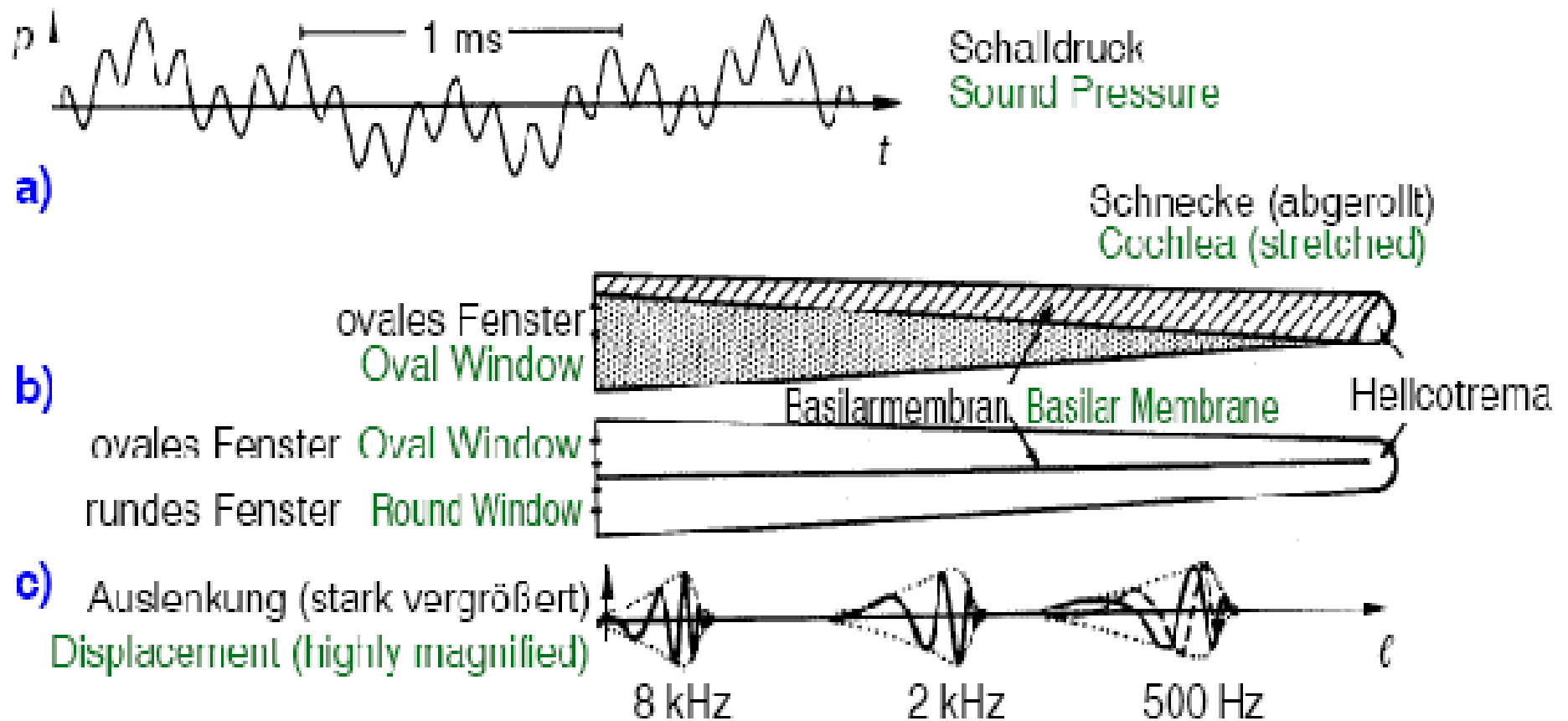


Perzeptive Phonetik

Grundlagen der Wahrnehmung prosodischer Parameter

Benno Peters



Schematische Darstellung der **Frequenz-Orts-Transformation** im Innenohr. Drei gleichzeitig dargebotene Töne (a) mit verschiedenen Frequenzen (Zeitfunktion im obersten Diagramm angegeben) führen zu (c) Wanderwellen, die an verschiedenen Orten (b) ihr Maximum erreichen. Achtung: Im obersten Diagramm (a) ist von links nach rechts die Zeit aufgetragen, während in den übrigen Diagrammen (b, c) der Abstand vom ovalen Fenster die unabhängige Veränderliche darstellt (Békésy, Wanderwellentheorie, 1960)

Physikalische Größen und Empfindungsgrößen

Physikalische Größen (z.B. Frequenz oder Amplitude) lassen ohne weiteres keinen Schluss auf die tatsächlich empfundenen Verhältnisse zu.

Physikalische Größen und Empfindungsgrößen

Ein Sinuston mit einer Frequenz von 4 kHz wird als doppelt so hoch empfunden wie ein Ton mit einer Frequenz von 1 kHz, 8 kHz als doppelt so hoch wie 1,3 kHz

Physikalische Größen und Empfindungsgrößen

Ein Sinuston mit einem Schalldruck von
20 mPa wird als viermal so laut empfunden
wie ein Ton mit einem Schalldruck von
2 mPa (trotz Faktor 10)

