

# Vergleich verschiedener Messsysteme zur Ermittlung der individuellen Schalldämmung von Gehörschutzstöpseln

Sandra Dantscher

Institut für Arbeitsschutz der DGUV, 53757 Sankt Augustin, E-Mail: [sandra.dantscher@dguv.de](mailto:sandra.dantscher@dguv.de)

## Einleitung

In den letzten Jahren wurden verschiedene Messsysteme auf den deutschen Markt gebracht, mit deren Hilfe die individuelle Schalldämmung von Gehörschutzstöpseln ermittelt werden kann. Teilweise werden diese Geräte bereits von Betriebsärzten oder Sicherheitsfachkräften in Betrieben oder von Gehörschutzherstellern eingesetzt.

Die Einsatzmöglichkeiten für die individuelle Schalldämmungsmessung lassen sich unterteilen in die Überprüfung der Produkteigenschaften von Gehörschutz-Otoplastiken (Funktionskontrolle) und die Ermittlung der resultierenden Dämmung und damit des Trageverhaltens. Der zweite Aspekt beinhaltet z.B. die Überprüfung zur Einhaltung des maximal zulässigen Expositionswertes nach Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, die ausreichende Schutzwirkung für Personen mit Hörminderung oder einen an die Kommunikationsbedürfnisse angepassten Frequenzverlauf der Dämmung.

Die hier vorgestellte Studie wurde vom Sachgebiet Gehörschutz des Fachbereichs Persönliche Schutzausrüstungen der DGUV in Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe und dem Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) durchgeführt. Dabei wurden fünf solcher Messsysteme im direkten Vergleich zueinander getestet. Ziel war die Praxiserprobung der verschiedenen Geräte und ein Vergleich der Ergebnisse untereinander. Ein Vergleich mit den Schalldämmwerten aus der Baumusterprüfung nach DIN ISO 4869-1 [1] ist nur mit den vom Hersteller deklarierten Werten möglich, da keine eigenen Messungen nach diesem Verfahren durchgeführt wurden.

Teilweise wurden die Ergebnisse bereits in [2] veröffentlicht. Daher soll hier der Schwerpunkt auf einigen noch nicht behandelten Aspekten liegen.

## Studiendesign

### Messsysteme

Es wurden fünf Messsysteme untersucht:

- Zwei PC-basierte Audiometer: Maico MA 33 und Inmedico Oscilla
- Ein audiometerartiges System: Cotral CAPA
- Ein System mit Lautstärkevergleich: Howard Leight VeriPRO
- Ein objektives Messsystem auf Basis der MIRE-Technik (Microphone in real ear): 3M E-A-Rfit

Für Audiometer und audiometerartige Systeme wird die Hörschwelle für jede Frequenz zweimal ermittelt, mit und ohne Gehörschutz. Die Differenz der beiden Schwellen ist die Schalldämmung. Beim Lautstärkevergleich muss die Versuchsperson die Lautstärke auf beiden Ohren gleich einstellen. Dies wird dreimal durchgeführt (beide Ohren ohne Gehörschutz, ein Ohr mit Gehörschutz und beide Ohren mit Gehörschutz). Daraus lassen sich die Dämmwerte für beide Ohren ermitteln. Das objektive Messverfahren ermittelt die Schallpegel unter dem Gehörschutzstöpsel (mit einem Sondenmikrofon) und außen am Ohr. Die Differenz („noise reduction“) entspricht nicht der Schalldämmung („insertion loss“), kann aber entsprechend korrigiert werden.

### Messgrößen

Alle Systeme erlauben die Bestimmung von Dämmwerten bei den Oktavmittelfrequenzen. Der Frequenzbereich beträgt dabei 125 bis 8000 Hz oder 250 bis 4000 Hz, je nach Gerät. Darüber hinaus bieten alle Verfahren außer den Audiometern einen berechneten Einzahlkennwert, der meist als PAR-Wert (Personal attenuation rating) bezeichnet wird und auf dem SNR-Wert nach DIN EN ISO 4869-2 [3] basiert. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die hier gezeigten PAR-Werte für alle Systeme aus den jeweiligen Oktavdämmwerten berechnet und nicht von den Messsystemen übernommen.

