

---

## 2. Anatomische und physiologische Grundlagen mit besonderer Relevanz zur Lautheitsskalierung

### 2.1 Anatomie und Physiologie

Das menschliche Hörorgan gliedert sich in drei Abschnitte. Das Außenohr ist gekennzeichnet durch die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang, es endet am Trommelfell. Das Mittelohr wird im wesentlichen durch die Cavitas tympanica, die Paukenhöhle, gebildet. In der Paukenhöhle befinden sich die Gehörknöchelchen, die der Übertragung des Schalldrucks von Luft auf das Innenohr dienen. Das Innenohr beinhaltet die Schnecke (Hörorgan) und die Bogengänge (Gleichgewichtsorgan). Die Schnecke enthält drei flüssigkeitsgefüllte, spiralgewundenen Gänge, von denen einer (Scala media) die Basilarmembran mit dem Corti-Organ und den Haarzellen, den Empfängern für akustischer Signale, beinhaltet. Schallwellen werden über die Gehörknöchelchenkette auf die Schnecke übertragen und breiten sich in Form einer Wanderwelle (nach von Békésy (4) 1960) auf die Basilarmembran aus. An einer frequenzspezifischen Stelle erreichen sie ein Amplitudenmaximum, an dem das Corti-Organ erregt wird. Je tiefer die Frequenz ist, desto näher liegt ihr Auslenkungsmaximum am Helicotrema, der Spitze der Schnecke, und umgekehrt. Diese sogenannte tonotope Organisation der Cochlear erklärt die erstaunliche Fähigkeit des menschlichen Ohres zur Frequenzselektivität. Die äußeren Haarzellen verstärken die Auslenkung und erregen die inneren Haarzellen, die Nervenimpulse zum Ganglion spirale (1. afferente Neuron) weiterleiten. Die afferenten Fasern ziehen von dort mit dem Nervus vestibulocochlearis zum Hirnstamm zu den Kernarealen (2. Neuron). Nach einigen Zwischenstationen ziehen die Fasern durch die Capsula interna mit der Radiatio acustica zur primären Hörrinde (A1, Area 41 nach Brodmann) in den medialen Teilen des Gyrus temporalis transversus (Heschl-Querwindung). Die Aufgabe der primären Hörrinde ist, die Frequenzen zu identifizieren und durch einen Vergleich der aus beiden Seiten ankommenden Signale die Richtung der Schallquelle zu bestimmen.

Die sekundäre Hörwindung (A2, Area 42) umgibt die primäre Rinde hufeisenförmig. Sie verbindet die Signale mit auditiven Erinnerungen und vergleicht diese. Zudem ist sie eng mit dem Wernicke-Zentrum für das Sprachverständnis verbunden. Sie hilft bei der Analyse von Tönen, Melodien, Geräuschen, Worten und Sätzen. Der Ort der Verarbeitung der Lautheitsempfindung ist noch nicht bekannt. Wegner et al. (87) 1997 untersuchen den Zusammenhang

zwischen psychoakustischer Lautheit und frühen akustischen Potentialen. Sie können kein Korrelat nachweisen. Sie vermuten es aber auf höheren Ebenen der Hörbahn.

## 2.2 Akustische Grundbegriffe

**Schall** ist eine sich wellenförmig ausbreitende Schwingung von Molekülen in Luft und anderen elastischen Körpern. Die Wellen werden durch schwingende Körper angestoßen, die durch Anregung der Nachbarmoleküle deren Energieabgabe bewirken. So entstehen Zonen, in denen die Teilchen dichter gepackt sind als in anderen, bzw. Druck und Sog. Die Druckdifferenz kennzeichnet eine Amplitude, den **Schalldruck** [Pa]. Das menschliche Ohr ist in der Lage einen sehr großen Intensitätsumfang wahrzunehmen. So beträgt der Faktor zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze mehrstellige Zahlenwerte bis zu  $10^7$  (**Abb. 1**). Dies führt zum Einsatz von umständlich großen Zahlen bei der Beschreibung von Schalldrücken und Intensitäten.

In der Praxis verwendet man daher ein logarithmisches Maß, den **Schalldruckpegel L** [dB SPL (S = sound, P = pressure, L = level)]. Er ist definiert als ein im Verhältnis zum Bezugsschalldruck ( $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa) stehender Schalldruck  $L = 20 \times \log p_x/p_0$  [dB SPL].

Die logarithmische Beziehung erleichtert das Umgehen mit der großen dynamischen Bandbreite des Ohres. Eine Steigerung um 20 dB SPL bedeutet so eine Verzehnfachung des Schalldruckes.

Ferner kann man den Pegel auch auf den Hörverlust HL (hearing loss) beziehen. Dieser Wert verdeutlicht die Differenz in dB HL zwischen der individuellen Hörschwelle und der eines Normkollektivs. Die Dezibelangaben entsprechen keiner Einheit, sie stellen lediglich die logarithmische Beziehung dar. Es ist deshalb wichtig, den Bezugspegel anzugeben (SPL oder HL).