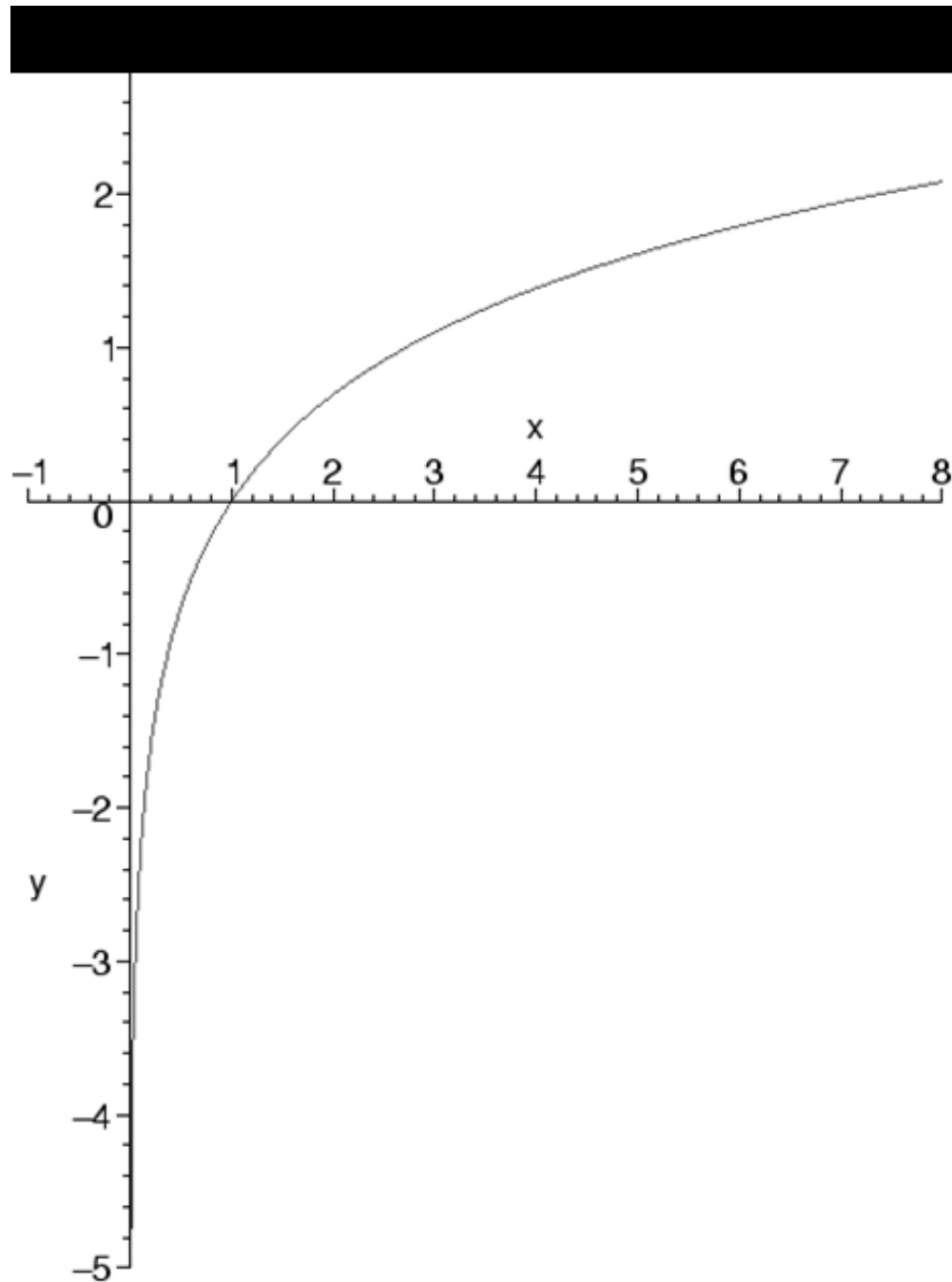
Wahrnehmung und physikalische Größen

Schallübertragung (Akustik)		Schallwahrnehmung (Psychoakustik)
Amplitude/Schalldruck	↔	Lautheit (<i>loudness</i>)
Frequenz	↔	Tonhöhe (<i>pitch</i>)

Grundlagen der Psychoakustik

Drei Arten von Zusammenhängen:

- “ **Logarithmisch:** *Logarithmieren zu einem Exponenten* entspricht der Suche nach dem Exponenten (der Hochzahl) bei einer festen Basis. Der Logarithmus ist die Umkehrung der Exponentialfunktion.
- “ Formal sind Logarithmen alle Lösungen der Gleichung $a = b^x$ zu vorgegebenen Größen a und b .
- “ Bsp.: Wahrnehmung von Tonhöhe oder Lautheit



Natürlicher
Logarithmus zur
Basis $e =$
2,718281828459
(meist mit \ln
abgekürzt)

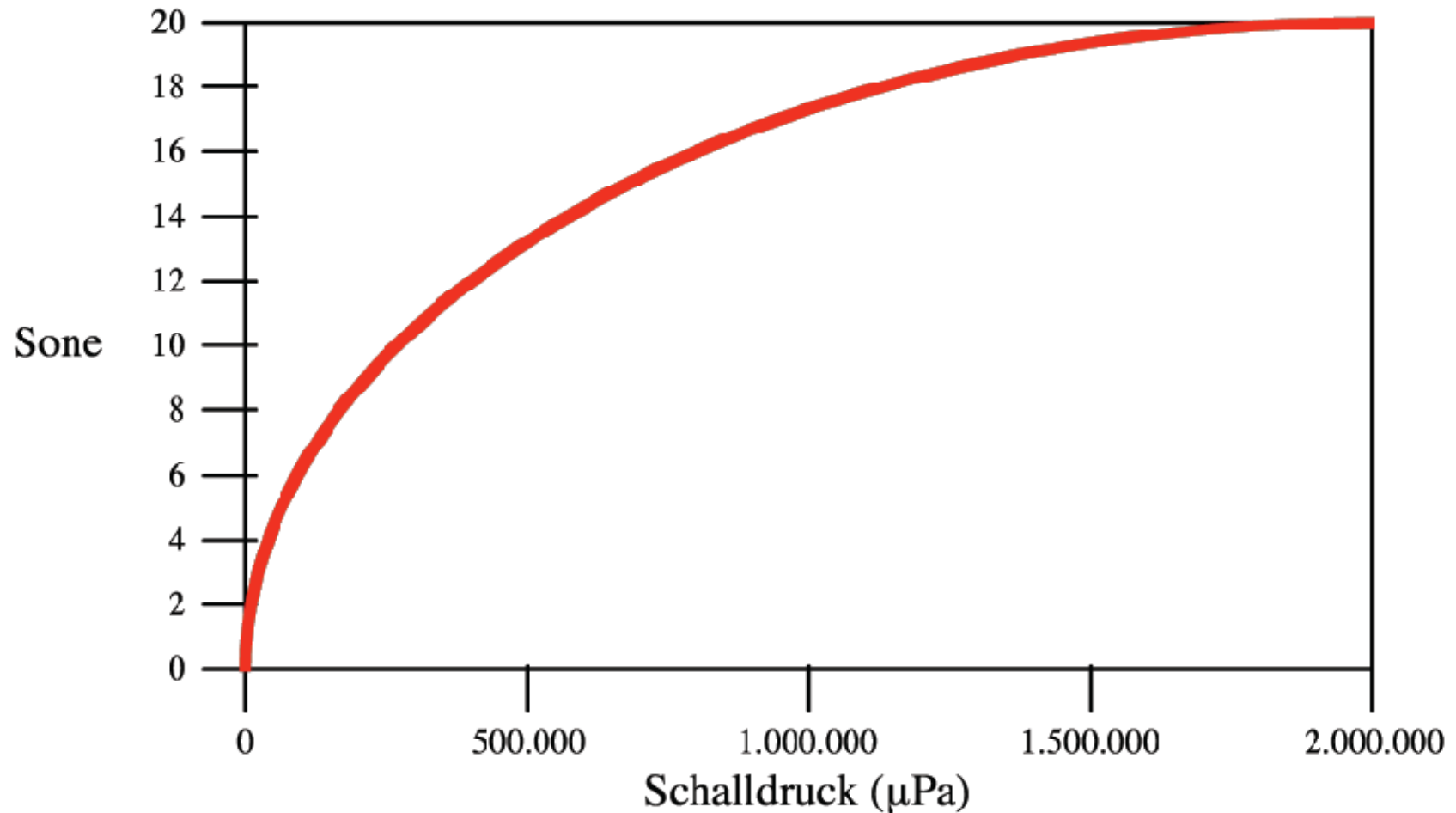
Zehnerlogarithmus
zur Basis 10
(meist mit \log
abgekürzt)