Generell ist beim Vergleich der individuellen Dämmwerte mit den Ergebnissen der Baumusterprüfung zu beachten, dass die Werte der Baumusterprüfung normalerweise mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 84 % angegeben werden, indem jeweils die Größe Mittelwert minus Standardabweichung über die Stichprobe an Versuchspersonen betrachtet wird. Um zu prüfen, ob der individuell ermittelte Dämmwert mit der Baumusterprüfung vereinbar ist, kann er z.B. mit dem Intervall Mittelwert  $\pm$  2·Standardabweichung verglichen werden, in dem ca. 95 % aller Werte liegen sollten. Dies gilt sowohl für die Oktavdämmwerte als auch für den PAR-Wert.

Der PAR-Wert ist im Prinzip eine einfache Größe, um das Verhalten des Gehörschützers zu beschreiben. Um aber der Frequenzabhängigkeit der Dämmung Rechnung zu tragen, muss der PAR-Wert vom C-bewerteten Schallpegel am Arbeitsplatz abgezogen werden, damit man den A-bewerteten Restpegel am Ohr erhält. D. h. der Dämmwert hängt linear von der Differenz  $L_C - L_A$  ab, was für Gehörschützer mit steilem Frequenzverlauf eine gute Näherung darstellt. Für Produkte mit flacher Schalldämmkurve (HML-Werte nur gering unterschiedlich) hingegen sind SNR- bzw. PAR-Wert nicht gut geeignet. Hierfür sollte auf die HML-Werte zurückgegriffen werden.

## Untersuchte Gehörschutzstöpsel

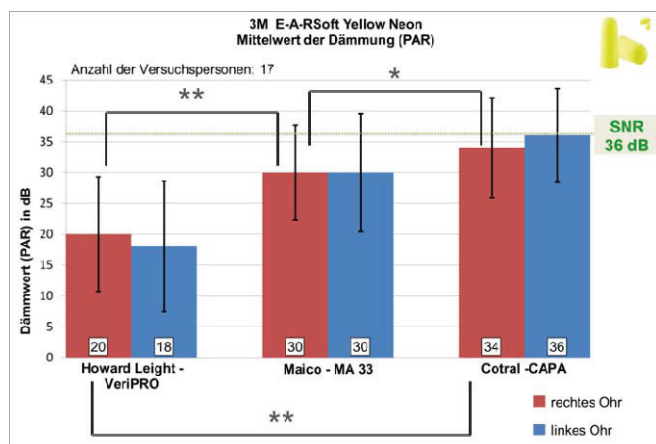
Es wurden Messungen mit fünf verschiedenen Produkten durchgeführt: eine Gehörschutz-Otoplastik, ein Lamellenstöpsel und drei Schaumstoffstöpsel (einer mit mittlerer Dämmung und zwei mit hoher Dämmung).

Im ersten Teil der Studie wurden die Otoplastik Phonak Serenity Classic, der Lamellenstöpsel 3M E-A-R Ultrafit und der Schaumstoffstöpsel 3M E-A-RSoft Yellow Neon mit den Verfahren VeriPRO, MA 33 und CAPA untersucht. Im zweiten Studienteil kamen die Schaumstoffstöpsel 3M E-A-R Classic II und 3M E-A-RSoft FX mit den Verfahren MA 33, Oscilla und E-A-Rfit zum Einsatz. Dabei wurde jeweils die Reihenfolge der Messungen so gewählt, dass der Gehörschutzstöpsel nur genau einmal eingesetzt wurde, damit für alle Systeme dieselbe Situation vorlag.

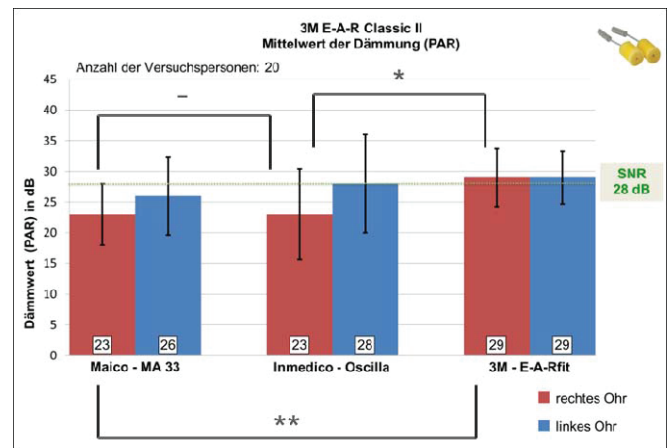
Das System 3M E-A-Rfit verlangt den Einsatz von speziell präparierten Stöpseln mit einem Sondenschlauch zur Ankopplung an das Messmikrofon. Da das offene Ende des Schlauchs bei den weiteren audiometrischen Messungen gestört hätte, wurde der Schlauch abgeschnitten und die Öffnung mit einem Maisstärke/Wasser-Gemisch dicht verschlossen.

