

# Lärm und Gehör unter hyperbaren Bedingungen

Heinz Waldmann<sup>1</sup>, Alfred Stirnemann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Suva, Bereich Physik, CH - 6002 Luzern, E-Mail: heinz.waldmann@suva.ch*

<sup>2</sup> *Phonak AG, CH - 8712 Stäfa, E-Mail: alfred.stirnemann@phonak.ch*

## Einleitung

Bei Tunnelarbeiten wird teilweise der Luftdruck im Bereich des Vortriebs um 2 bis 3 bar gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck erhöht. Für die Suva stellt sich die Frage, wie die Lärmexposition unter hyperbaren Bedingungen zu messen und im Hinblick auf die Gehörgefährdung zu beurteilen ist.

In einem Versuch in einer Druckkammer wurde bei Absolutdrücken von 1, 2, 3 und 4 bar untersucht, wie sich der veränderte Luftdruck auf die Schallmesstechnik und auf den Hörvorgang auswirkt. Generell erwartet man z.B. bei 4 bar eine Zunahme der Luftdichte um einen Faktor 4, während die Schallgeschwindigkeit gleich bleibt. Dies bedeutet, dass alle "akustischen Federn" (Volumina) bei Kalibratoren und Mikrofonen um diesen Faktor versteift werden.

Brüel & Kjær und Norsonic geben für ihre Schallmessgeräte und Kalibratoren einen Einsatzbereich von 0.85 bis 1.08 bar an. Die Einsatzbedingungen in diesem Experiment liegen weit ausserhalb dieses Bereichs.

## Schallmesstechnik

In der Druckkammer wurden ein Pistonphon Brüel & Kjær BK4220, zwei unregelmässige Kalibratoren BK4230 und je ein geregelter Kalibrator BK4231 und Norsonic Nor1251 eingesetzt sowie zwei Schallmessgeräte Nor118, ein Schallmessgerät Nor140 (mit 1/2-Zoll-Mikrofon Nor1226 und Vorverstärker Nor1209) und ein Lärmdosimeter Larson Davis LD706. Schliesslich wurde zur Wiedergabe von Rosa Rauschen für Messungen im direkten Schallfeld ein Radio Pure EVOKE-2<sup>XT</sup> verwendet.

## Überraschungen

Völlig unerwartet waren schon bei 2 bar Absolutdruck bei den Schallmessgeräten Nor118 sämtliche Folientasten eingedrückt. Die Geräte konnten nicht mehr bedient werden und wurden vorsichtshalber ausgeschleust. Die beiden Schallmessgeräte Nor140 und LD706 verrichteten ihren Dienst klaglos bis 4 bar Absolutdruck. Das Problem mit den Folientasten trat ebenfalls beim Kalibrator B&K 4231 bei 4 bar Absolutdruck auf.

**Tabelle 1:** An verschiedenen Normschallquellen gemessener Schallpegel in dB(A); p: Absolutdruck

| p<br>[bar] | BK4220 | BK4230 |       | BK4231 | Nor1251 |
|------------|--------|--------|-------|--------|---------|
|            | Nor140 | Nor140 | LD706 | Nor140 | Nor140  |
| 1.0        | 115.0  | 93.8   | 94.1  | 94.2   | 114.1   |
| 2.0        | 120.7  | 93.6   | 92.4  | 93.6   | 115.8   |
| 3.0        | 123.4  | 93.0   | 90.7  | 93.1   | 115.4   |
| 4.0        | 125.6  | 92.4   | 89.2  | –      | 114.8   |

## Kalibratoren

Am Pistonphon ( $f = 250$  Hz) wäre ein Anstieg des Schallpegels um 6 dB pro Druckverdoppelung zu erwarten. Der gemessene Schalldruck (siehe Tabelle 1) ist bei 2 bar um 0.3 dB(A), bei 3 bar um 1.1 dB(A) und bei 4 bar um 1.5 dB(A) tiefer als erwartet.

Die anderen Kalibratoren arbeiten sämtliche mit einem Lautsprecher als Schallquelle. Alle Modelle von B&K zeigen mit zunehmendem Druck eine monotone Abnahme des gemessenen Schallpegels. Die Resultate mit dem Lärmdosimeter LD706 am Kalibrator B&K 4230 zeigen qualitativ die selbe Tendenz aber im Ausmass deutlich grössere Differenzen. Am Kalibrator von Norsonic wird bei Druckerhöhung von 1 auf 2 bar eine Pegelzunahme um 1.7 dB(A) gemessen; bei weiterer Druckerhöhung nimmt der gemessene Schallpegel ab.

