

# Luftschallmessung - messen, was man hört

## Diskrepanz, Höreindruck, Messergebnis

Schalldruckmessungen am Schlafplatz oder Analysen von störenden Umweltgeräuschen führen oft zu unbefriedigenden Ergebnissen. **So kommt es vor, dass ein Geräusch, das man misst, lauter empfunden wird, als der Messwert vorgibt.** Dieses Empfinden wird immer stärker, je mehr Messungen man durchführt.

Oder auch Geräusche, die Menschen stören, ja fast zum Wahnsinn treiben, werden vom Schalldruckpegelmessers als nur sehr wenig laut gemessen.

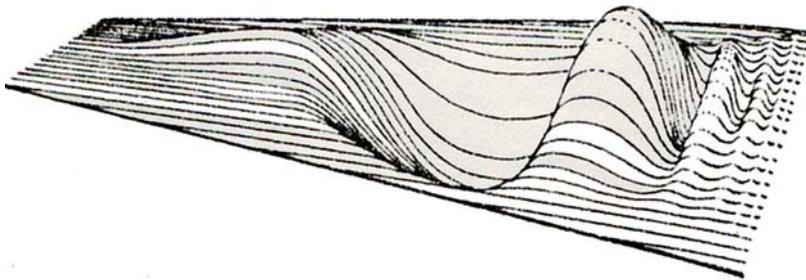
Irgend etwas stimmt da nicht- richtig!

## Das menschliche Hörverhalten

Das Hörverhalten des Menschen und die "Auswertung eines Schalles" durch das Gehirn hat kaum etwas mit der Messung eines Schalldruckpegelmessers gemein. Für leise Umweltgeräusche, unter ca. 60 dB ohne tonale Anteile (einzelne auffällige Frequenzen), kann die A-Pegelmessung ein Maß für menschliches Empfinden sein. Dieser Fall kommt aber sehr selten vor. **Wenn ein Geräusch stört, sind meist dominante hervorstechende Frequenzanteile enthalten.** Es ist oft auch der Fall, dass der niederfrequente Bereich (Frequenzen zwischen 20 und 100 Hz) im Umweltgeräusch sehr stark ausgeprägt ist. Dieser Bereich wird aber durch die A-Bewertung massiv unterbewertet.

## Ohrphysiologie

Ein Geräusch wird über Trommelfell, Gehörknöchelchen und ovales Fenster in das Innenohr, die Hörschnecke übertragen. Auf der Basilarmembran breitet sich vom Anfang bis zu deren Ende, je nach Anregung, eine Wanderwelle aus.



**Bild 1: Computersimulation der Auslenkung einer Basilarmembran**

Quelle: Tondorf

Die Basilarmembran wird an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark ausgelenkt. Jede Stelle auf der Basilarmembran ist für unterschiedliche Frequenzbereiche empfindlich und leitet, je nach Größe der Auslenkung, diese in Form von elektrischen Strömen über den Hörnerv an den auditorischen Cortex\* im Gehirn weiter. Dort wird eine sehr komplexe Analyse des Geräusches durchgeführt, und in Folge dessen, auch körperliche Reaktionen ausgelöst.

## Der Frequenzanalysator im Ohr, seine Funktionsweise

Die Basilarmembran ist quasi ein Frequenzanalysator\*, der aber nicht jede einzelne Frequenz erkennen kann. Der Lautstärkeindruck eines Schalles wird in sogenannte Frequenzgruppen

zusammengefasst. Über den **Hörbereich von 20 - 20.000 Hz** gibt es **24 Frequenzgruppen**, die im Frequenzumfang unterschiedlich breit sind.

Frequenzgruppe	Frequenzbereich	Frequenzgruppe	Frequenzbereich
1	- 100 Hz	13	1.720 - 2.000 Hz
2	100 - 200 Hz	14	2.000 - 2.320 Hz
3	200 - 300 Hz	15	2.320 - 2.700 Hz
4	300 - 400 Hz	16	2.700 - 3.150 Hz
5	400 - 510 Hz	17	3.150 - 3.700 Hz
6	510 - 630 Hz	18	3.700 - 4.400 Hz
7	630 - 770 Hz	19	4.400 - 5.300 Hz
8	770 - 920 Hz	20	5.300 - 6.400 Hz
9	920 - 1.080 Hz	21	6.400 - 7.700 Hz
10	1.080 - 1.270 Hz	22	7.700 - 9.500 Hz
11	1.270 - 1.480 Hz	23	9.500 - 12.000 Hz
12	1.480 - 1.720 Hz	24	12.000 - 15.500 Hz