## Ergebnisse: Überblick

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen beispielhaft Ergebnisse für zwei Gehörschutzstöpsel (jeweils ein Produkt pro Studienteil). Es wurden jeweils Mittelwert und Standardabweichung der PAR-Werte über die Versuchspersonengruppe berechnet. In grün ist zusätzlich der SNR-Wert aus der Baumusterprüfung eingezeichnet. Da diese Größe eine Vertrauenswahrscheinlichkeit von 84 % hat, sollten im Idealfall auch 84 % der individuellen Werte den SNR-Wert mindestens erreichen. Dies ist in den vorliegenden Messungen nur für wenige Fälle annähernd erfüllt. Allerdings lässt sich aus den hier ermittelten Daten nicht entscheiden, ob die getesteten Messsysteme an sich von der Baumusterprüfung abweichen, oder ob die Versuchspersonen den Gehörschutz anders eingesetzt hatten, so dass die Baumusterwerte gar nicht erreichbar waren.



**Abbildung 1:** Mittelwert und Standardabweichung der PAR-Werte für eine Messung aus dem ersten Studienteil. Erläuterungen der Signifikanz im Text.



**Abbildung 2:** Mittelwert und Standardabweichung der PAR-Werte für eine Messung aus dem zweiten Studienteil. Erläuterungen der Signifikanz im Text.

Für die drei Verfahren aus einem Studienteil wurden jeweils paarweise zweiseitige t-Tests mit gepaarten Stichproben durchgeführt. Die Abbildungen 1 und 2 enthalten beispielhaft die Ergebnisse für das rechte Ohr, die aber repräsentativ für alle Messungen sind (-:  $p \geq 0,05$ , \*:  $p < 0,05$ , \*\*:  $p < 0,01$ ). Das System VeriPRO aus dem ersten Studienteil weicht deutlich sowohl vom Audiometer MA 33 als auch vom audiometerartigen System CAPA ab. Der Vergleich zwischen MA 33 und CAPA wiederum liefert ebenfalls signifikante Unterschiede. Die Standardabweichungen sind für VeriPRO tendenziell am größten.

Im zweiten Studienteil sind die Ergebnisse der beiden Audiometer nicht signifikant unterschiedlich, aber beide Systeme weichen von den Resultaten von E-A-Rfit ab. Dieses System liefert die höchsten PAR-Werte und die kleinsten Standardabweichungen.

Betrachtet man die PAR-Werte für einzelne Versuchspersonen, so zeigen sich teilweise sehr deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen. Auch hier ist wieder VeriPRO auffällig, wobei Abweichungen zu MA 33 und CAPA von bis zu 20 dB auftreten. Generell ist natürlich zu berücksichtigen, dass es sich bei allen Verfahren außer bei E-A-Rfit um subjektive Messmethoden handelt, die durch die Beteiligung der Versuchsperson eine höhere Messunsicherheit aufweisen als objektive Verfahren. Dennoch zeigen Vergleiche des Verlaufs der Oktavdämmwerte, dass VeriPRO in manchen Fällen Kurven mit auffälligen Sprüngen generiert, die physikalisch nicht begründbar erscheinen. Dies deckt sich auch mit anderen Untersuchungen [4][5][6].

## Aussagekraft einer Einzelfrequenzmessung

Die umfangreichen Daten aus den zwei Studienteilen lassen sich auch nutzen, um begleitende Fragestellungen zur individuellen Bestimmung der Schalldämmung zu untersuchen. Zwei davon sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Viele der subjektiven Messsysteme, die von Gehörschutzherstellern entwickelt wurden (audiometerartig bzw. mit Lautstärkevergleich) bieten die Möglichkeit eines

Schnelltests mit nur einer Frequenz. Dies würde die Messzeit deutlich senken und damit die Akzeptanz erhöhen. Prinzipiell ist eine solche Einzelfrequenzmessung auch mit handelsüblichen Audiometern möglich.

