

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. Diese Erkenntnis verstärkt sich, je mehr Messungen bei leisen Schallereignissen man durchführt.

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

Hier besteht eine ausgeprägte Diskrepanz zwischen Gehörtem und Gemessenem!

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 mit dem Schalldruckpegelmessgerät 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 (durch den A-Filter stark reduziert).

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.

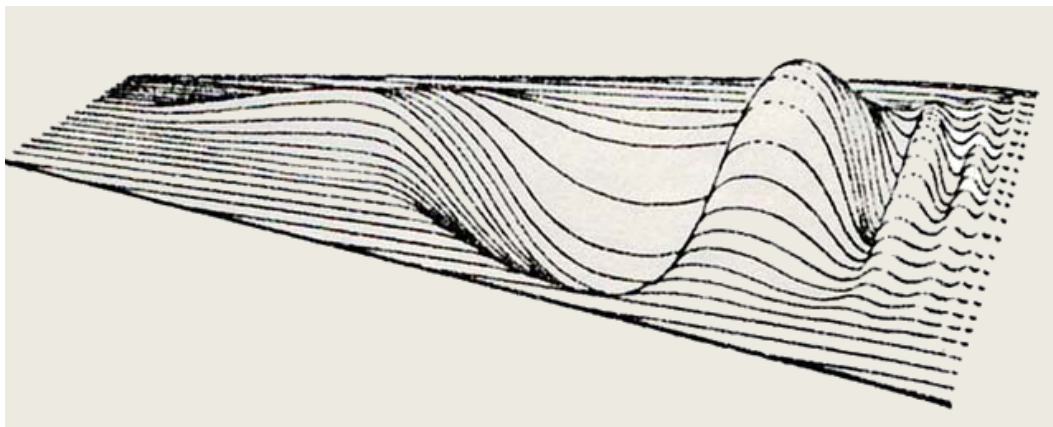


Bild 1: Computersimulation der Auslenkung einer Basilarmembran

Quelle: Tondorf

Die Basilarmembran wird so an verschiedenen Stellen unterschiedlich nach oben und unten ausgelenkt. An jeder Stelle besteht eine eindeutige Zuordnung von Ort zur Frequenz. So ist die Basilarmembran an jeder Stelle für eine andere Frequenz 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 auch körperliche Reaktionen ausgelöst.

Der Frequenzanalysator im Ohr, seine Funktionsweise

Die Basilarmembran ist quasi ein Frequenzanalysator, der aber nicht jede einzelne Frequenz erkennen kann. Die Lautstärke eines Schalles wird in sogenannte Frequenzgruppen zusammengefasst. Über den Hörbereich von 20 - 15.500 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 nach Prof. Zwicker

Im tiefen Frequenzbereich sind die Frequenzgruppen sehr schmal, zu hohen Frequenzen hin werden diese 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.

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 z.B. leise Geräusche auftreten, könne 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 um diese Schwäche zu minimieren, 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, vor allem fehlt die Zeitstruktur des Geräusches.

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. Einen Teil des Problems löst 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 Schallanalyse-Software, die das menschliche Gehör modelliert.

Der Mensch beurteilt Schallereignisse nach

- Einwirkungsdauer
- spektrale Zusammensetzung
- zeitliche Struktur
- Pegel
- Informationsgehalt
- subjektive Einstellung

Die Vielfalt der Parameter zeigt, 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 Hochtonanteiles 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 beide mit einem Schalldruckpegel von 75 dB(A).

Die errechnete Lautheit gibt ein Moped mit 39 sone und das zweite mit ca. 52 sone an, siehe dazu Bild 3. Der obere Kurvenverlauf zeigt den A-bewerteten Schalldruckpegel, der untere Kurvenverlauf die Lautheit über der Zeit.