**Tabelle 1: Frequenzgruppen und der dazugehörige Frequenzbereich**

Im tiefen Frequenzbereich sind die Frequenzgruppen sehr schmal, zu hohen Frequenzen hin werden sie immer breiter. Durch diese Funktionsweise können **Frequenzanteile in einem Geräusch verdeckt werden**, das heißt sie sind für uns nicht hörbar, obwohl sie physikalisch vorhanden sind. Im niederfrequenten Bereich hören wir mehr aufgelöst, hohe Schallenergie hierin verdeckt Schallereignisse im mitten- bis hochfrequenten Hörbereich, erschweren z.B. die Sprachkommunikation.

Ebenso gibt es auch eine **zeitliche Verdeckung**. Die Basilarmembran, wenn sie denn ausgelenkt wurde, kann nicht x-beliebig schnell in ihre Ruhelage zurück schwingen, das dauert je nach Auslenkung 10 -100 ms. Wenn in dieser Zeit leise Geräusche auftreten, können diese ebenfalls nicht oder nur gering in der Lautstärke wahrgenommen werden.

### **Der "wirkungsangepasste Schalldruckpegel"; die A-Bewertung**

Anfang/Mitte der 60er Jahre wurde der A-bewertete Schalldruckpegel international eingeführt. Dabei war man sich bewusst, dass dieser das Hörempfinden von Menschen nur unzureichend berücksichtigt. Er dient als Indikator.

Ein Lösungsansatz, und der ist heute noch gültig, ist das sogenannte "Äquivalenzverfahren": man misst Schalldruckpegel über bestimmte Zeitabschnitte und addiert diese energetisch auf. Dies kommt dem Lautstärkeempfinden näher, hat aber immer noch große Schwächen.

### **Die Zwicker'sche Lautheitsberechnung**

Von diesem Problem war ich in den letzten Jahren oft berührt, wenn es darum ging, menschliche Lärmempfindung und Messergebnisse zusammen zu führen. **Die Lösung ist die "Zwicker'sche Lautheitsberechnung"**. Professor Zwicker war Physiker und Akustiker, der das menschliche Hörverhalten sehr detailliert untersucht hat. Es gibt dazu noch viele Mitarbeiter und Schüler von ihm, die das Verfahren vervollkommen und verbessert haben. Entstanden ist daraus eine Schallanalysesoftware, die das menschliche Gehör modelliert.

Der Mensch beurteilt Schallereignisse nach

- Einwirkungsdauer
- spektraler Zusammensetzung
- zeitlicher Struktur
- Pegel
- Informationsgehalt
- subjektive Einstellung

Man kann also erkennen, dass der Pegel alleine nur sehr unvollkommen eine Beurteilung eines Schallereignisses zulässt. Viele weitere Parameter sind notwendig. Das macht dieses Verfahren auch komplizierter und erfordert sehr schnelle Computer zur Berechnung. Wichtig dabei ist die Tatsache, dass **die Zwicker'sche Lautheitsberechnung die niederfrequenten Anteile in einem Geräusch erheblich mehr gewichtet, als es die A-Schallpegelmessung tut.** Um ein Schallereignis hinsichtlich seiner Lästigkeit und auch der Wirkung auf den Menschen zu charakterisieren, benutzt die Lautheitsberechnung nach Zwicker 5 Parameter.

