



Qualität und Langzeitstabilität von Kanalfiltern in Gehörschutz-Otoplastiken

Eine 8-jährige Langzeitstudie -

Impressum

Herausgeber

Berufsgenossenschaft Holz und Metall
Isaac-Fulda-Allee 18
55124 Mainz

Telefon: 0800 9990080-0
Fax: 06131 802-20800
E-Mail: servicehotline@bghm.de
Internet: www.bghm.de

Servicehotline bei Fragen zum Arbeitsschutz: 0800 9990080-2
Medien Online: bestellung@bghm.de

Eine entgeltliche Veräußerung oder andere gewerbliche Nutzung bedarf der schriftlichen Einwilligung der BGHM.

Ausgabe: Februar 2015

Qualität und Langzeitstabilität von Kanalfiltern in Gehörschutz-Otoplastiken

Eine 8-jährige Langzeitstudie

Inhalt

1. Einleitung, Aufgabe und Zielsetzung	8
2. Gehörschutz-Otoplastiken	9
2.1 Herstellung und Anpassung der Gehörschutz-Otoplastiken	9
2.2 Funktionale Prüfung von Filterelementen für Gehörschutz-Otoplastiken	9
2.3 Schalldämmung von Gehörschutz-Otoplastiken.....	10
2.3.1 Gefährdungsermittlung, Risikobewertung.....	10
2.3.2 Fullblock-Otoplastiken	11
2.3.3 Dichtsitz und Filterelemente	11
2.4 Herstellerangaben zur Pflege von Otoplastiken	13
3. Laboruntersuchungen und Feldstudien	15
3.1 Untersuchungsmethoden	15
3.2 Laboruntersuchungen	16
3.3 Feldstudien	16
3.3.1 Vorbereitung	16
3.3.2 Stichproben und Langzeituntersuchung	16
4. Ergebnisse der Laboruntersuchungen und Feldstudien	17
4.1 Untersuchungsumfang	17
4.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	17
4.2.1 Überdruckmethode und SNR-Wert	17
4.2.2 Fertigungstoleranzen	19
4.2.3 Sonstige Auffälligkeiten	21
4.2.4 Reinigung verstopfter Filterelemente	22
4.2.5 Auswirkungen auf die akustischen Eigenschaften.....	23
4.3 Ergebnisse der Feldstudien.....	24
4.3.1 Stichproben	24
4.3.2 Langzeituntersuchung.....	25
4.3.3 Wartung und Pflege - Verstopfte Filterelemente.....	26
5. Diskussion	27

Die Inhalte der Studie wurden mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Daten kann dennoch keine Garantie übernommen werden. Eine Haftung, insbesondere für materielle Schäden oder Konsequenzen, die aus der Nutzung der Zusammenstellung entstehen, ist ausgeschlossen. Sämtliche Inhalte sind urheberrechtlich geschützt. Weiterverbreitung oder Verwendung jeder Art sind ohne vorherige Genehmigung durch den Herausgeber nicht zulässig.

Soweit nicht gesondert gekennzeichnet, sind die Abbildungen nur beispielhafte Darstellungen und die Auswahl stellt keine Bewertung durch die BGHM dar. Die Abbildungen sollen lediglich die Beschreibung visuell unterstützen und erheben keinen Anspruch auf vollständige Darstellung.

In diesem Dokument wird auf eine geschlechtsneutrale Schreibweise geachtet. Wo dies nicht möglich ist, wird zugunsten der besseren Lesbarkeit das ursprüngliche grammatische Geschlecht verwendet. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass damit auch jeweils das andere Geschlecht angesprochen ist.

Zusammenfassung

Bei der Berufsgenossenschaft Holz und Metall¹ wurde in der Zeit von 2006 bis 2014 eine „Studie zur Qualität und Langzeitstabilität von Kanalfiltern in Gehörschutz-Otoplastiken“ durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Studie werden im Folgenden kurz dargestellt.

Akustische Eigenschaften, Fertigungstoleranzen von Filterelementen

Durch mechanische Einwirkungen beim Ein- und Ausbau der Filterelemente sowie durch den Eintrag von Verunreinigungen während der Nutzung und bei der Reinigung werden die akustischen Eigenschaften der Filterelemente zum Teil erheblich verändert. So konnten zum Beispiel bis 1 kHz deutlich höhere Dämmwerte als deklariert festgestellt werden.