## Lautsprecher-Wiedergabe

Im direkten Schallfeld vor einem Lautsprecher zeigten Nor140 bzw. LD706 bei 1 bar den gleichen Schallpegel von 87.1 dB(A), bei 3 bar Schallpegel von 94.7 bzw. 94.6 dB(A), bei 4 bar Schallpegel von 95.1 bzw. 96.1 dB(A); für 2 bar liegen keine Messwerte vor. Nebst der deutlichen Zunahme des gesamten Wiedergabe-Schallpegels des Lautsprechers waren in der Terzbandanalyse keine grösseren Veränderungen des Frequenzgangs festzustellen.

## Gehör-Modell und Messung am Menschen

Die Wellenimpedanz des Gehörgangs ist bei Normaldruck etwa viermal kleiner als die Impedanz des Trommelfells. Durch diesen relativ harten Abschluss entsteht die typische Gehörgangs-Resonanz bei rund 2.5 kHz ( $\lambda/4$ -Resonanz bei einer Länge des Gehörgangs von etwa 34 mm). Bei einem Luftdruck von 4 bar wären die beiden genannten Impedanzen etwa gleich, wodurch die Resonanz bei 2.5 kHz verschwinden sollte.

In einem Gehörgang-Modell konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden. Es konnte aber anhand der gleichbleibenden Resonanzfrequenz beobachtet werden, dass die Schallgeschwindigkeit trotz der Druckänderung konstant bleibt.

Eine Hörschwellen-Audiometrie sollte diesen Effekt am Menschen nachweisen. Die Messung des Wiedergabe-Schallpegels des Audiometrie-Kopfhörers Sennheiser HDA 200 am Artificial Ear BK4153 ergab grosse Differenzen von 17.6 dB(A) bei 6 kHz und 20.3 dB(A) bei 8 kHz und 1 bzw. 4 bar Absolutdruck (vgl. Abbildung 1).

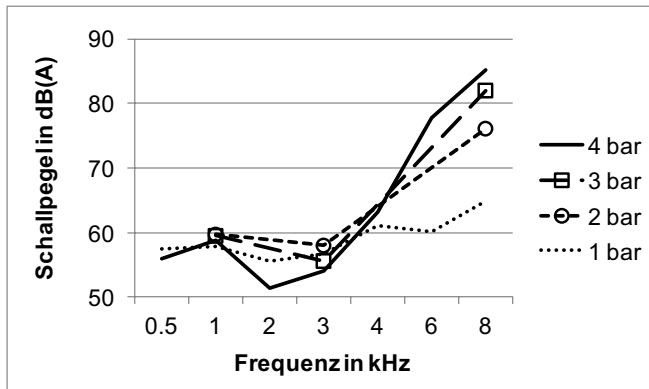


Abbildung 1: Wiedergabepegel des Audiometrie-Kopfhörers, am "Artificial Ear" BK4153 gemessen

Wird die Hörschwelle des (40-jährigen) Versuchsleiters entsprechend Abbildung 1 korrigiert, ergeben sich in Abhängigkeit des Luftdrucks die Hörschwellen von Abbildung 2. Es ist dabei festzuhalten, dass die Hörschwelle einmalig und in 5-dB-Schritten bestimmt wurde. Auch in diesem Experiment ist der erwartete Effekt nicht befriedigend nachzuweisen.

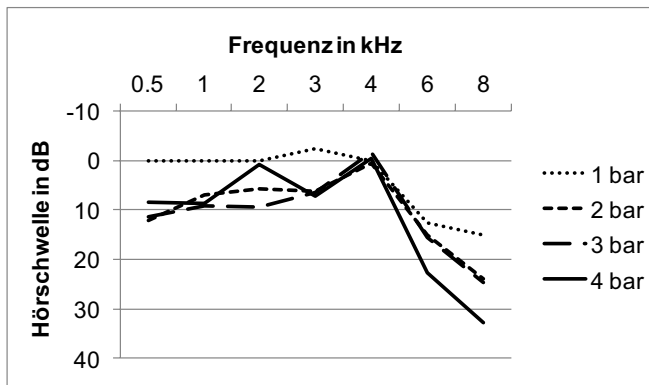


Abbildung 2: Hörschwelle des Versuchsleiters nach Korrektur des Wiedergabepegels

### Gehörschutzmittel

Schliesslich wurde durch eine Messung der Hörschwelle mit und ohne Gehörschutz die Dämmung von vorgeformten Kunststoff-Pfropfen "3M 1271" gemessen (vgl. Abbildung 3). Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der Dämmung bei Frequenzen über 2 kHz.

