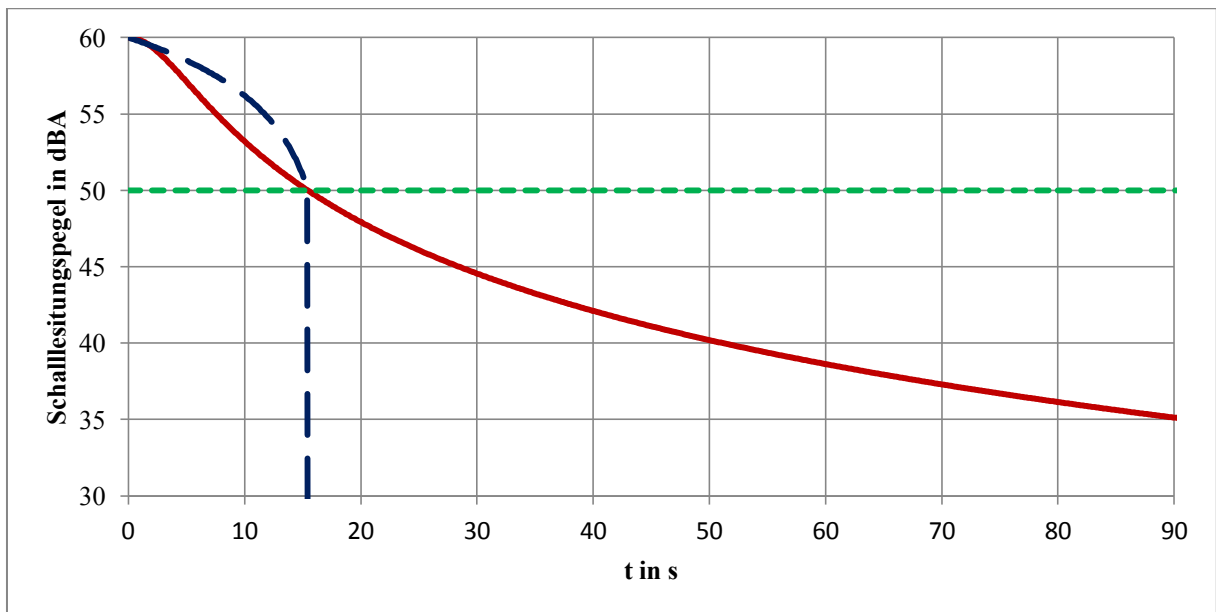


Bild 9: Schalldruckpegel

Bild 9 zeigt die zu Bild 8 gehörigen Schalldruckpegel bezogen auf einen Referenzwert von 1 pW.

8. Berechnung des L_{eq3}

Die Berechnung der Schallenergie für ein Einzelereignis ist in Bild 8 gezeigt. Das Fluglärmgesetz [4] erlaubt dabei sowohl die Integration der roten Kurve als auch die Näherung über die Dreiecksberechnung. Eine numerische Auswertung zeigt, dass die Fläche unter der roten Kurve und die Dreiecksfläche sich nur um wenige Prozent unterscheiden. Für das gezeigte Beispiel ist die Näherung in Anbetracht der Messunsicherheit akzeptabel.

Um wieder auf einen Schalleistungspegelwert zu kommen, wird die so berechnete Schallenergie durch die Zeit geteilt, in der die rote Kurve größer als 40 dBA ist. Der zugehörige Schalldruckpegel ist der Leq3 für ein Einzelereignis.

Für mehrere Ereignisse ist die Summe der Schallenergien aller so berechneten Einzelereignisse zu bilden, Einzelereignisse mit Leq3 kleiner als ein Mindestwert werden dabei nicht berücksichtigt. Ereignisse zu Tages- und zu Nachtzeit werden unterschiedlich gewichtet [4]. Die so ermittelte gesamte Schallenergie ist durch die Betrachtungszeit zu teilen. Der zugehörige Schalldruckpegel ist der Leq3 für diese Betrachtungszeit.

Zusammenfassung

Mit Hilfe von Literaturrecherche wird gezeigt, dass Hören ein nichtlinearer und frequenzabhängiger Vorgang ist. Für bestimmte Bereiche des Schallpegel-Frequenzdiagramms können diese Nichtlinearitäten näherungsweise linearisiert werden. Oft arbeiten Messgeräte jedoch auch in Bereichen, in denen das Hörempfinden nur sehr unvollkommen mit dem Messergebnis übereinstimmt. Die Angabe "dBA" ist dann eher als eine Mess- und Rechenvorschrift denn als eine Maßeinheit zu verstehen.

In einer Modellrechnung mit typischen Werten wird die Berechnung des Leq3 für ein Einzelereignis dargestellt. Die Berechnung des Leq3 für einen größeren Betrachtungszeitraum wird beschrieben.

Danksagung

Der Verfasser dankt Herrn Peter Süßmann [5] für zahlreiche Diskussionen zum Thema Leq3.

Quellennachweis

[1] <http://www.wikipedia.org/>

[2] Yôiti Suzuki (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University: Japan) und andere
"Precise and Full-range Determination of Two-dimensional Equal Loudness Contours",
www.mp3-tech.org/programmer/docs/IS-01Y-E.pdf

[3] H. Fletcher, and W. A. Munson,
"Loudness, its definition, measurement and calculation",
J. Acoust. Soc. Am. **5**, 82-108 (1933)

[4] Bundesgesetzblatt Teil I vom 9.11.2007 Seite 2550 und folgende
http://www.bgbl.de/Xaver/text.xav?bk=Bundesanzeiger_BGBI&start=%2F%2F*%5B%40attr_id%3D'bgbl1111s0034.pdf'%5D&wc=1&skin=WC

[5] <http://www.darmstadt-wetter.de/>

Nächste Version

Vorschläge zu Korrekturen, Änderungen, Ergänzungen und Kommentare bitte an
igab-darmstadt@t-online.de