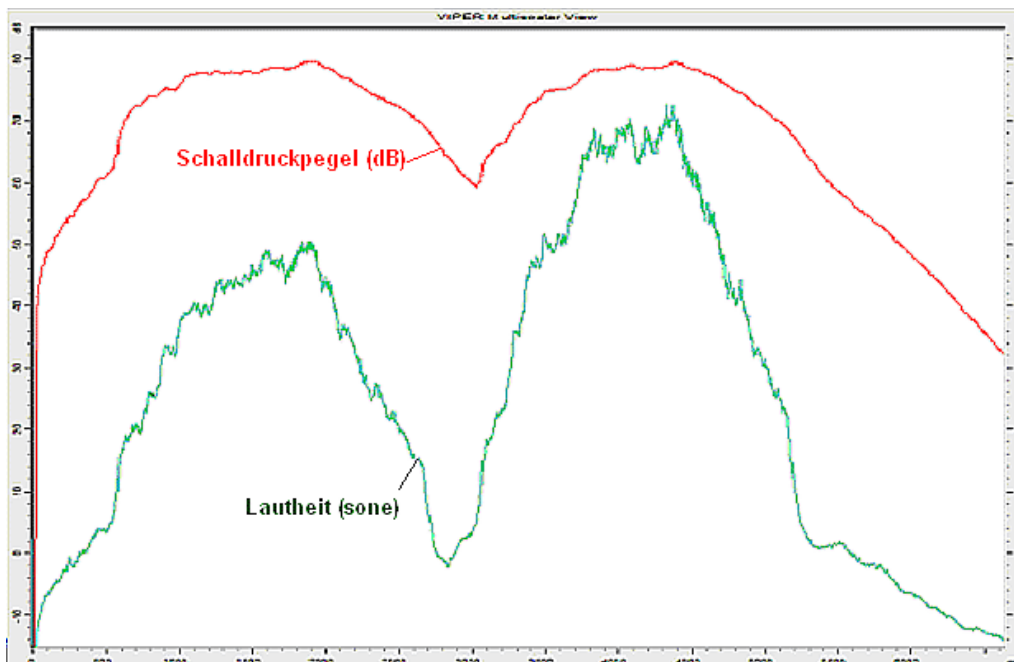


Bild 3: A-Pegel und Lautheit abhängig von der Zeit.

Quelle: TU München

Wer das Beispiel hören kann, wird dieses Ergebnis der Lautheitsberechnung bestätigen !

Das Spektrogramm der spezifischen Lautheit (engl. specific loudness) zeigt dann auch den Grund für den Lautstärkeunterschied, siehe dazu Bild 4.

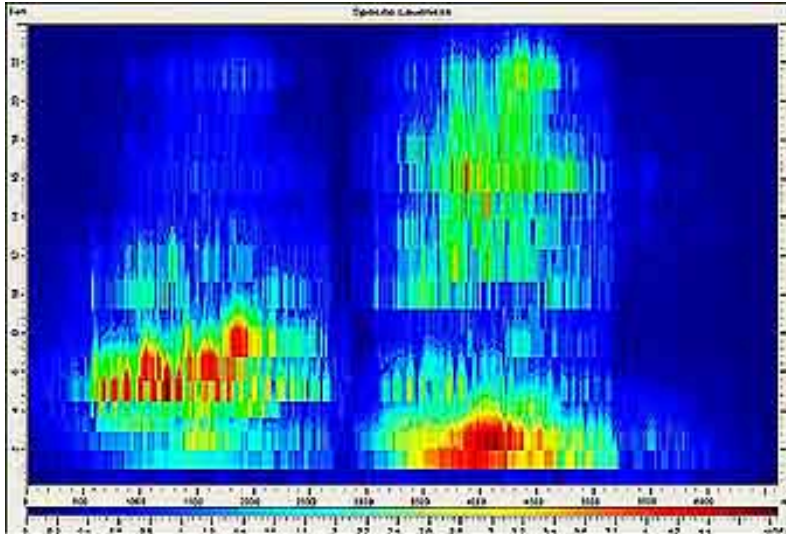


Bild 4: Spektrogramm der spezifischen Lautheit - links Moped 1, rechts Moped 2
Quelle: TU München

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 eines Geräusches hat, zeigt das folgende theoretische Beispiel:

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

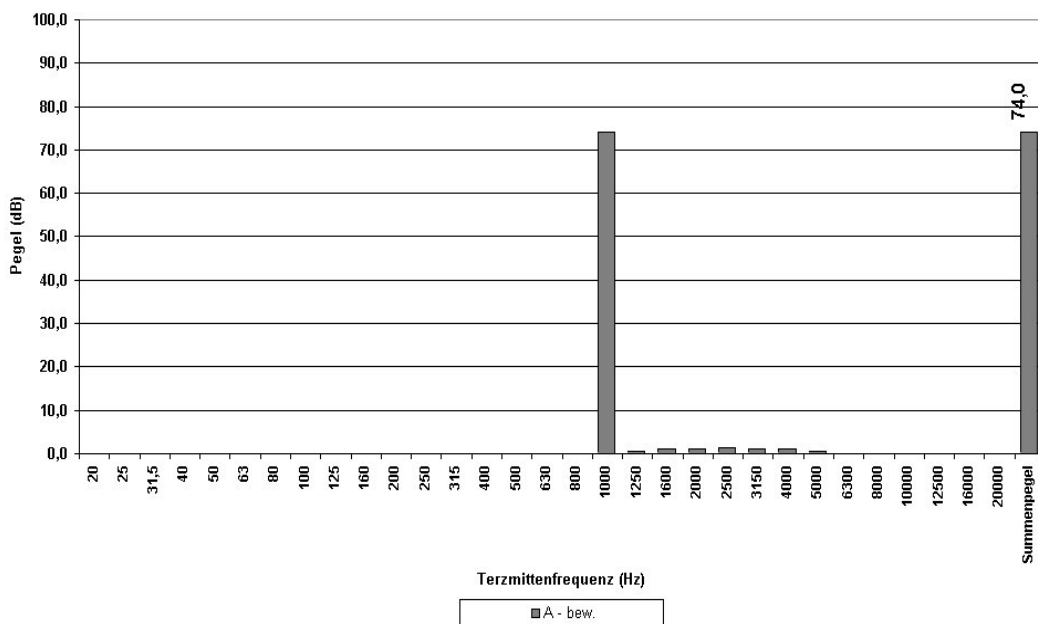


Bild 4a: Schalldruckpegel von schmalbandigem Terzrauschen, Mittenfrequenz 1.000 Hz
Quelle: J. Muck