In einzelnen Fällen konnten Fertigungstoleranzen mit Auswirkungen von bis zu 3 dB beim SNR- und M-Wert sowie 5 dB beim L-Wert ermittelt werden.

Handhabung und Reinigung, Pflege und Pflegeprodukte für Gehörschutz-Otoplastiken

Auch bei regelmäßigem Säubern und gelegentlichem Reinigen der Gehörschutz-Otoplastik nach Angabe der Herstellfirma kann sich die Durchlässigkeit der Filterelemente bereits nach einem halben Jahr Nutzungsdauer auf 60 % verringern. Die Belüftung des Gehörgangs nimmt ab und die Dämmung der Gehörschutz-Otoplastik nimmt zu.

Selbst mit intensiver Reinigung der Filterelemente können nicht mehr die Ursprungswerte der Durchlässigkeit erreicht werden. Im Mittel wurde nur noch eine Durchlässigkeit von 90 % erzielt.

Die derzeit angebotenen Informationen und Hilfsmittel zur Reinigung von Gehörschutz-Otoplastiken sind weit gefächert. Sie reichen jedoch noch nicht aus, um die Veränderung der mechanischen und akustischen Eigenschaften zu verhindern. Geeignete und umsetzbare Reinigungsstrategien müssen entwickelt und durch die Otoplastik-Herstellfirmen angeboten werden. Die Maßnahmen sind nicht nur durch die Personen, die Gehörschutz-Otoplastiken nutzen, sondern auch durch die Arbeitgeber zu unterstützen.

Schutzwirkung der Gehörschutz-Otoplastik

Für eine nachhaltige und gleichbleibende Schutzwirkung ist die aktive Mitwirkung der Benutzenden bei der Kontrolle der Funktionsfähigkeit sowie die konsequente und fachgerechte Durchführung regelmäßiger funktionaler Prüfungen der Gehörschutz-Otoplastiken und der verbauten Filterelemente unerlässlich. Gemäß TRLV² Lärm, Teil 3, Abschnitt 6.2.3 müssen diese Prüfungen regelmäßig in Abständen von höchstens zwei Jahren erfolgen.

1 Durch die Fusion 2011 sind die Berufsgenossenschaften Süddeutsche Metall-BG, Edel- und Unedel-BG, Norddeutsche Metall-BG, Hütten- und Walzwerks-BG, Maschinen- und Metall-BG und Holz-BG in die Berufsgenossenschaft Holz und Metall übergegangen.

2 TRLV = Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

1. Einleitung, Aufgabe und Zielsetzung

Gehörschutz-Otoplastiken für Beschäftigte an Lärmarbeitsplätzen werden überwiegend mit Kanalfiltern ausgestattet. In der einfachsten Form bestehen diese aus kleinen Kunststoff-Röhrchen. Filterelemente in Gehörschutz-Otoplastiken dienen jedoch nicht nur dem Einstellen der gewünschten Schalldämmung, sondern auch der „Belüftung des Gehörgangs“, also des Raums zwischen Otoplastik und Trommelfell.

Bei einer Befragung von 75 Beschäftigten, die ihre Gehörschutz-Otoplastik nicht weitertragen, wurden als Hauptgründe der hohe Hygiene- und Reinigungsaufwand sowie das häufige Verstopfen der Filterelemente angegeben.³

Im Rahmen der hier beschriebenen Langzeitstudie wurden nur Gehörschutz-Otoplastiken mit Kanalfiltern untersucht. Es sollte geklärt werden, ob:

- die verbauten Filterelemente gleichbleibende akustische Eigenschaften aufweisen
- sich Fertigungstoleranzen der Filterelemente auf den individuellen Schutz auswirken
- die Handhabung und Reinigung der Gehörschutz-Otoplastik mittel- oder langfristig zu Veränderungen an den Filterelementen führen
- Anleitungen zur Pflege und Empfehlungen für Pflegeprodukte durch die Herstellfirmen auch ausreichend für den Erhalt der mechanischen und akustischen Eigenschaften der Gehörschutz-Otoplastiken sind

³ Weiß, R., Unveröffentlicht, Anonyme Befragung von 75 Beschäftigten, die ihre Gehörschutz-Otoplastik nicht weitertragen (2006)

2. Gehörschutz-Otoplastiken

2.1 Herstellung und Anpassung der Gehörschutz-Otoplastiken

Herstellungsverfahren

Die untersuchten Gehörschutz-Otoplastiken wurden überwiegend nach dem traditionellen PNP-Verfahren⁴ angefertigt. Als Werkstoff für die Gehörschutz-Otoplastiken wurde entweder Silikon (weiche Otoplastik) oder Acrylat (harte Otoplastik) benutzt.