Diese sind:

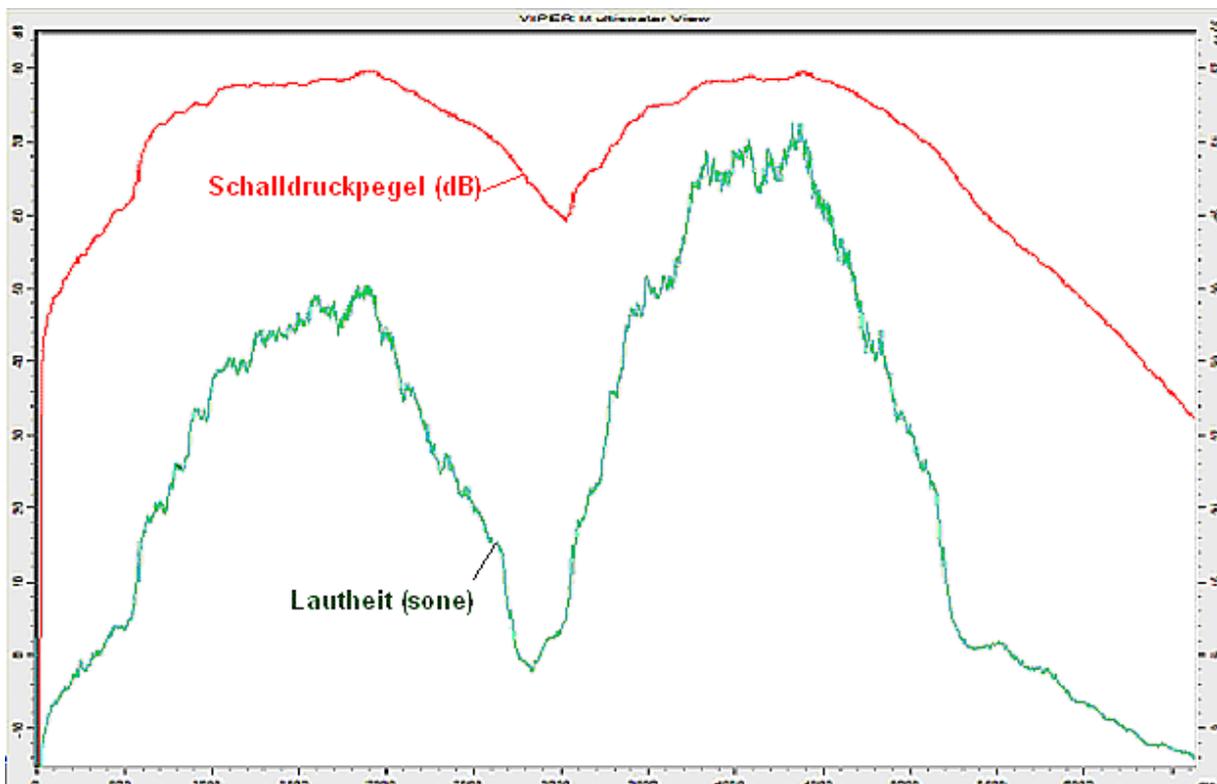
- die Lautheit N, zur Beschreibung des Lautstärkeindrucks;
- die Schärfe S, zur Beschreibung des Höhenanteiles am Schallereignis;
- die Schwankungsstärke F, zur Beschreibung langsamer Lautstärkeschwankungen;
- die Rauigkeit R, zur Beschreibung schneller Lautstärkeschwankungen;
- die Tonhaltigkeit, zur Beschreibung von auffälligen tonalen Anteilen in einem Geräusch.

Lautheit und Schärfe sind dabei die wichtigsten Größen. **Ein großer Vorteil der Methode ist, dass der Lautheitsmaßstab linear ist;** ein Geräusch mit 8 sone ist doppelt so laut, wie eines mit 4 sone. Sone ist die Einheit, mit der die Lautheit angegeben wird.

### Die Lautheitsmethode am praktischen Beispiel

Ein sehr schönes Beispiel aus dem alltäglichen Leben ist das von zwei vorbei fahrenden Mopeds. Das Beispiel stammt von der TU München. Der berechnete, A-bewertete Schalldruckpegel, die offizielle Bewertungsmethode, errechnet für **beide einen Schalldruckpegel von 75 dB(A).**

Die errechnete **Lautheit dagegen gibt ein Moped mit 39 sone und das zweite mit ca. 52 sone** an, siehe dazu Bild 2. Der obere Kurvenverlauf zeigt den A-bewerteten Schalldruckpegel, der untere Kurvenverlauf die Lautheit jeweils über der Zeit dargestellt.