Der Mensch denkt/erlebt logarithmisch

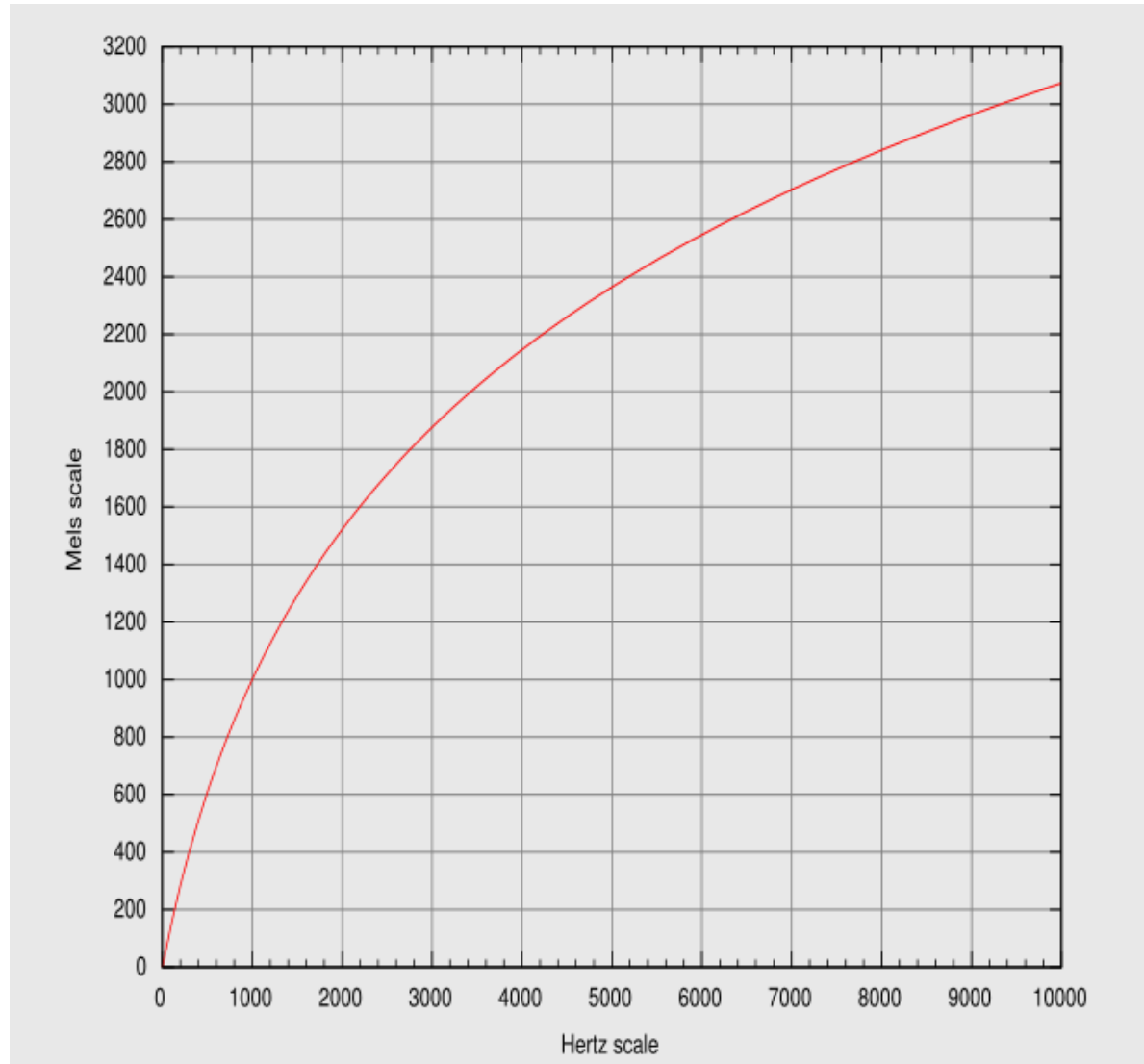
Dehaene und seine Kollegen verweisen auf das sogenannte Weber-Fechner-Gesetz. 1834 hatte der Physiologe Ernst Heinrich Weber festgestellt, dass die Stärke von Sinneseindrücken sich logarithmisch zur Intensität des physikalischen Reizes verhält. Der Logarithmus ist dem Menschen offenbar regelrecht einprogrammiert.

Wahrnehmung der Lautheit: Sone

Subjektive Lautheit: Sone



Wahrnehmung der Tonhöhe: Mel



Schalldruckpegel: Einige Beispiele

Schallquellen	(Schalldruck in (μPa) und (μBar))*	
" Hörschwelle bei 2kHz	20 (μPa)	0,0002 (μBar)
" Flüstern	200 (μPa)	0,002 (μBar)
" Kühlschranks	2.000 (μPa)	0,02 (μBar)
" Unterhaltung	20.000 (μPa)	0,2 (μBar)
" Omnibus	200.000 (μPa)	2 (μBar)
" U-Bahn, Disco	2.000.000 (μPa)	20 (μBar)
" Kreissäge	20.000.000 (μPa)	200 (μBar)
" Düsenflugzeug, (Schmerzschwelle, dauerhafte Schädigung)	200.000.000 (μPa)	2000 (μBar)

*Umrechnung von Bar zu Pascal : Faktor 100000

D.h. 1 Bar = 100.000 Pascal, 10 μ Bar = 1 Pascal

Dezibel

Wegen diesem großen Variationsbereichs des effektiven Schalldrucks [P_{eff}] wird der der Schalldruckpegel [L] in der logarithmischen Größe dB [Dezibel] angegeben.

$$L = 20 \log (p_{\text{eff}} / p_0) \text{ [dB]}$$

- mit p_0 als Referenzdruck $2 \times 10^{-4} \mu\text{b}$ (Hörschwelle bei 1000 Hz-Ton – wie man früher dachte. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die Hörschwelle etwas höher liegt)
- log bezeichnet den Zehnerlogarithmus

Dezibel

Formel

$$L = 20 \times \log (p_{eff} / p_0) \text{ [dB]}$$

Rechenbeispiel

mit: $p_0 = 2 \times 10^{-4} \mu\text{b}$ (Referenzdruck) und $P_{eff} = 2 \mu\text{b}$

$$L = 20 \times \log (2 \mu\text{b} / 0,0002 \mu\text{b}) \text{ [dB]}$$

$$L = 20 \times \log 10000 \text{ [dB]}$$

$$L = 20 \times 4 \text{ [dB]}$$

$$L = 80 \text{ [db]}$$

Dezibel

Die dadurch entstehenden Werte mit der Einheit dB SPL (Sound Pressure Level) sind ein Maß für die Krafteinwirkung die durch den Wechseldruck in der Luft entsteht und sind mit dem Lautstärkeempfinden des Menschen verknüpft. Der Wertebereich reicht von 0 dB SPL bis ca. 130 dB SPL und ist somit viel handlicher als die ursprüngliche Schalldruck-Skala.

Schalldruckpegel: Einige Beispiele

Schallquellen (Schalldruck in μBar) und (dB)

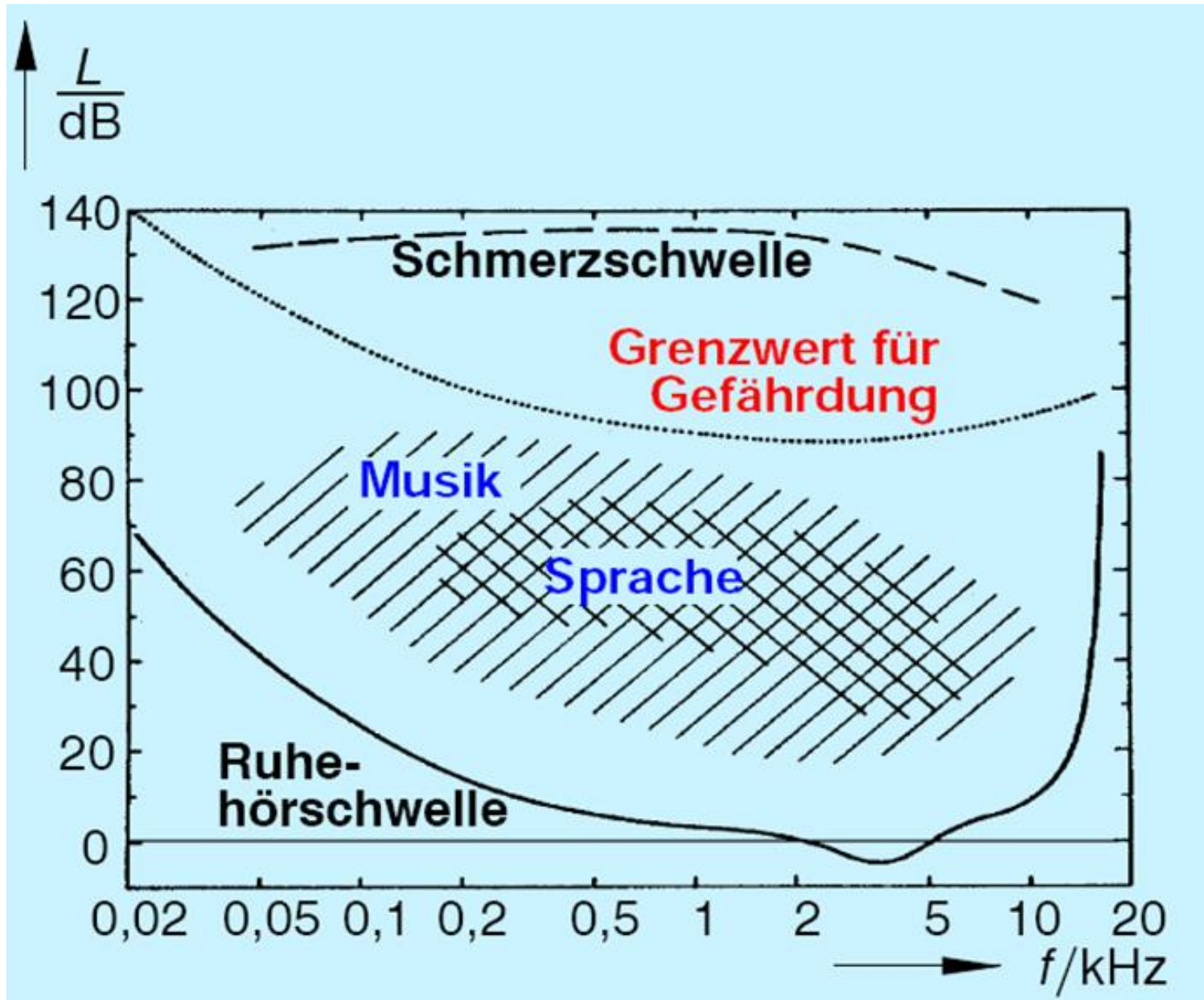
" Hörschwelle bei 2kHz	0,0002 (μBar)	0 (dB)
" Flüstern	0,002 (μBar)	20 (dB)
" Kühlschranks	0,02 (μBar)	40 (dB)
" Unterhaltung	0,2 (μBar)	60 (dB)
" Omnibus	2 (μBar)	80 (dB)
" U-Bahn, Disco	20 (μBar)	100 (dB)
" Kreissäge	200 (μBar)	120 (dB)
" Düsenflugzeug,	2000 (μBar)	140 (dB)