Nur wenige (ca. 5 %) der untersuchten Gehörschutz-Otoplastiken waren nach einem computergestützten Rapid Prototyping Verfahren gefertigt. Zur Herstellung der endgültigen Otoplastik wurden dabei die Verfahren Laser-Sintern, Laser-Stereolithografie oder 3D-Printing eingesetzt.

Anpassung der Otoplastiken

Gehörschutz-Otoplastiken können hohe Schalldämmwerte erreichen. Zur Anpassung der Gehörschutz-Otoplastiken an den jeweiligen Tages-Lärmexpositionspegel werden die Gehörschutz-Otoplastiken durchbohrt und die Bohrung durch geeignete Filterelemente wieder verschlossen.

Hierzu stehen Filterelemente in unterschiedlichen Bauformen zur Verfügung. Bei der traditionell und bei der nach einem Rapid Prototyping Verfahren gefertigten Gehörschutz-Otoplastik können die gleichen Filterelemente eingesetzt werden.

2.2 Funktionale Prüfung von Filterelementen für Gehörschutz-Otoplastiken

Funktionale Prüfung⁵

Es sind verschiedene Verfahren zur funktionalen Prüfung von im Ohr befindlichen Gehörschutz-Otoplastiken bekannt.⁶ Bei der funktionalen Prüfung kann sowohl die Dichtigkeit der Gehörschutz-Otoplastik gegenüber der Ohrmulde bzw. dem Gehörgang als auch die „Schalldämmung“⁷ der Gehörschutz-Otoplastik bestimmt werden. Eine Kontrolle des Filterelements ist bei dieser funktionalen Prüfung jedoch in den meisten Fällen nicht vorgesehen oder durchführbar.

Im Folgenden werden drei Verfahren der funktionalen Prüfung erläutert:

REAT-Verfahren⁸

Bei den audiometrischen Verfahren werden die Hörschwellen ohne und mit eingesetzte(r) Gehörschutz-Otoplastik bestimmt. Dabei werden bis zu acht Prüfsignale⁹ benutzt. Aus der Differenz der beiden Hörschwellen wird die Dichtigkeit in der Ohrmulde bzw. dem Gehörgang oder die Dämmwirkung abgeschätzt, wobei tiefe Frequenzen eine Aussage zur Dichtigkeit, hohe Frequenzen eine Aussage zur Dämmung liefern.

Bei der Hörschwellenbestimmung mit eingesetzter Gehörschutz-Otoplastik verbleibt in der überwiegenden Zahl der Fälle das Filterelement in der Otoplastik. Hierbei wird nicht die Dämmung der Otoplastik sondern die resultierende Dämmung aus Undichtigkeit der Otoplastik und Dämmung des Filterelementes bestimmt. Derzeit schreibt lediglich eine Herstellfirma das Verschließen der Filterelemente bei der Funktionskontrolle vor. Eine Funktionskontrolle der Filterelemente ist dann theoretisch bei Kontrolle mit „geöffneten“ Filterelementen möglich.

MIRE-Verfahren¹⁰

Bei den meisten MIRE-Verfahren wird nach Entfernen des akustischen Filters ein Schlauch mit entsprechendem Adapter in die Bohrung der Gehörschutz-Otoplastik gesteckt. Eine Kontrolle des Filterelements ist somit nicht möglich.

4 PNP-Verfahren = Traditionelles Herstellungsverfahren, Positiv-Negativ-Positiv-Verfahren. Die Einzelschritte bis zur fertiggestellten Gehörschutz-Otoplastik erfordern ein hohes handwerkliches Geschick.

5 Die Funktionsprüfung (nach TRLV Lärm) umfasst allerdings nicht die Prüfung der Funktion des Filterelements.

6 Weiß, R., Studie zur Schutzwirkung von Gehörschutz-Otoplastiken, Herstellung, Wartung sowie Marktrecherche und Feldstudie zur funktionalen Prüfung von Otoplastiken, BGMS-Präventionsbericht 2/2006

7 Hinweis: Die mittels funktionaler Prüfung bestimmte „Schalldämmung“ wird meist als Einzahlwert angegeben. Auch bei frequenzabhängigen Messungen liefern die verwendeten Messverfahren meist nicht die gleichen Werte für die Schalldämmung wie sie bei der Baumusterprüfung ermittelt wurden.