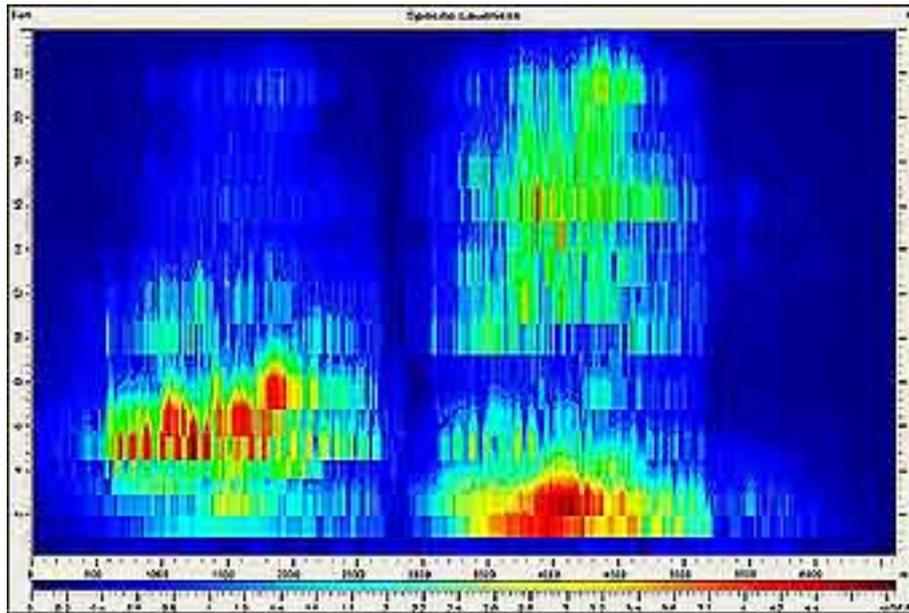


**Bild 2: A-Pegel und Lautheit abhängig von der Zeit.**

Quelle: TU München

Wer das Beispiel hören kann, wird dieses Ergebnis der Lautheitsberechnung bestätigen!  
(Siehe beiliegende wave- Datei zum downloaden!)

Das Spektrogramm der spezifischen Lautheit (specific loudness) zeigt dann auch den Grund für den Lautstärkeunterschied, siehe dazu Bild 3.



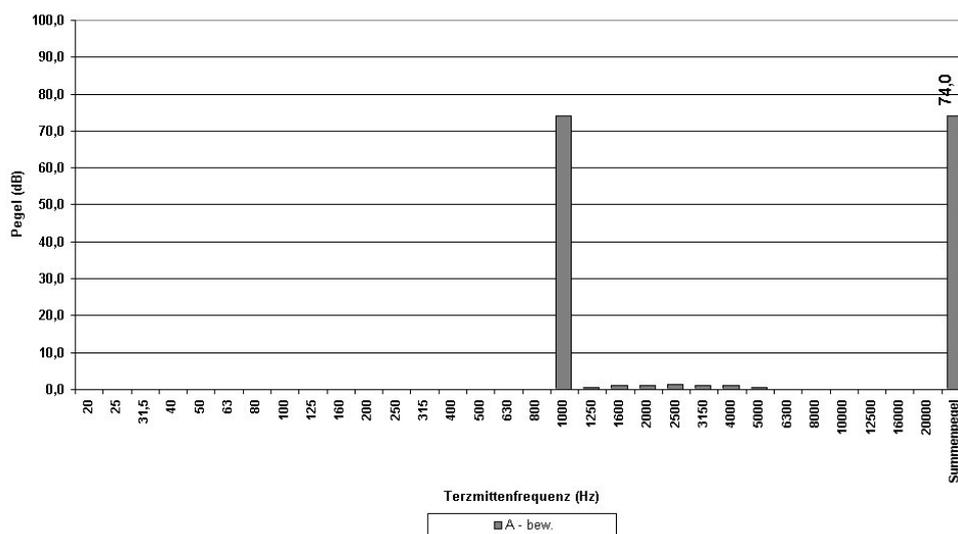
**Bild 3: Spektrogramm der spezifischen Lautheit - links Moped 1, rechts Moped 2**

Quelle: TU München

Das Moped 1, links, ist am lautesten im Frequenzbereich von 500 - 1.300 Hz. Dagegen ist Moped 2 am lautesten im Frequenzbereich von 200 - 400 Hz und im Bereich von 1.300 bis 7.700 Hz. Die Frequenzzusammensetzung der zwei Mopedgeräusche ist also völlig unterschiedlich.