(Schmerzschwelle, dauerhafte Schädigung)

Dezibel

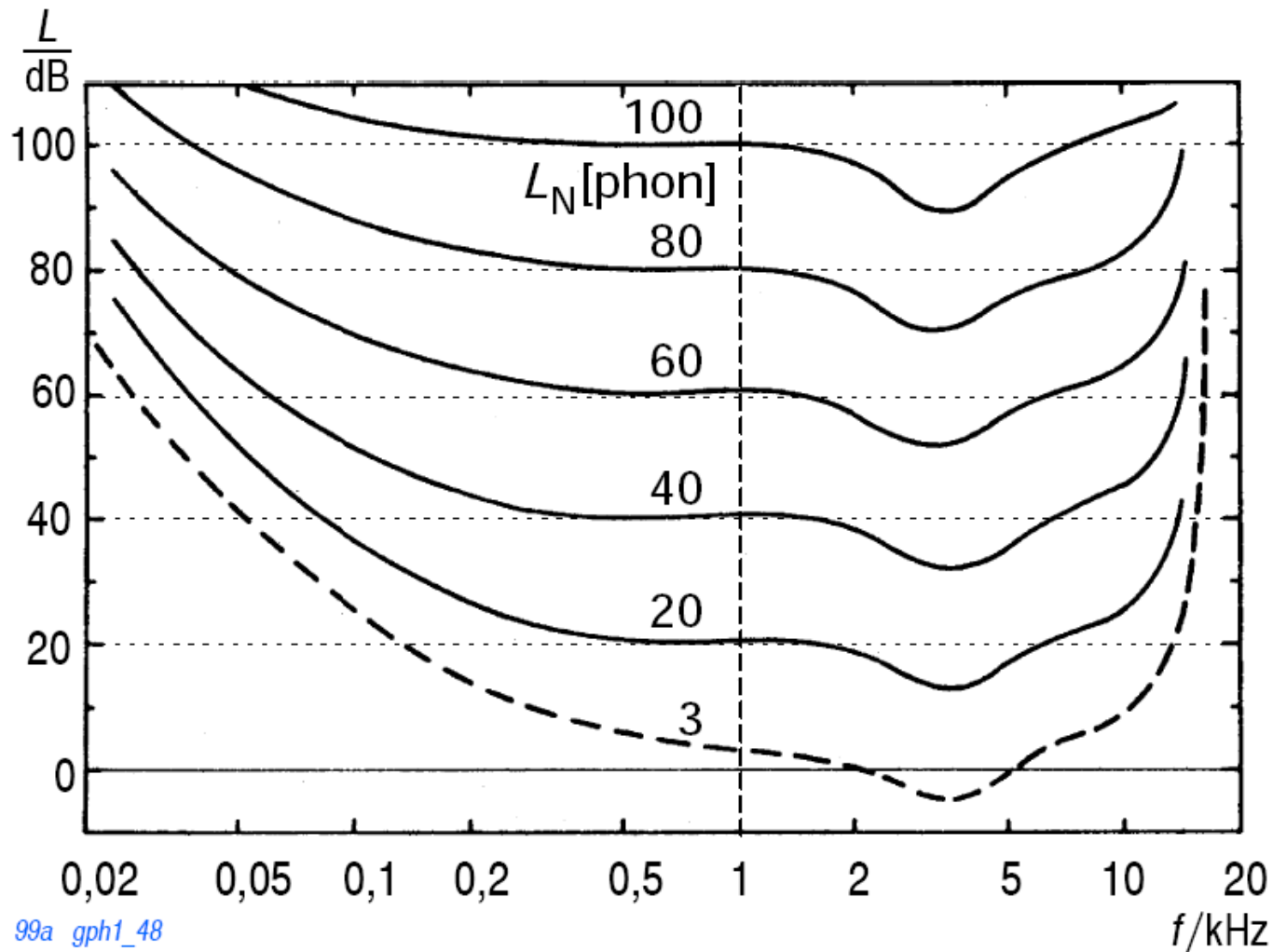
- “ Eine Veränderung (Erhöhung oder Minderung) des Schalldruckpegels um 6 dB entsprechen somit einer Verdoppelung/Halbierung des Schalldruckpegels.
- “ 20 dB entsprechen einer Änderung des Schalldrucks um den Faktor 10.

Die Hörfläche (nach Zwicker 1982)



Phon

- “ **Phon** ist die Maßeinheit der psychoakustischen Größe Lautstärkepegel. Neben der Lautheit in Sone wird der Lautstärkepegel in *Phon* dazu benutzt, die empfundene Lautstärke zu beschreiben, mit der ein Mensch ein Schallereignis als Hörereignis wahrnimmt.
- “ Per Definition entspricht der phon-Wert eines Sinustons mit einer Tonhöhe von 1000 Hz seinem Schalldruck in dB
- “ Bei Sinustönen entlang der Hörschwelle oder der Kurven gleicher Lautheit bleibt ihr phon-Wert konstant .