8 REAT = Real Ear Attenuation at Threshold

9 Die Prüfsignale bei der Baumusterprüfung müssen aus Terzrauschbändern bestehen, die aus rosa Rauschen durch Terzfilterung mit den Mittelfrequenzen: 63 Hz (wahlweise), 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz gewonnen werden (DIN ISO 4869-1). Bei der audiometrischen Prüfung können abweichende Prüfsignale benutzt werden, z. B. Sinustöne statt Terzrauschen.

10 MIRE = Microphon In Real Ear

Am offenen Schlauchende wird ein Mess-Mikrofon angeschlossen. Ein zweites Mess-Mikrofon wird in der Nähe der in das Ohr eingesetzten Gehörschutz-Otoplastik platziert. Aus der hierbei gemessenen Pegeldifferenz zwischen beiden Mikrofonen wird die „Schalldämmung“ der Gehörschutz-Otoplastik abgeschätzt. Die Werte der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen korrelieren¹¹ mit der Dichtigkeit der Gehörschutz-Otoplastik gegenüber der Ohrmulde bzw. dem Gehörgang.

Überdruck-Verfahren (manuell, PC-gesteuert)

Bei der „Prüfung mittels Überdruck-Verfahren“ kann überwiegend nur die Dichtigkeit der Gehörschutz-Otoplastik gegenüber der Ohrmulde bzw. dem Gehörgang bestimmt werden. Zur einfachen und schnellen Prüfung wird zwischen Gehörschutz-Otoplastik und Trommelfell ein geringer Überdruck von bis zu 30 mbar manuell oder automatisch aufgebaut. Bleibt der Überdruck über eine größere Zeitdauer konstant, ist die Dichtigkeit gegeben. In der praktischen Anwendung wird der Druckverlauf meist bis zu 5 s beobachtet.¹² Bei einer Undichtigkeit der Gehörschutz-Otoplastik fällt der erzeugte Überdruck mehr oder weniger rasch ab. Bei sehr undichten Otoplastiken kann kein Überdruck aufgebaut werden.

Bei Gehörschutz-Otoplastiken ohne Servicebohrung wird der Überdruck überwiegend durch das Filterelement aufgebaut. Das Filterelement stellt einen Strömungswiderstand dar und beeinflusst den Druckausgleich. Der Überdruck kann maximal so schnell abgebaut werden, wie die Luft durch das Filterelement strömen kann.

Bei verschmutzten oder teilweise verstopften Filterelementen wird für den Druckausgleich mehr Zeit benötigt. Bei verstopften Filterelementen findet kein Druckausgleich statt. In beiden Fällen wird ein besserer Dichtsitz der Otoplastik in der Ohrmulde bzw. dem Gehörgang vorgetäuscht und die Dämmwirkung der Gehörschutz-Otoplastik wird falsch beurteilt.

Überprüfung der Filterelemente

Wird die Gehörschutz-Otoplastik nicht in die Ohrmulde bzw. in den Gehörgang eingesetzt, kann die Luft direkt durch das Filterelement entweichen. Ein Filter mit hoher Schalldämmung besitzt einen hohen Strömungswiderstand, der Überdruck wird durch das Filterelement deshalb langsam abgebaut. Bereits geringfügige geometrische Änderungen wirken sich auf den Strömungswiderstand des Filterelements und damit auf den zeitlichen Verlauf des Druckabbaus aus.

Aus dem zeitlichen Verlauf des Drucks kann eine Kenngröße „Druckabfall pro Zeit“ oder auch „Leckrate“ als Einzahlwert berechnet werden. Die Angabe erfolgt in der Maßeinheit mmWS/s bzw. mbar/s.¹³ Wird diese Kenngröße an neuen unbenutzten Filterelementen unter definierten Bedingungen¹⁴ ermittelt, kann sie als Referenzwert für intakte Filterelemente benutzt werden. Bei beschädigten oder verstopften Filterelementen weicht diese selbst definierte Kenngröße vom Referenzwert ab.