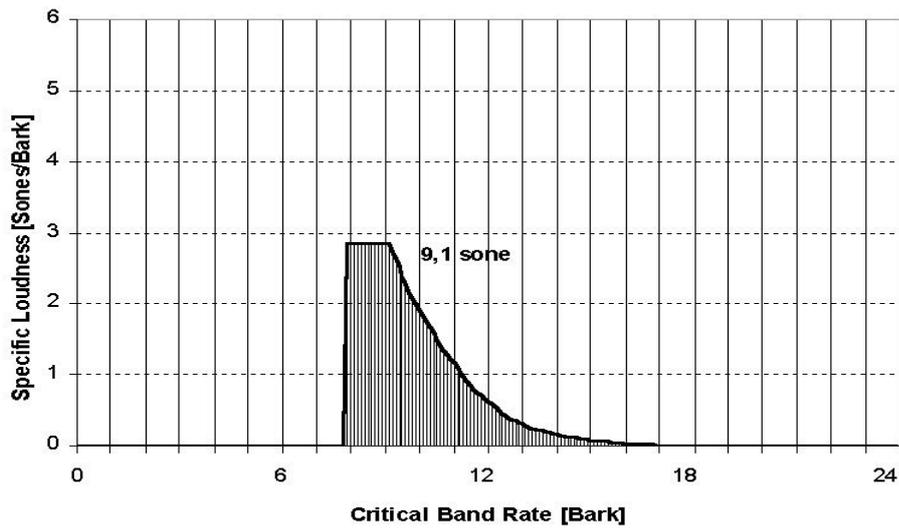
Welchen Einfluss die Frequenzzusammensetzung auf die Lautheit eines Geräusches hat, zeigt das folgende theoretische Beispiel:

Ein terzbreites, also relativ schmalbandiges, Rauschsignal, das mit 74 dB(A) vom Pegelmesser ermittelt wird, zeigt nach der Lautheitsberechnung eine spezifische Lautheit von 9,1 sone (s. Bild 4).