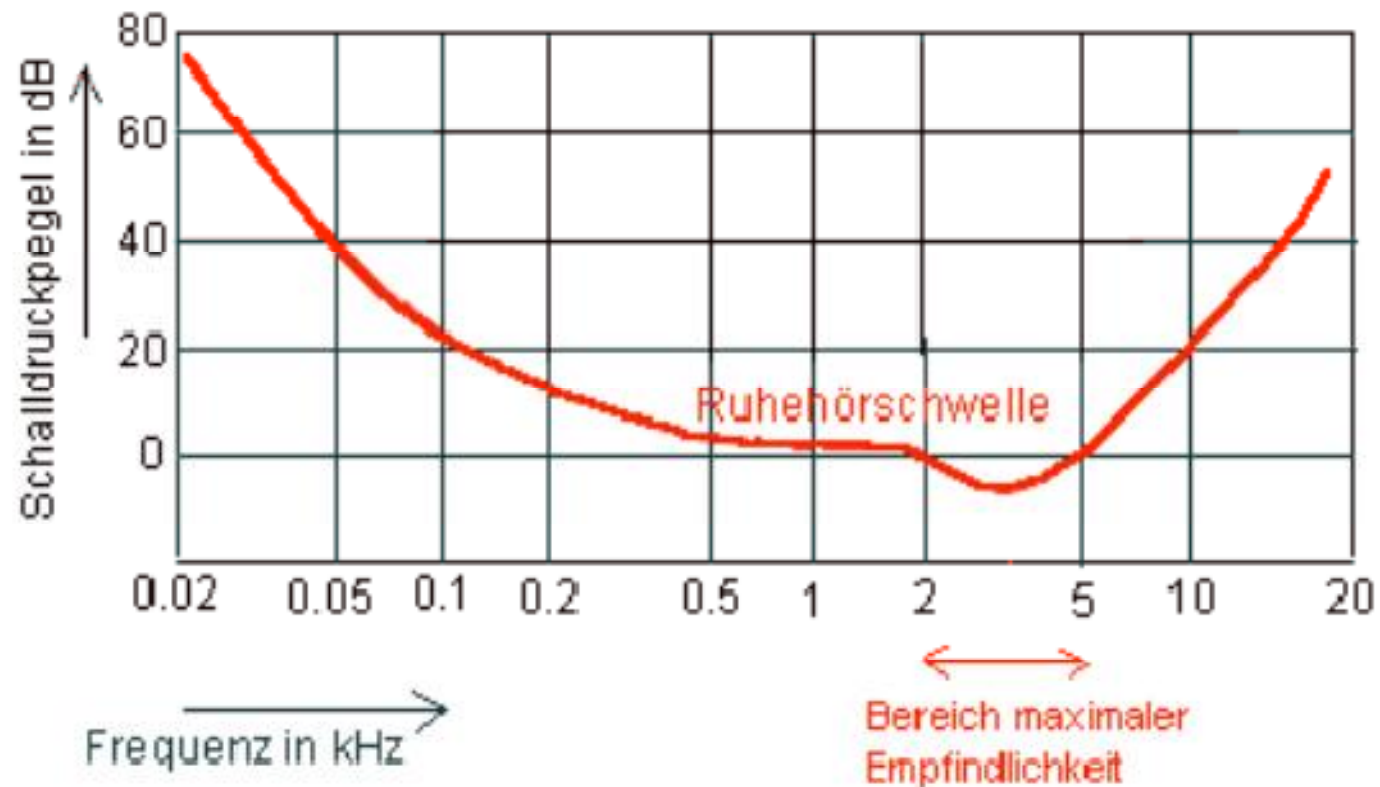
99a gph1_48

Hörfläche mit eingezeichneten Kurven gleicher Lautstärke

Für reine Sinustöne wird die Abhängigkeit der Lautstärkeempfindung von der Frequenz in den *Kurven gleicher Lautstärkepegel* (Isophonen) beschrieben. Die unterste dieser Kurven beschreibt den Verlauf der Hörschwelle und liegt bei 3 phon, da ein 1000-Hz-Ton (das Referenzsignal für die Phon-Definition) erst ab einem Schalldruckpegel von 3 dB wahrgenommen werden kann.

Phon

Die Wahrnehmung der Lautheit ist nicht linear und frequenzabhängig:



Phon vs Sone

Problem der Einheit **phon**:

- “ Die physikalische Lautstärke von **komplexen** Tönen spiegelt nicht die empfundenen Lautstärke wider
- “ Eine Lautstärkezunahme von 40 auf 60 phon wird anders bewertet als eine von 80 auf 100 phon)

Anders bei **sone** (psychophysische Größe):

2 sone sind doppelt so laut wie 1 sone

Phon vs Sone

- “ Während der **Lautstärkepegel** in Phon die empfundene Lautstärke mit der Lautstärke eines Referenzsignals vergleicht, macht die **Lautheit** in Sone eine direkte Aussage darüber, wie laut ein Mensch den Schall empfindet. Die Lautheit in Sone ist eine psychophysische Größe.

Sone

- “ Sone-Skala misst (schätzt) die subjektive empfundene Lautheit
- “ Nullpunkt der Sone-Skala: 1 000Hz, 40 dB
- “ Erlaubt Angaben über „Dieser Schall ist doppelt so laut, wie jener.“ Ein beliebiges Geräusch mit 4 sone wird als doppelt so laut empfunden wie ein anderes Geräusch mit 2 sone.

Sone

Die **Sone**-Skala basiert auf dem Verdoppeln und Halbieren der empfundenen Lautstärke zweier Vergleichstöne. Es zeigt sich, dass für Sinustöne mit einem Intensitätspegel von mehr als 40dB eine Verdoppelung der wahrgenommenen Lautheit einer Zunahme des Pegels um fast genau 10dB entspricht. Deshalb wurde international festgelegt, dass ein Sinuston von 1kHz und einem Pegel von 40dB eine Lautheit von **1 sone** hat.

Sone

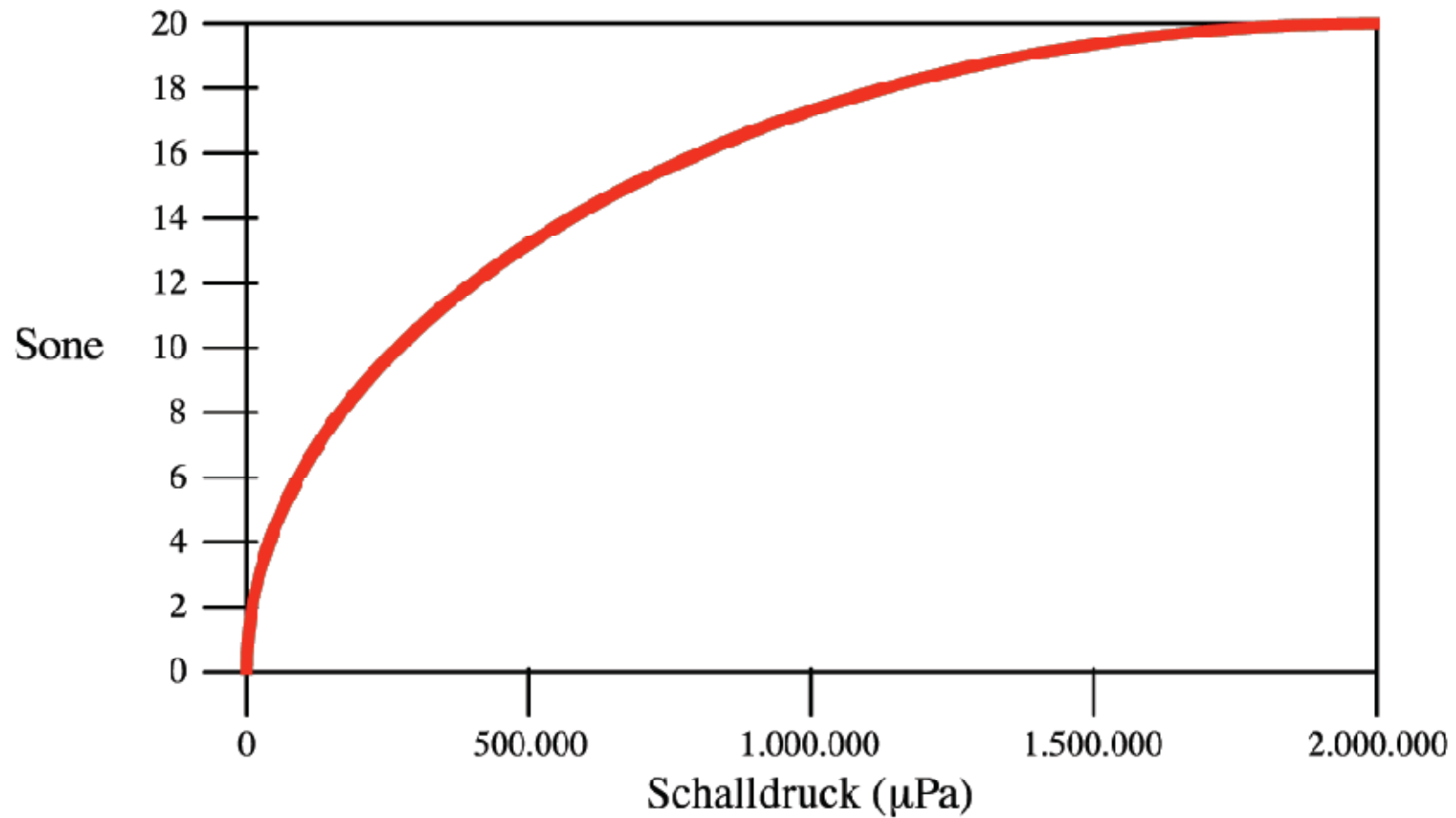
Eine grobe Formel, mit dem Versuch sone ungefähr in dBA umzurechnen:

$dBA = 33,22 \cdot \log(\text{sone}) + 28$ mit einer Genauigkeit von vielleicht ± 2 dBA.