2.3 Schalldämmung von Gehörschutz-Otoplastiken

2.3.1 Gefährdungsermittlung, Risikobewertung

Entsprechend § 8 Abs. 2 LärmVibrationsArbSchV¹⁵ ist der Gehörschutz vom Arbeitgeber so auszuwählen, dass durch seine Anwendung eine Gefährdung des Gehörs vermieden oder auf ein Minimum verringert wird. Dabei muss unter Einbeziehung der dämmenden Wirkung des Gehörschutzes sichergestellt werden, dass der auf das Gehör des Beschäftigten einwirkende Lärm die maximal zulässigen Expositionswerte $L'_{EX,8h} = 85$ dB(A) beziehungsweise $L'_{pC,peak} = 137$ dB(C) nicht überschreitet. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Dämmwirkung des Gehörschutzes, die von dem für die jeweilige Tätigkeit ermittelten Tages-Lärmexpositionspegel und dem Spitzenschalldruckpegel abhängen.

Die Einhaltung des Tages-Lärmexpositionspegels $L'_{EX,8h}$ und des Spitzenschalldruckpegels $L'_{pC,peak}$ kann mit den Dämmwerten aus der Baumusterprüfung abgeschätzt werden.¹⁶

In der Praxis werden die im Laborverfahren ermittelten Dämmwerte aus unterschiedlichen Gründen nicht erreicht. Auch für Gehörschutz-Otoplastiken wurde ein Wert für den Praxisabschlag in Höhe von 3 dB ermittelt, der vom herstellerseitig angegebenen Dämmwert abzuziehen ist. Welchen Einfluss die einzelnen Komponenten einer Gehörschutz-Otoplastik haben, wurde dabei jedoch nicht näher untersucht.¹⁷

11 Bei nachlassender Dichtigkeit nimmt die Schalldämmung zuerst bei den tiefen Frequenzen ab.

12 Von einigen Otoplastik-Herstellern wird ein maximaler Druckverlust von 20 % für eine ausreichende Dichtigkeit akzeptiert. In der Praxis werden jedoch auch deutlich größere Druckverluste hingenommen. Die Entscheidungskriterien definiert die Otoplastik-Herstellern selbst.

13 Maßeinheiten: mmWS auch mmH₂O, 1 mmWS entspricht 0,0980638 mbar. mmWS/s = Millimeter Wassersäule pro Sekunde bzw. mbar/s = Millibar pro Sekunde

14 Die Zeitdauer für den Druckausgleich ist u. a. vom Ausgangsdruck und der Größe der Druckdifferenz abhängig.

15 LärmVibrationsArbSchV = Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung

16 Allgemeine Präventionsleitlinie Gehörschutz – Auswahl, Bereitstellung und Benutzung, Fachausschuss „Persönliche Schutzausrüstungen“ der DGUV (2009)

17 BGIA-Report 4/2009, Schalldämmung von Gehörschützern in der betrieblichen Praxis – Studie von 2005 bis 2007

2.3.2 Fullblock-Otoplastiken

Gehörschutz-Otoplastiken ohne Bohrung für ein Filterelement, sogenannte „Fullblock“-Otoplastiken, erreichen sehr hohe Schalldämmwerte in allen Frequenzbereichen. Im tieffrequenten Bereich bis zu 35 dB und im hochfrequenten Bereich bis zu 42 dB.¹⁸

Die derzeit höchste Schalldämmung von Gehörschutz-Otoplastiken liegt bei einem SNR-Wert von 35 dB (H-Wert: 34 dB, M-Wert: 32 dB, L-Wert: 31 dB). Aus dem M-Wert in Höhe von 32 dB resultiert nach IFA-Angaben eine Einsatzgrenze für hoch- und mittelfrequente Geräusche von 114 dB(A).

2.3.3 Dichtsitz und Filterelemente

Nur bei dicht sitzender Gehörschutz-Otoplastik wird die Schalldämmung allein vom eingesetzten Filterelement bestimmt. Zur Einstellung der Schalldämmung werden verschiedene zum Teil aufwändig konstruierte und aufgebaute Filterelemente eingesetzt. Marktgängig sind Kanal- und Membranfilter sowie Filter in Form einstellbarer Ventile.

Kanalfilter

Die mechanisch einfachste Form bilden die Kanalfilter. Diese bestehen aus einem kleinen Kunststoff-, Keramik- oder Metallröhrchen mit einer meist zylindrischen Bohrung. **Abbildung 1** zeigt verschiedene Beispiele von Kanalfiltern.