Strebt man den PAR-Wert als eigentliche Messgröße an, ist zu klären, ob die Dämmung bei einer Einzelfrequenz eine Aussage über das Verhalten des Gehörschützers im gesamten Frequenzbereich macht, also mit dem PAR-Wert korreliert. Für alle fünf untersuchten Produkte wurden die Dämmwerte bei den gemessenen Einzelfrequenzen in Abhängigkeit vom zugehörigen PAR-Wert in Streudiagrammen dargestellt. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen beispielhaft die Ergebnisse für ein Produkt (alle drei Messsysteme aus dem ersten Studienteil) bei zwei Frequenzen (1 und 4 kHz). Zusätzlich zur Winkelhalbierenden, die der Identität der beiden Größen entspricht, sind um  $\pm 5$  dB verschobenen Parallelen eingezeichnet. Dieser Wertebereich von 5 dB um den PAR-Wert wird als ausreichend genau betrachtet.

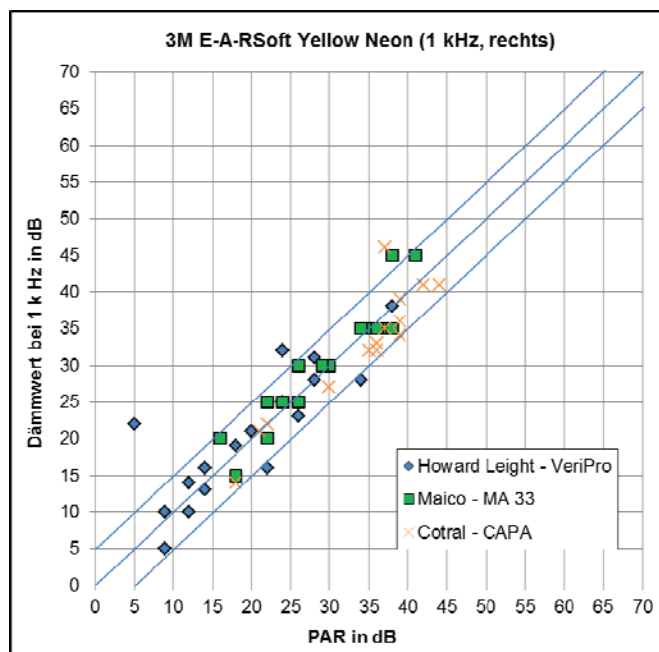


Abbildung 3: Streudiagramm aus Dämmwert bei 1 kHz gegen den PAR-Wert für die drei Messsysteme aus dem ersten Studienteil. Die beiden äußeren Parallelen haben einen Abstand von  $\pm 5$  dB zur Winkelhalbierenden.

Während die Dämmwerte bei 4 kHz deutlich größer sind als die zugehörigen PAR-Werte, ist die Übereinstimmung bei 1 kHz sehr gut. Für dieses Produkt wäre es also möglich, aus der Messung bei 1 kHz den PAR-Wert mit einer Unsicherheit von  $\pm 5$  dB abzuleiten. Auch für die anderen vier Produkte war es für fast alle Messsysteme möglich, eine einzelne Frequenz zu identifizieren, für die der Einzeldämmwert für mindestens 70 % der Versuchspersonen mit einer Genauigkeit von  $\pm 5$  dB mit dem PAR-Wert übereinstimmt. Welche Frequenz aber für ein bestimmtes Produkt die beste ist, wird durch die Frequenzabhängigkeit der Schalldämmwerte bestimmt und ist i.A. nicht bekannt. Betrachtet man die Baumusterdämmwerte für die fünf hier untersuchten Produkte, liegen die idealen Frequenzen zwischen 500 Hz und 2 kHz. In der Literatur finden sich ebenfalls Angaben in diesem Frequenzbereich [7].