ACHTUNG: Abhängig von der Art des Schalls.

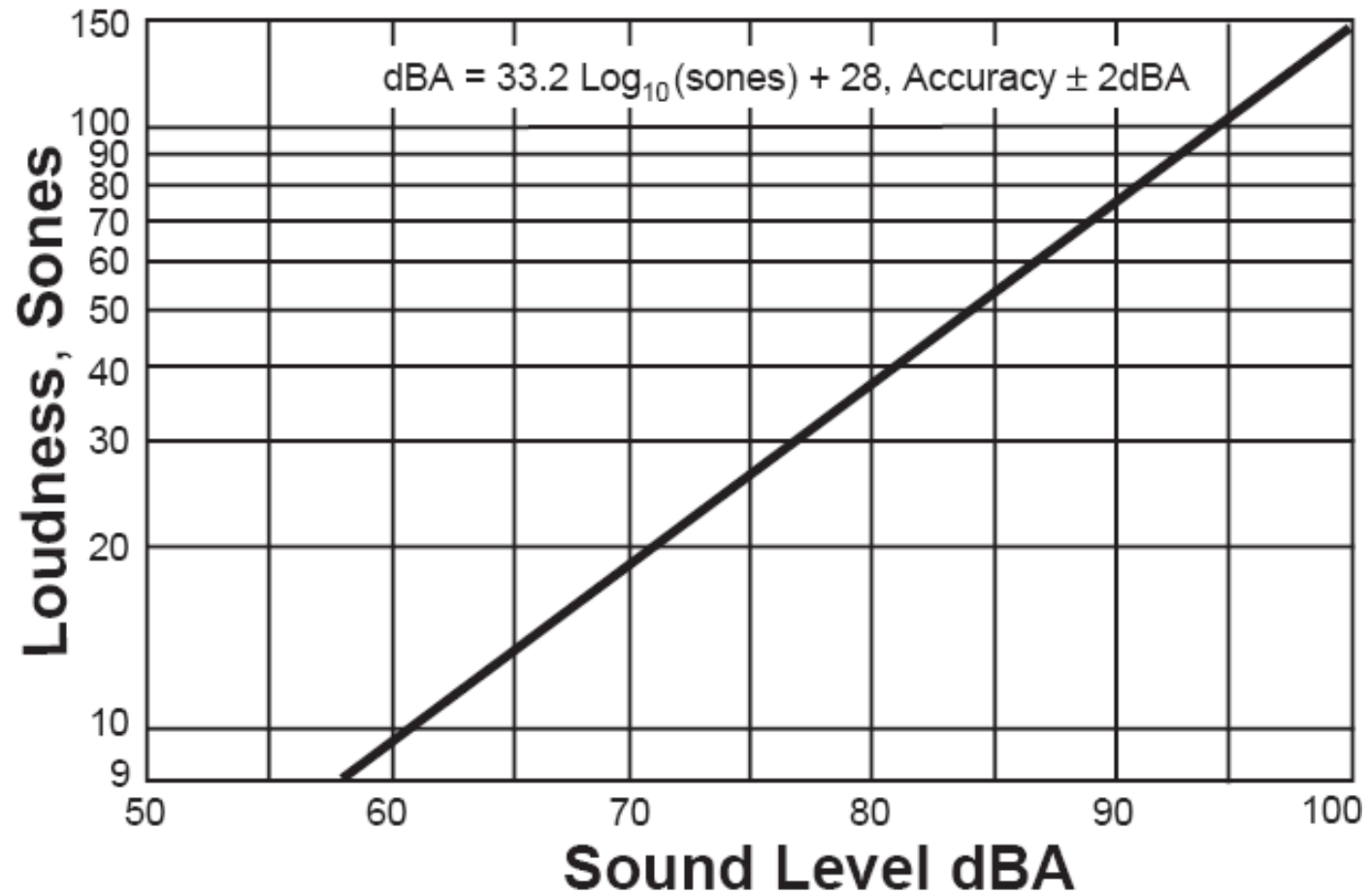
Sone

Subjektive Lautheit: Sone



Sone

Room Sones – dBA Correlation



Nützliche Links

“ Gehör

<http://www.iurc.montp.inserm.fr/cric51/audition/english/sound/fsound.htm>

<http://www.blackwellpublishing.com/matthews/ear.html>

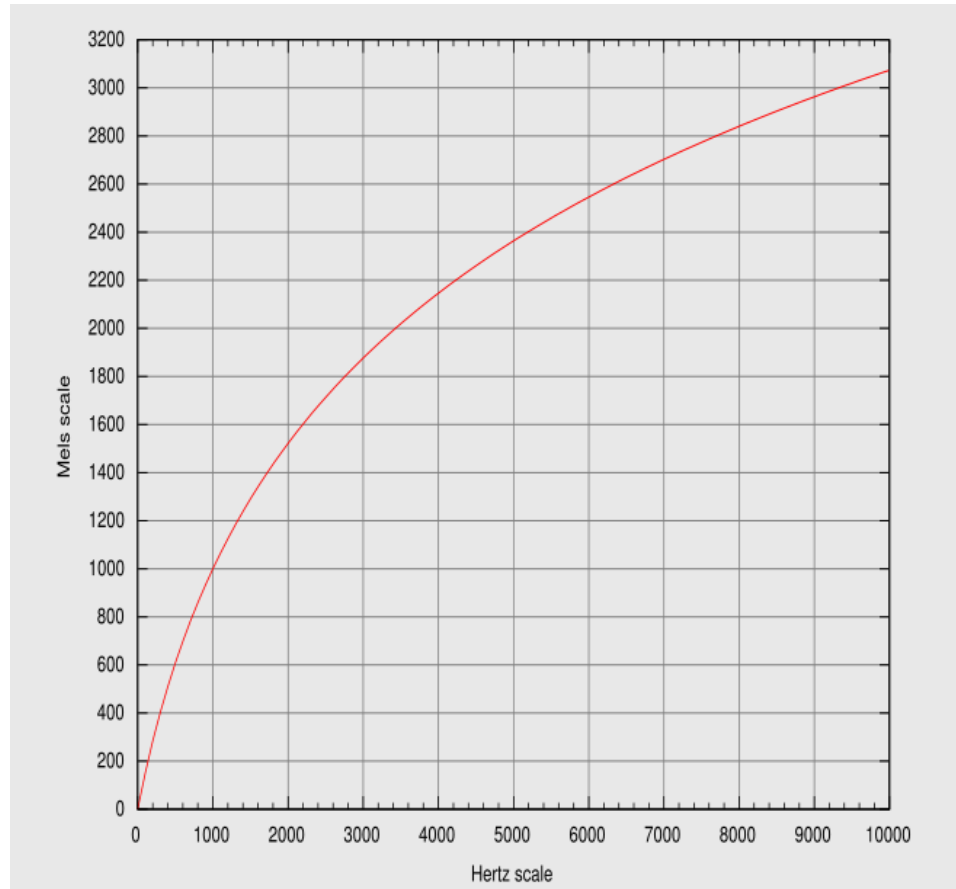
“ Logarithmen

<http://www.mathematik.net/logarithmen/0-inhalt-1.htm>

“ Dezibel, Phon, Sone

<http://www.sengpielaudio.com/RechnerSonephon.htm>

Wahrnehmung der Tonhöhe:



Wann ist ein Ton doppelt so hoch wie ein anderer Ton?