Bei gleichem Innendurchmesser des Röhrchens werden unterschiedliche Schalldämmungen durch verschiedene Längen realisiert. Mit kurzen Röhrchen erzielt man niedrige Schalldämmwerte. Mit zunehmender Länge steigen die Schalldämmwerte. Die Länge der Röhrchen ist durch die individuelle Gehörganggeometrie begrenzt. Kanalfilter mit einer Länge von über 10 mm sind eher die Ausnahme.

Bei gleicher Länge kann die Schalldämmung durch die Verringerung des Innendurchmessers des Röhrchens gesteigert werden. Dabei sind Röhrchen mit großem Innendurchmesser deutlich einfacher herzustellen als die mit kleinem Innendurchmesser. Um den Querschnitt kleiner Bohrungsdurchmesser weiter zu verringern, werden Drähte in die Bohrungen gesteckt.

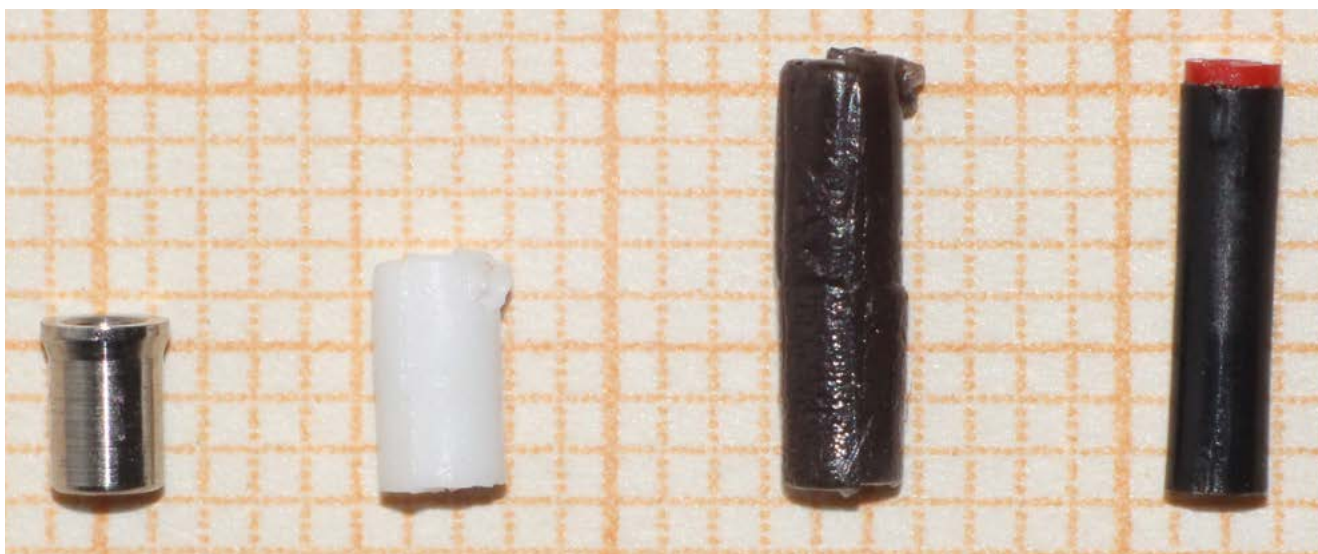


Abbildung 1: Beispiele von Kanalfiltern, von links nach rechts: Filterelement aus Edelstahl, niedrig dämmendes Kunststofffilter, hoch dämmendes Kunststofffilter, hoch dämmendes Kunststofffilter mit eingestecktem Draht

Weicht man von der zylindrischen Bohrung in den Kanalfiltern ab, kann der Frequenzgang des Filters verändert werden. Aufwändige Konstruktionen beinhalten neben kontinuierlichen Querschnittsänderungen noch Querschnittssprünge zur Formung des Frequenzgangs (Beispiel siehe **Abbildung 2**).

Hoch dämmende Kanalfilter verfügen über eine nahezu frequenzunabhängige Dämmung. Mit abnehmenden Dämmwerten nimmt die Frequenzabhängigkeit der Dämmung zu. Extrem flach dämmende Otoplastiken¹⁹ mit Kanalfiltern sind ab SNR-Werten von 25 dB erhältlich, unterhalb von 25 dB muss derzeit auf Membranfilter ausgewichen werden.