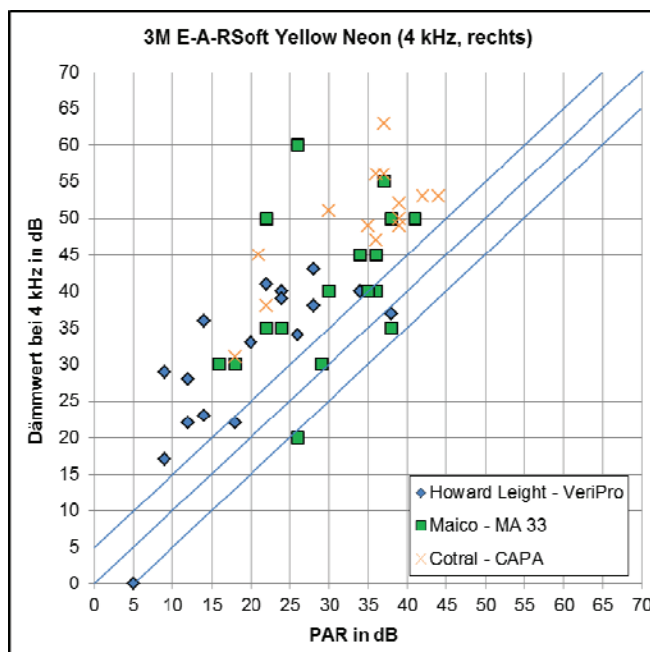


Abbildung 4: Streudiagramm aus Dämmwert bei 4 kHz gegen den PAR-Wert für die drei Messsysteme aus dem ersten Studienteil. Die beiden äußeren Parallelen haben einen Abstand von  $\pm 5$  dB zur Winkelhalbierenden.

### Vergleich verschiedener Audiometer

Im zweiten Studienteil wurden zwei PC-basierte Audiometer direkt miteinander verglichen. Die Auswertung der PAR-Werte (siehe Abbildung 2) ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Geräten. Allerdings gibt es aus anderen Arbeiten Hinweise darauf, dass die Ermittlung der Dämmung bei tiefen Frequenzen über eine Hörschwellenmessung mit Kopfhörern zu niedrige Werte liefern kann [4][5][8]. Der PAR-Wert ist allerdings nicht die geeignete Größe, dies zu beurteilen, da bei seiner Berechnung die A-Bewertung eingeht und dadurch der Beitrag der tiefen Frequenzen nur gering ist.

Daher wurden die beiden tiefsten Frequenzen (125 und 250 Hz) für die zwei geprüften Produkte für die Audiometer MA 33 und Oscilla miteinander verglichen. Die zweiseitigen t-Tests mit gepaarten Stichproben ergaben für die rechten Ohren jeweils keine signifikanten Unterschiede, während die Dämmwerte für die linken Ohren signifikant bzw. hoch signifikant voneinander abwichen. Dabei lieferte Oscilla die höheren Ergebnisse. Betrachtet man zum Vergleich die Unterschiede zwischen den linken und rechten Ohren, ergeben sich für beide Produkte bei den Systemen MA 33 und E-A-Rfit keine signifikanten Unterschiede, während für Oscilla bei einem Produkt (3M E-A-R Classic II) das linke Ohr signifikant höhere Werte liefert.

Die Gründe hierfür sind bisher noch nicht klar. Die Annahme, dass jede Messung mit einem Audiometer vergleichbare Schalldämmwerte ergibt, scheint also nicht pauschal gerechtfertigt. Es sind auf jeden Fall weitere Untersuchungen nötig, die auch unterschiedliche Kopfhörertypen, insbesondere im Hinblick auf das freie Volumen unter der Kapself, berücksichtigen sollten. Betrachtet man die oben erwähnte Diskrepanz zur Baumusterprüfung, die ja in einem Diffusschallfeld



durchgeführt wird, sollte der Aspekt der „missing 6 dB“ nicht vergessen werden [9]. Er beschreibt die Anhebung der Hörschwelle für das offene Ohr bei tiefen Frequenzen durch die Verwendung von Kopfhörern (im Gegensatz zu Freifeldmessungen). Ursache sind Verdeckungseffekte durch physiologische Geräusche im Gehörgang. Andererseits ist für die Baumusterprüfung bekannt, dass die geschlossene Schwelle durch eben solche physiologischen Geräusche zu höheren Pegel verschoben wird, so dass die ermittelte Schalldämmung etwas zu groß ausfällt [10]. Diese beiden gegenläufigen Effekte könnten die Abweichungen zwischen Baumusterprüfung und audiometrischen Messungen erklären.

## Diskussion

Die Studie zeigt, dass die heute verfügbaren Messverfahren zur Bestimmung der individuellen Schalldämmung die Freifeldmessungen in der Baumusterprüfung akzeptabel widerspiegeln können. Sie zeigt aber auch, dass bei der Untersuchung eines Produkts signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Messsystemen auftreten können. Dies betrifft sowohl individuelle Ergebnisse als auch Mittelwerte und Standardabweichungen der Stichproben. Das System VeriPRO ist für einige Produkte auffällig. Die SNR-Werte aus der Baumusterprüfung werden nicht für alle Produkte erreicht. Es ist anzunehmen, dass die Versuchspersonen dieser Studie beim Einsetzen der Gehörschutzstöpsel nicht die Schalldämmung reproduzieren konnten wie die Personengruppe bei der Baumusterprüfung. Ein individueller Vergleich für die hier untersuchten Verfahren mit der Methode der Baumusterprüfung würde weitere Messungen erfordern.