Der Schall ist aber neben der Amplitude auch durch die Tonhöhe, die **Frequenz** in Hertz [Hz] beschreibbar. Die für den Menschen hörbaren Schallschwingungen liegen zwischen 20 Hz und ca. 16 – 20 kHz (89). Tiefere Frequenzen (<20 Hz, Infraschall) werden als Vibrationen über den Tastsinn wahrgenommen, höhere Frequenzen (>20 kHz, Ultraschall) können vom Menschen nicht registriert werden.

Der Lautstärkepegel ist frequenzabhängig (**Abb.: 1**). Bei den von Fletcher et al. (11) 1937 veröffentlichten Kurven gleicher Lautstärke, den Isophonen, wurde die Lautstärke mit einem Vergleichston bei 1000 Hz ermittelt. Der Lautstärkepegel wird mit der Einheit phon

gemessen. Bei 1000 Hz sind die dB-Werte den phon-Werten gleich, d.h. der Lautstärkepegel wurde willentlich dem Schalldruckpegel gleichgesetzt. Die Hörschwelle ist auch eine Isophone, im Mittel liegt sie bei 4 phon. Bei der Bestimmung von Intensitätsunterschieden wird auf das Verfahren von Stevens (80, 81) 1955/1959 zurückgegriffen. Er versucht, den Zusammenhang von Lautheit und Intensität zu verdeutlichen. Dazu erstellt er die sone-Skala

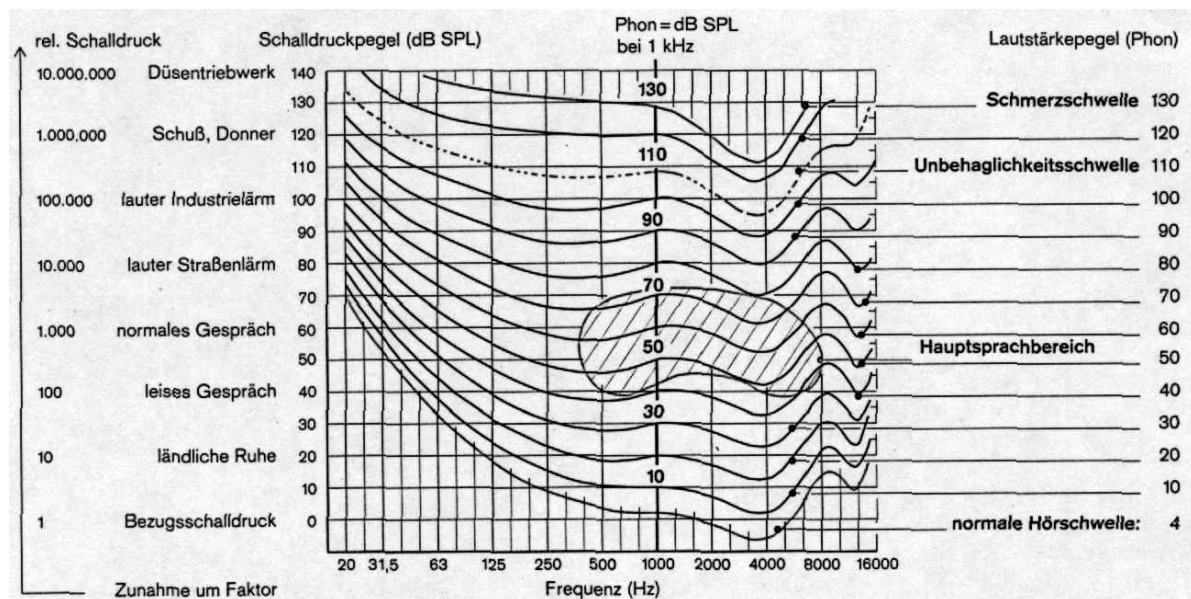


Abb.1: Kurven gleicher Lautstärkepegel (Isophonen) nach Fletcher und Munson (11). Auf der Abszisse ist die Frequenz dargestellt, auf der Ordinate sind die Lautstärkepegel (phon) und Schalldruckpegel (dB) gegenübergestellt. [aus Zenner (89)]

Nahe der Hörschwelle werden zwei Töne als verschieden laut empfunden, wenn sie sich um 3 - 5 dB unterschieden. Deutlich oberhalb der Hörschwelle (ab 40 dB) sinkt die Unterscheidungsschwelle auf 1 dB ab.