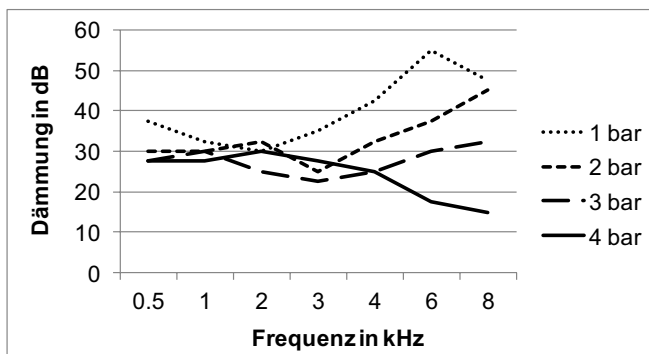


Abbildung 3: Dämmung von Gehörschutzpfropfen "3M 1271" bei unterschiedlichen Absolutdrücken

Bei Normaldruck ist ein grosser Teil der Dämmung darauf zurückzuführen, dass der Gehörschutz die Gehörgang-Resonanz unterdrückt. Wenn sich diese Resonanz bei erhöhtem Luftdruck gar nicht ausbildet, wird die Dämmung

des Gehörschutzes schlechter beurteilt. Eine Dämmung von rund 20 dB bleibt erhalten.

### Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, welchen grundlegenden Einfluss der Luftdruck – der hier in einem ausserordentlich weiten Bereich verändert wurde – auf die Messung von Schalldruck und auf das Gehör hat.

Im Experiment am Pistophon reagiert das Messmikrofon Nor1226 bei  $f = 250$  Hz weitgehend wie erwartet; die Abweichungen zeigen aber eine systematische Tendenz. Da die Resonanzfrequenz von Messmikrofonen in der Regel deutlich über 20 kHz liegt, ist im Hörbereich eigentlich nicht mit grösseren Frequenzgang-Abweichungen zu rechnen.

Auch die Kalibratoren mit Lautsprechern, seien sie unreguliert oder geregelt, unterliegen dem Einfluss der starken Erhöhung des Luftdrucks. Sogar die Bauform des Mikrofons scheint dabei einen Einfluss zu haben, wie die Messungen mit dem Dosimeter LD706 belegen, das am Kalibrator recht grosse, im Freifeld aber nur geringe Abweichungen zum Messmikrofon Nor1226 liefert.

Die Audiometrie bei erhöhtem Luftdruck erweist sich als kritisch. Das "Artificial Ear" reagiert stark auf den veränderten Luftdruck, da es die Impedanz- und Resonanzverhältnisse des Aussen- und Mittelohres durch Ersatzvolumen und -widerstände simuliert, die nur bei Normaldruck die erwartete Impedanz liefern. Aber auch der Audiometrie-Kopfhörer birgt Probleme wegen des relativ kleinen Kapselvolumens, das mit dem Volumen von Gehörgang und Mittelohr interagiert. Eine Freifeld-Audiometrie wäre vorzuziehen, ist aber unter den Bedingungen in einer Druckkammer kaum zu realisieren (Grundgeräuschpegel).

### Ausblick

Um den Einfluss einzelner Komponenten einer Schallmesskette unterscheiden und die eingangs gestellten Fragen beantworten zu können, müssten Kalibrier-Möglichkeiten für Messmikrofone und für die Audiometrie gefunden werden, die eine Messung des Frequenzgangs bei stark erhöhtem Luftdruck erlauben.

Die beobachtete ziemlich starke Einbusse der Dämmung eines Gehörschutzpfropfens muss messtechnisch besser abgestützt werden. Messungen an anderen Gehörschutz-Modellen sind für ein besseres Verständnis nötig.

### Dank

Wir danken der ARGE ATUBO, Biel, und Herrn Dr. med. Jürg Wendling, Biel, die uns diese Messungen ermöglicht haben.

### Literatur

- [1] Stirnemann, A.: Ein Mittelohrmodell basierend auf der Aussenohr-Transferimpedanz, Fortschritte der Akustik, DAGA 2011, 21.-24. März 2011, Düsseldorf
- [2] Flook, V.: Physics and physiology in the hyperbaric environment; Clin. Phys. Physiol. Meas.; 1987, Vol. 8, No. 3, p. 197-230