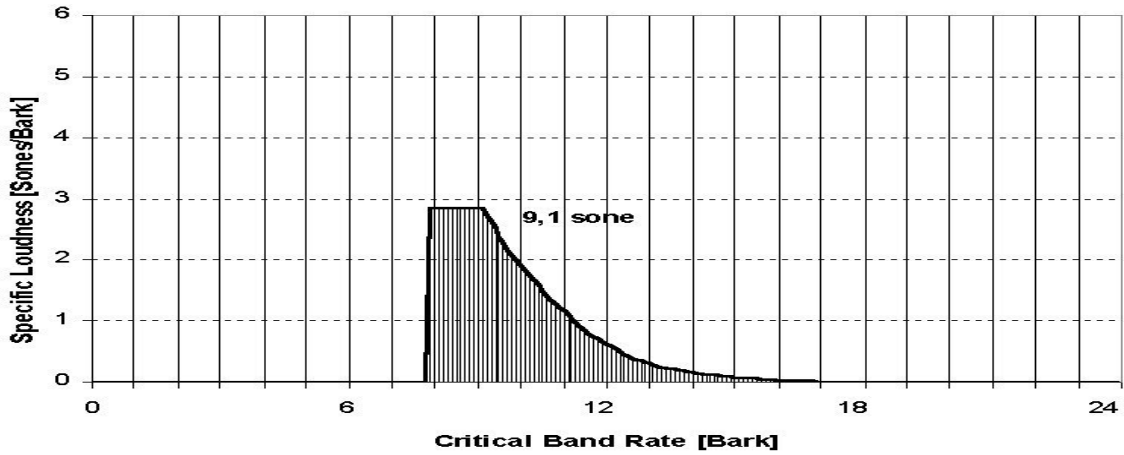


Bild 4b: Spezifische Lautheit vom Terzrauschen

Quelle: J. Muck

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

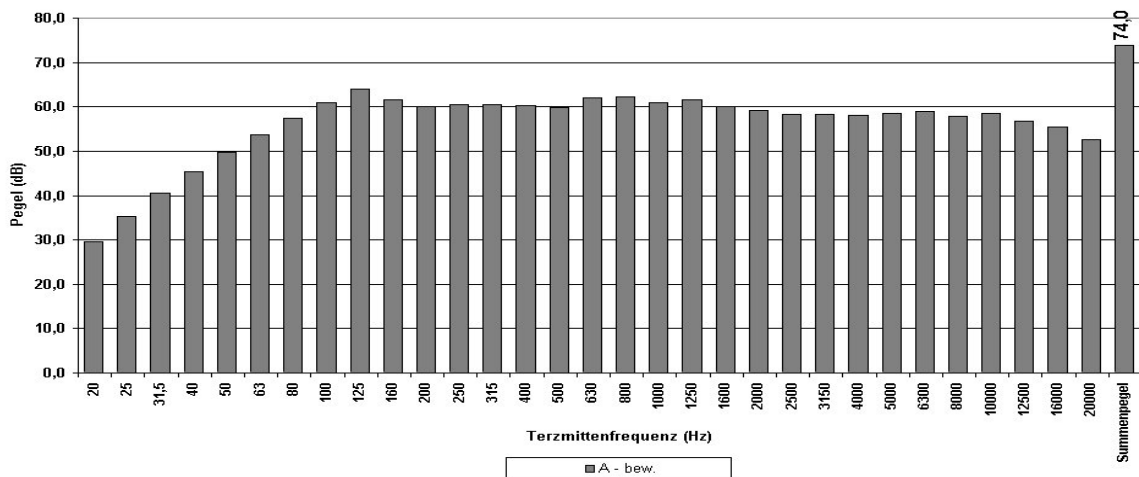


Bild 5a: Breitbandiges Rauschen über den ganzen Hörbereich

Quelle: J. Muck

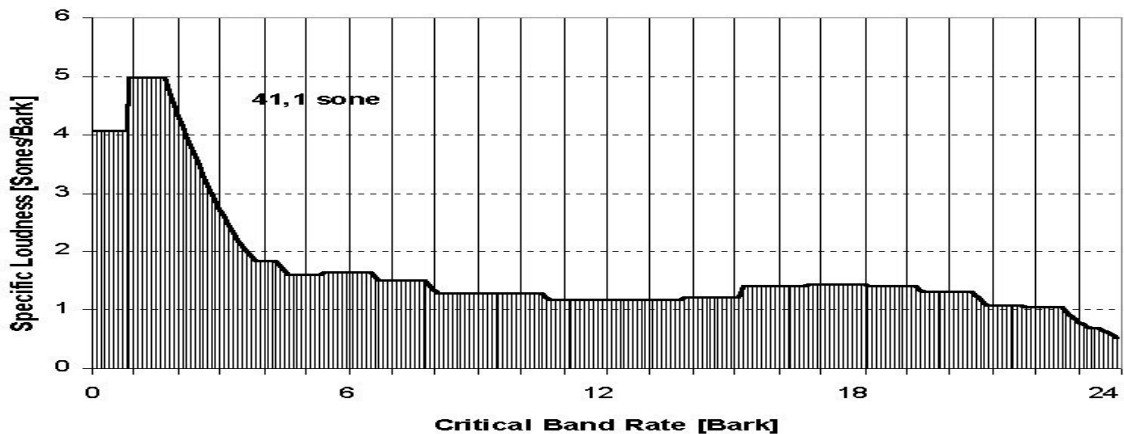


Bild 5b: Spezifische Lautheit vom Breitbandrauschen, siehe Bild 5a

Quelle: J. Muck

Es ist also bei einem Schalldruckpegel von 74 dB(A) ein Lautheitsunterschied von 41,1 zu 9,1 son, 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 Umweltanalytiker die Wirkung von Schallereignissen auf Menschen analysieren wollen, müssen wir uns zumindest der **Lautheitsbestimmung** bedienen. Weitere Größen wie die **Tonhaltigkeit** und die **Modulationen** sind ebenfalls nötig um Lästigkeit zu beschreiben.

Messgeräte, wie der Acoustilizer AL1 und XL2 von der Firma NTI, handgehaltene Schallpegelmesser und Schallanalytoren, lassen solche Bewertungen zu. Es wird damit möglich, aus einem Terzschalldruckspektrum die sogenannte **stationäre Lautheit** eines Schalles zu berechnen. Das ist bereits eine ansprechende Lösung für den Messtechniker/-in.

Die vorgestellten Analysenbeispiele der Mopeds sind 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 breitbandiges Geräusch, das aus vielen Einzelfrequenzen zusammengesetzt ist, in die Einzelfrequenzen mathematisch zerlegt.

Die **Lautheit**, eine Größe für das menschliche Lautstärkeempfinden, und andere psychoakustische Größen wurden mit der Software VIPER berechnet. Diese Software erlaubt es das menschliche Hörverhalten zu simulieren.

Der Wohnbiologe

Umweltanalytik+Baubiologie

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