Eine Einzelfrequenzmessung kann Aussagen über den PAR-Wert des Gehörschützers liefern. Allerdings ist die am besten geeignete Frequenz vom jeweiligen Produkt abhängig und es ist zu diskutieren, wie verlässlich die punktuelle Messung für die subjektiven Verfahren (z.B. Audiometer) sein kann. Werden mehrere Frequenzen gemessen, können Fehlmessungen bei einer Frequenz leichter identifiziert und korrigiert werden.

Der direkte Vergleich der beiden untersuchten Audiometer zeigt, dass für diese Systeme noch Forschungsbedarf besteht. Solche audiometrischen Messungen würden hauptsächlich im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge durchgeführt, d. h. von medizinischem Personal. Daher sollte sichergestellt sein, dass die Ergebnisse unabhängig vom Gerätetyp und der Erfahrung des Bedieners mit Gehörschutz zuverlässig sind.

## Ausblick

Das Thema der individuellen Schalldämmungsmessung im Bereich des Arbeitsschutzes wird momentan von verschiedenen Gruppen weltweit untersucht [5][8]. Darüber hinaus gibt es ältere Studien, insbesondere aus den USA [11], die sich mit dem Einsatz von audiometrischen Messsystemen befassen. Um aus Sicht des Arbeitsschutzes belastbare Aussagen treffen zu können, ist es sicherlich nötig, dass sich die interessierten Institutionen über ihre bisherigen Ergebnisse und Erfahrungen austauschen.

In diese Richtung geht auch ein neues Normungsprojekt des CEN/TC 159, das Anforderungen an Systeme zur individuellen Schalldämmungsermittlung festzuschreiben soll. Die Arbeiten daran sollen noch 2015 beginnen.

## Danksagung

Ich möchte Peter Sickert (BGHM, SG GS) sowie Patrick Dyrba und Thomas Fritsch (beide BGN) danken für die Initiierung der Studie, Durchführung der Messungen, Auswertung und Diskussion.

## Literatur

- [1] DIN ISO 4869-1: Akustik – Gehörschützer – Subjektive Methode zur Messung der Schalldämmung (10/1991). Beuth, Berlin 1991
- [2] Dyrba, P.; Dantscher, S.; Fritsch, T.; Sickert, P.: Vergleich verschiedener Messsysteme zur Ermittlung der individuellen Schalldämmung von Gehörschutzstöpseln. *Lärmbekämpfung* 9 (2014) Nr. 6, S. 255-265
- [3] DIN EN ISO 4869-2: Akustik – Gehörschützer – Teil 2: Abschätzung der beim Tragen von Gehörschützern wirksamen A-bewerteten Schalldruckpegel (08/1995 inkl. Berichtigung 1:2007). Beuth, Berlin 1995
- [4] Trompette, N.; Kusy, A.: Testing of commercially available systems for hearing protector based on individual fit testing. *InterNoise* 13, S. 1398-1407. Innsbruck, Österreich 2013
- [5] Trompette, N.; Kusy, A.; Ducourneau, J.: Suitability of commercial systems for earplug individual fit testing. *Applied Acoustics* 90 (2015), S. 88-94
- [6] Kotarbinska, E.; Rogowski, K.: Real-world performance of earplugs measured by Personal Attenuation Rating. *Forum Acusticum*, Krakau, Polen 2014
- [7] Berger, E.H.: Exploring Procedures for Field Testing the Fit of Earplugs. 1989 Industrial Hearing Conservation Conference, S.7-10, Lexington, Kentucky 1989
- [8] Dantscher, S.: Individual sound attenuation of ear-plugs measured with audiometric methods. *DAGA* 2013, Meran, Italien 2013
- [9] Rudmose, W.: The case of the missing 6 dB. *JASA* 71 (1982) Nr. 3, S. 650-659
- [10] Berger, E.H.; Kerivan, J.E.: Influence of physiological noise and the occlusion effect on the measurement of real-ear attenuation at threshold. *JASA* 74 (1983) Nr. 1, S. 81-94
- [11] Micheal, P.L.; Kerlin, R.L.; Bienvenue, G.R.; Prout, J.H.; Shampian, J.I.: A Real-Ear Field Method for the Measurement of the Noise Attenuation of Insert-Type Hearing Protectors. HEW Publication No. (NIOSH) 76-181, NIOSH, Cincinnati (Ohio) 1976