Mel

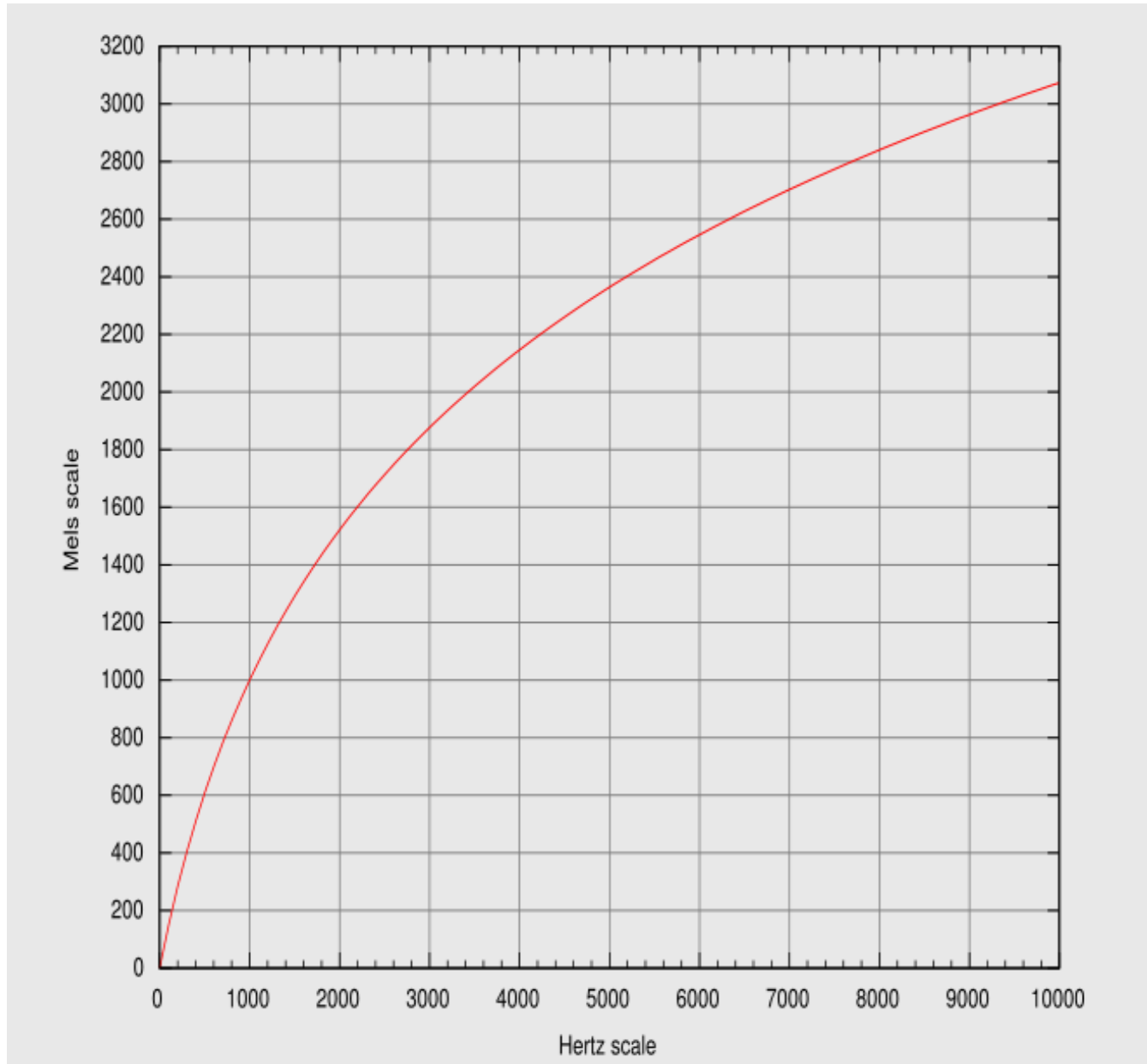
- “ Mel ist abgeleitet vom engl. Melody
- “ Es gibt zwei Definitionen der Mel-Skala, die sich jeweils im Referenzwert unterscheiden:
 - . Basis für die Definition der Mel-Skala nach Stanley Smith Stevens ist der Ton mit der Frequenz $f = 1000$ Hertz, ihm wird die **Tonheit** $Z = 1000$ mel zugeordnet.
 - . Zwicker definierte später eine Mel-Skala mit dem musikalischen Ton C als Basis. Diesem Ton mit der Frequenz $f = 131$ Hertz wird die Tonheit $Z = 131$ mel zugeordnet.
 - . In beiden Definitionen gilt: ein Ton, der doppelt so hoch wahrgenommen wird, erhält den doppelten Tonheitswert, ein Ton, der als halb so hoch wahrgenommen wird, den halben Tonheitswert. Mit Hilfe psychoakustischer Versuche kann so die Tonheitsskala bestimmt werden.

Mel

Eine Verdoppelung des **mel**-Wertes führt zu einer Verdoppelung der wahrgenommenen Tonhöhe.

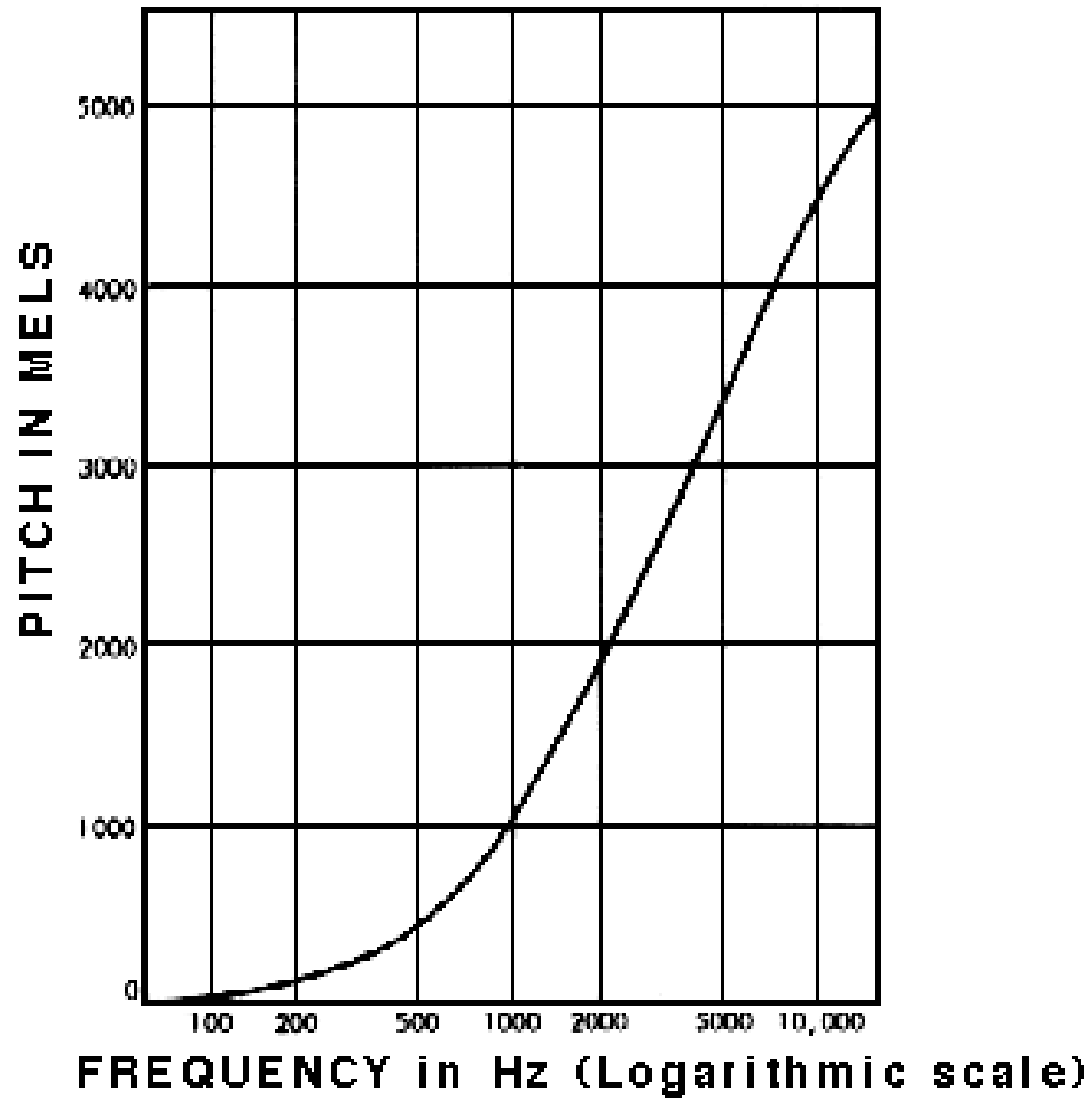
Doch nur im tieffrequenten Bereich wird die Verdoppelung des **mel**-Wertes von einer Verdoppelung der physikalischen Frequenz begleitet. Im hochfrequenten Bereich muss die Frequenz überproportional steigen um eine Verdoppelung der Tonhöhe zu bewirken