18 IFA-Positivliste, Alle dem IFA gemeldeten Gehörschützer mit EG-Baumusterprüfbescheinigung, IFA der DGUV, Stand: 21.05.2013

19 Steigung des Mittelwerts der frequenzabhängigen Dämmung ≤ 2 dB/Oktav, IFA-Kennzeichnung „X“

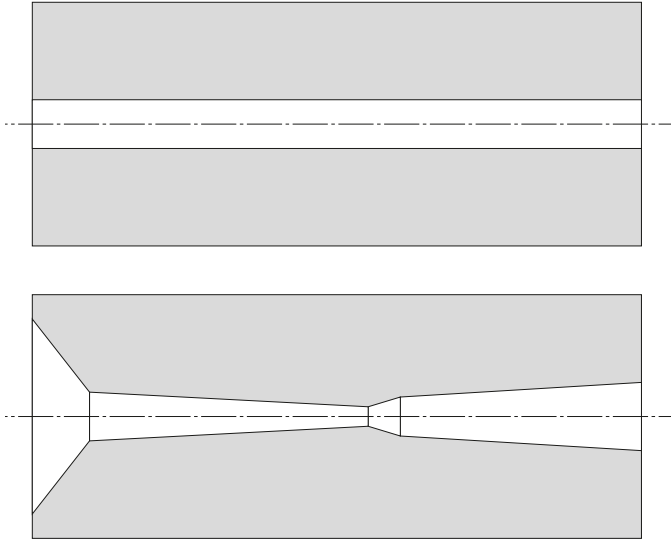


Abbildung 2: Konstruktionsbeispiele von Kanalfiltern:
 Oben: mit zylindrischer Bohrung
 Unten: mit Querschnittsänderungen zur Formung
 des Frequenzgangs.

Membranfilter

Die Gehörschutz-Otoplastiken mit den derzeit niedrigsten Dämmwerten, SNR-Wert 15 dB bzw. 9 dB, sind mit Membranfiltern ausgestattet. Membranfilter zeichnen sich durch eine nahezu frequenzunabhängige Dämmung aus. Die Filterelemente sind mit einer luftdurchlässigen oder luftundurchlässigen Membran bestückt. Zur Linearisierung des Frequenzganges sind zusätzlich unterschiedlich große Hohlräume enthalten. Diese dienen als Resonatoren für einzelne Frequenzen bzw. Frequenzbereiche.

Membranfilter haben mit ca. 10 mm einen bis zu 5-mal größeren Durchmesser als Kanalfilter (Durchmesser ca. 2 mm). Der Durchmesser kleiner Membranfilter (ca. 6 mm) entspricht in etwa dem von Filterelementen mit einstellbarem Ventil. Damit der Frequenzgang bei Membranfiltern nicht nachteilig beeinflusst wird, müssen die Bohrungen der Schallkanäle mit großen Durchmessern in die Otoplastik eingebracht werden. Deshalb ist bei sehr engen Gehörgängen der Einsatz von Membranfiltern nicht möglich. In **Abbildung 3** sind zwei Ausführungen von Membranfiltern dargestellt. Oben sind die von außen sichtbaren Teile und unten die zum Gehörgang zeigenden Teile zu sehen.



Abbildung 3: Beispiele von Membranfiltern:
 Links: DM-Filter von Dynamic Ear Company
 Rechts: ER-15-Filter von Etymotic Research
 Oben: von außen sichtbarer Teil des Filters
 Unten: zum Gehörgang zeigender Teil

Einstellbare Ventile, Schraubventile als Filter

Die Schraubventile bestehen aus einem Grundkörper aus Kunststoff. Der Grundkörper ist mit einer kegelförmigen zulaufenden Bohrung und einem Innengewinde versehen. Die Schraube läuft passend zum Grundkörper kegelförmig aus und ist am Kopfende mit Bohrungen versehen, die als Schallöffnungen dienen (s. **Abbildung 4**).

Wird die Schraube ganz in den Kegelsitz des Grundkörpers geschraubt, ist das Schallventil luftdicht verschlossen und die maximale Schalldämmung eingestellt. Eine geringe Frequenzabhängigkeit der Schalldämmung zeigt sich erst bei fast oder ganz geschlossenem Ventil. Der Ringspalt des Schallventils kann durch die Schraube mehr oder weniger weit geöffnet werden. Mit zunehmendem Ringspalt nimmt die Schalldämmung ab (Herausdrehen der Schraube) und die Frequenzabhängigkeit der Dämmung zu.