**Bild 4a: Schalldruckpegel von schmalbandigem Terzrauschen, Mittenfrequenz 1.000 Hz**

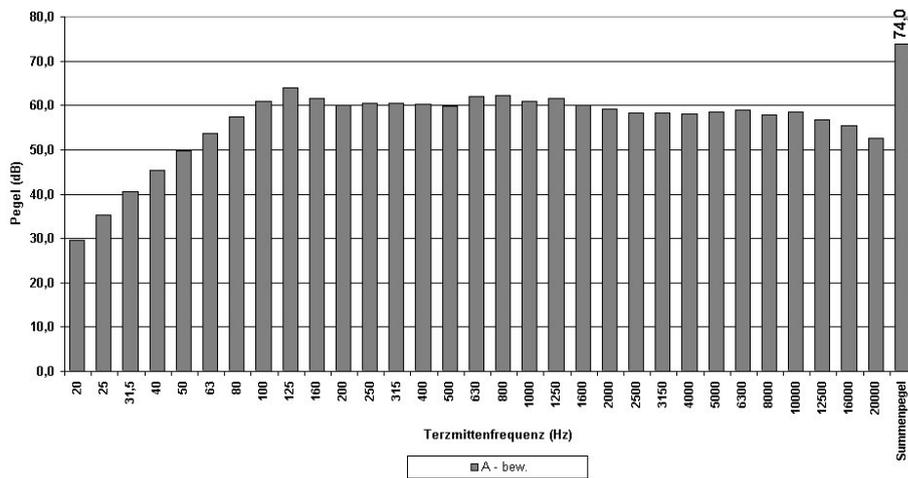
Quelle: J. Muck



**Bild 4b: Spezifische Lautheit vom Terzrauschen, siehe Bild 4a**

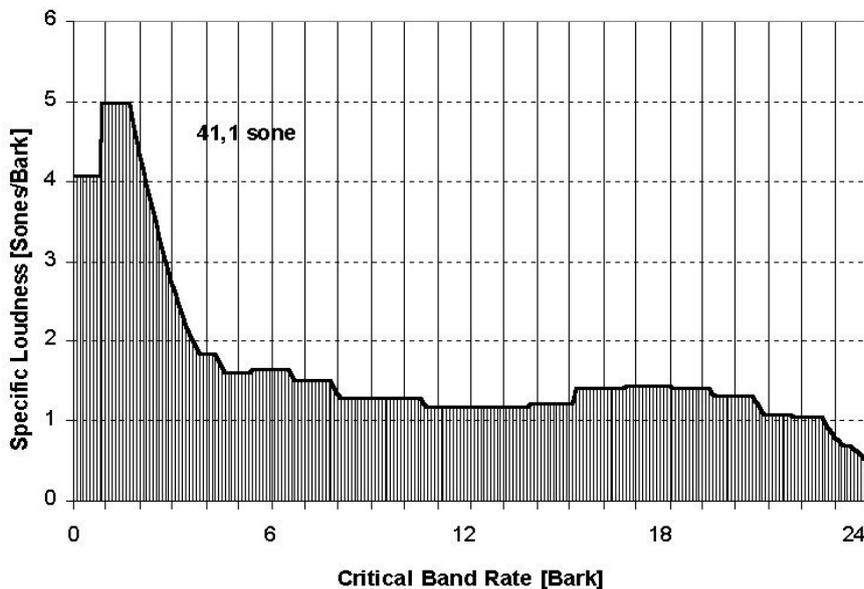
Quelle: J. Muck

Ein Rauschsignal über den ganzen Hörbereich, also von 20 - 20.000 Hz, mit unterschiedlichen Terzpegeln führt ebenfalls zu einem Schalldruckpegel von 74 dB(A), wogegen die aus diesem Geräusch ermittelte Lautheit bei 41,1 sone liegt (siehe Bild 5).



**Bild 5a: Breitbandiges Rauschen über den ganzen Hörbereich**

Quelle: J. Muck



**Bild 5b: Spezifische Lautheit vom Breitbandrauschen, siehe Bild 5a**

Quelle: J. Muck

Es ist also bei einem Schalldruckpegel von 74 dB(A) ein Lautheitsunterschied von 41,1 zu 9,1 sone, also dem 4,5-fachen möglich. Das bedeutet, **ein Geräusch, das 4,5-mal lauter ist, wird mit dem selben Schalldruckpegel ermittelt**, wie das leisere. Dieses Beispiel zeigt eklatant den Mangel, der in der Schalldruckmessung verborgen ist, nämlich dass die Frequenzzusammensetzung unberücksichtigt bleibt. Menschen analysieren ein Geräusch aber nach der Frequenzzusammensetzung und nach dem Inhalt. Sie erleben darüber Wirkungen, wie Lästigkeit, Wohlklang, Störung oder Einbuße von Wohlbefinden und ähnlichem.

## Resümee

Wenn wir also in der **baubiologischen Umweltanalytik** die Wirkung von Schallen auf Menschen analysieren wollen, müssen wir uns der **Lautheitsbestimmung** bedienen.

Messgeräte, wie der Acoustilizer AL1 von der Firma NTI, ein handgehaltener Schallpegelmessgerät und Schallanalysator, lassen solche Bewertungen bald zu. Es wird damit möglich, aus einem Terzschalldruckspektrum die sogenannte stationäre Lautheit eines Schalles zu berechnen. Das ist bereits eine ansprechende Lösung für den baubiologischen Messtechniker/-in.

Die vorgestellten Beispiele sind allerdings mit einer Schallanalysesoftware der Firma Cortex mit dem Namen VIPER (visual perception of auditory signals) erstellt worden. Das ist eine sehr umfangreiche Analysesoftware mit weitaus mehr Analysemöglichkeiten als hier vorgestellt.

## Glossar

Der **auditorische Cortex** ist der Bereich im Gehirn, in dem die Höreindrücke verarbeitet werden.

Ein **Frequenzanalysator** ist ein Messgerät, welches ein Geräusch (zusammengesetzt aus vielen Einzelfrequenzen) in schmalbandige Frequenzbereiche zerlegt.

Die **Lautheit** und andere psychoakustische Größen werden mit einer Software berechnet. Diese Software erlaubt es das menschliche Hörverhalten zu simulieren.

## Der Wohnbiologe

Baubiologie+Umweltanalytik

Dipl.-Ing.(FH) Jürgen Muck  
97225 Zellingen