Wahrnehmung der Tonhöhe:



Wann ist ein Ton doppelt so hoch wie ein anderer Ton?

Skalierung



Halbtöne und Oktaven

- “ In seiner Hauptbedeutung bezeichnet der Begriff den halben Ganzton, also ein Zwölftel der Oktave.
- “ Ein exakter Halbton ist auch als Potenz ausdrückbar: $2^{1/12}$,
Entspricht Faktor 1.059463 (ca 6%)
- “ In der Musik ist der Halbton als ein Zwölftel einer Oktave definiert. Die Frequenz des ersten höheren Halbtons liegt um den Faktor $2^{1/12}$ über dem vorherigen Ton.

Halbtöne und Oktaven

- “ Bei einer Frequenz von 880 Hz für das a^{``} beträgt die Frequenz des ersten darüber liegenden Halbtons $880 \times 2^{1/12}$. Das entspricht einer Frequenz von 932,32 Hz. Der nächst höhere Halbton liegt um Faktor $2^{1/12}$ über der Frequenz von 932,32 Hz, usw.
- “ Eine weitere Oktave hin zu a^{'''} ergibt sich aus zwölf Halbtönen zu $880 \times 2^{12/12}$, also 880 Hz multipliziert mit 2 ergeben 1.760 Hz.

Dauer

Auch die physikalische **Dauer** eines Tones löst eine Empfindung aus, die der subjektiven Dauer oder Quantität. ZWICKER beschrieb 1982, wie auch für die Dauer mit Verhältniswerten eine Skala geschaffen werden kann. Er nennt die betreffende Einheit **dura**, wobei bei einem 1kHz Ton von 60dB **1dura** = 1Sekunde ist.

Dauer

Die Beziehung ist bis hinunter zu einer Dauer von 30ms linear, unterhalb von 30ms nimmt mit einer Kürzung der physikalischen Dauer die subjektiv empfundene Dauer weniger stark ab. Ein 10ms dauernder Ton besitzt die Quantität von 20 **mdura** (Milidura).

Unterschiede in der subjektiven Wahrnehmung treten insbesondere zwischen Dauern von Signalen und den Dauern von Pausen auf. So wird ein 100ms langer Tonimpuls mit einer Frequenz von 3,2kHz als genauso lang andauernd wahrgenommen wie eine 400ms lange Pause.

JND

Die **differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle** (auch **JND** von engl. *Just Noticeable Difference* "eben noch bemerkbarer Unterschied") bezeichnet in der Psychophysik einen eben noch sinnlich wahrnehmbaren Reizunterschied.

Frequenzauflösung und *Just noticeable difference* (JND)

- “ Fähigkeit des Gehörs, Tonhöhen zu unterscheiden
- “ Das menschliche Gehör kann etwa 620 Tonhöhen unterscheiden
- “ wahrnehmbare Tonhöhendifferenz: unter 500 Hz: mindestens 1,8 Hz, über 500 Hz: mindestens 3,5 Promille
- “ $200 \text{ Hz} + 1,8 = 201,8 \text{ Hz} > f = 1,8 \text{ Hz}$
- “ $2200 \text{ Hz} \times 1,0035 = 2207,7 \text{ Hz} > f = 7,7 \text{ Hz}$
- “ d.h. mit steigender Frequenz muss der Frequenzunterschied zwischen zwei Tönen größer werden, damit ein Tonhöhenunterschied wahrgenommen werden kann
- “ Ursache: Aufbau der Basilarmembran und Verteilung der darauf befindlichen Sinneszellen

Das Webersche Gesetz

Gerade wahrnehmbarer Reizunterschied =konstant
Wert des kleinsten Reizes

Bsp.: JND zu 150 Gramm = 5 Gramm, JND zu 600 Gramm = 20 Gramm.

$5/150 = 0,033$ und $20/600 = 0,033$ > entspricht 3,3%

> Ist konstant und verläuft über einen weiten Bereich proportional zum absoluten Wert.

Auditive Sprachwahrnehmung

Sprachliche Interpretation von Höreindrücken

Während sich die Psychoakustik um den Zusammenhang der physikalischen Messgrößen einfacher Signale, mit den von ihnen ausgelösten Empfindungsgrößen kümmert, widmet sich die Psychophonetik dem gleichen Zusammenhang, nun aber bei sprachlich nutzbaren Signalen.

Auditive Sprachwahrnehmung

- “ Problemkomplex: Variabilität und Kategoriengrenzen
- “ Akustisch unterschiedliche Reize können ein identisches sprachliches Perzept hervorrufen. Z.B. Vokale mit unterschiedlichen Formanten oder Plosive mit unterschiedlichen VOT.
- “ Äquidistante akustische Veränderungen führen in der Perzeption (der sprachlichen Interpretation) nicht zu äquidistanten Veränderungen des Perzepts. Es kann zu abrupten Kategorienwechsel kommen.

Auditive Sprachwahrnehmung

Problemkomplex: Kontext

Die Perzeption sprachlicher Einheiten ist vom Kontext abhängig.

Der Kontext ruft eine Erwartung beim Hörer hervor und die Erwartung bestimmt die Interpretation eines akustischen Reizes mit.

Auditive Sprachwahrnehmung

Problemkomplex: Subjektivität

Die Phänomene sind nicht direkt beobachtbar, sondern nur durch die Befragung von Versuchspersonen nach ihren Eindrücken zu erfahren.

Auditive Sprachwahrnehmung

Problemkomplex:

Vielschichtigkeit der kognitiven Sprachverarbeitung

In der Sprachverarbeitung interagieren die nachfolgend dargestellten Verarbeitungsebenen.

Auditive Sprachwahrnehmung

Verarbeitungsebene	Beispiel
Psychoakustik	Ein Akzent wird nicht genau dann als doppelt so stark empfunden, wenn die Grundfrequenz doppelt so hoch „ausschlägt“.
Syntax	Der lautsprachlichen Äußerung [aɪn] könnte das Wort <i>ein</i> oder <i>einen</i> zugrunde liegen. Dies lässt sich erst durch den Wortkontext entscheiden.
Semantik	Durch Störgeräusche verdeckte Wörter lassen sich oft nur durch den Satz- oder Äußerungskontext rekonstruieren
Lexikon	Häufig benutzte oder auch richtige Wörter werden im Zweifelsfall eher erkannt als seltene oder falsche Wörter
Pragmatik	In einer Äußerung wird eine unerwartete oder unmögliche Wendung schlechter erkannt als eine vorhersagbare