Die Unbehaglichkeitsschwelle liegt für mittlere Frequenzen bei 90 - 110 dB SPL. Als Unbehaglichkeitsschwelle gilt der niedrigste Pegel, den der Patient bereits nicht mehr akzeptiert. Die Erfassung dieser Schwelle ist vor allem in der Hörgeräteanpassung von Interesse. Der Pegel des angenehmen Hörens wird durch 2:1-Teilung des Restdynamikbereiches zwischen Hörschwelle und Unbehaglichkeitsschwelle ermittelt. Die Schmerzgrenze liegt bei 130 bis 140 dB SPL und ist weitestgehend frequenzunabhängig. Der hörbare Bereich

zwischen der Schmerzgrenze und der Hörschwelle beschreibt das menschliche Hörfeld. Es ist in **Abbildung 1** dargestellt. Der schraffierte Bereich stellt den Teil dar, in dem das menschliche Ohr am empfindlichsten ist, was dem Hauptsprachbereich entspricht. Der angenehme und bevorzugte Bereich der Lautstärke liegt bei 60 - 80 dB (Umgangssprache).

Die **Lautheit** eines Tones wird wie die Lautstärke jeder Frequenz unterschiedlich beurteilt. Jedoch ist es eine Beurteilung, die jeder Mensch ganz subjektiv im täglichen Leben mehrfach trifft, wie z.B. bei der Temperatur. Einerseits lassen sich Temperaturunterschiede physikalisch messen und in einer Zahl mit der Einheit Grad Celsius oder Kelvin angeben. Andererseits ist die subjektive Beurteilung jedoch nicht von diesen Zahlen zu beschreiben. Jeder Mensch kann aber sehr genau sagen, ob das Wasser nun kalt, lauwarm oder heiß ist. Bei der Lautheit ist dies ähnlich. Die Schallintensität, die Lautstärke läßt sich physikalisch durch den Schalldruckpegel in dB SPL bestimmen. Ein Geräusch kann aber von jedem als laut oder leise eingeordnet werden. In beiden Fällen ist die Beurteilung sehr individuell und von äußerlichen Reizen beeinflussbar.

In der vorliegenden Untersuchung wird zur Beschreibung des Lautheitseindrucks die Darstellung in Pegellautheitsdiagrammen gewählt. Dabei wird der Lautheitsanstieg als Funktion der Lautheit in Kategorieeinheiten KU im Verhältnis zu dem Schalldruckpegel in dB durch eine Gerade dargestellt. Sie wird durch einen Schnittpunkt mit der Abszisse  $b$  (Hörschwelle, sog. Fußpunkt) und eine Steigung  $m$  beschrieben. Die Gerade wird als lineare Regression durch die Einzelantworten der Probanden ermittelt. Der Bereich zwischen der Kurve und der X-Achse wird als Hörfläche beschrieben.

### 2.3 Die verschiedenen Arten der Hörstörungen

Eine Schalleitungsschwerhörigkeit ist auf eine Störung am äußeren Ohr oder im Mittelohr zurückzuführen. Der Schall wird in seiner Weiterleitung zum Innenohr behindert. Hierzu zählen u.a. Gehörgangsfremdkörper, Schäden an den Gehörknöchelchen und auch Flüssigkeitsansammlungen im Mittelohr (z.B. Cerumen obturans, Otosklerose, Otitis media mit Paukenerguss).

Eine Schallempfindungsschwerhörigkeit geht im Gegensatz zur Schalleitungsschwerhörigkeit mit einer Störung der Signalverarbeitung im Innenohr, des Hörnervs oder der Hörbahnen einher. Dies macht sich neben der Abschwächung der Lautstärke der

ankommenden Signale in einer Verzerrung bemerkbar und wird auch als Fehlhörigkeit bezeichnet. Die Beschädigung der inneren Haarzellen führt zu einem Sensitivitätsverlust und einer reduzierten Lautstärkewahrnehmung. Daneben kommt es aber vor allem auch zu einer Verzerrung der Signale, was im wesentlichen durch eine Schädigung der äußeren Haarzellen zu erklären ist. Sie treten durch ihre Kontraktilität als elektromechanische Wandler auf, die zu aktiven Verstärkungsprozessen führen. Durch ihren Ausfall als cochleärer Verstärker kommt es auch zum Recruitmentphänomen. Dieses ist gekennzeichnet durch einen pathologischen Lautheitsanstieg. Ein Patient hat bedingt durch seine Schwerhörigkeit eine erhöhte Hörschwelle. Im überschwelligeren Bereich empfindet er aber je nach Hörstörungsgrad ebenso laut und nicht selten sogar noch lauter als eine normalhörende Person. Diese differente Hör- bzw. Lautheitsempfindung stellt besondere Anforderungen an die Hörgeräteanpassung. So kann ein Geräusch nicht entsprechend der Hörminderung angehoben werden, sondern es muß im lauten Bereich auch gedämpft werden, um nicht eine unangenehme Empfindung hervorzurufen und zu bewirken, dass das Hörgerät leiser gestellt, abgestellt oder gar nicht mehr getragen wird.