Bei der Baumusterprüfung werden bei drei oder vier unterschiedlichen Einstellungen des Ventils die Mittelwerte der Schalldämmung und die Standardabweichungen bestimmt.

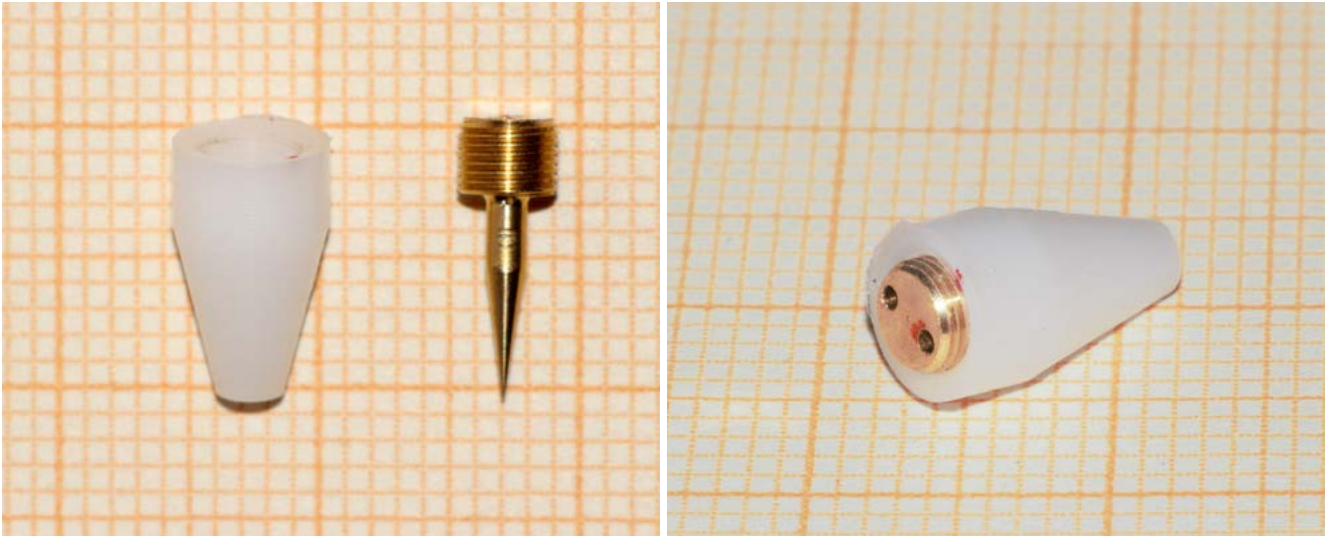


Abbildung 4: Schraubventil als Filterelement. Links: Grundkörper und Schraube; rechts: Grundkörper mit eingesetzter Schraube

2.4 Herstellerangaben zur Pflege von Otoplastiken

Die nachstehenden Angaben der Herstellfirmen wurden in alphabetischer Reihenfolge der Namen der Otoplastikherstellfirmen aufgelistet. Sie geben eine Sammlung von Hersteller-Zitaten zur Pflege und Reinigung von Gehörschutz-Otoplastiken aus z. B. Benutzerinformationen und Internetdarstellungen wieder. Angaben zum Filterelement sind unterstrichen. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellt keine Wertung durch die Berufsgenossenschaft Holz und Metall dar.

Api-Pro Sante²⁰: „Einfache Pflege Alle Bestandteile des Lärmschutzes können täglich mit milder Seife und Wasser gereinigt werden. Eine regelmäßige Säuberung ist dringend empfohlen“.

Cotral²¹: „Hygiene für eine 100%ige Wirksamkeit und Sicherheit Eine regelmäßige Reinigung der Gehörschützer gewährleistet die Funktion des akustischen Filters und folglich auch der Kommunikation: Die Verwendung der CLEANIL-Reinigungstücher gewährleistet die tägliche Pflege der Gehörschützer und verringert die Gefahr der Hautreizung. Die CLEANIL-Reinigungstabletten lösen Unreinheiten auf, die sich im Innern des Akustikkanals abgesetzt haben. Die Reinigung der angepassten Gehörschützer ist wesentlich, um sie während der gesamten Lärmexposition optimal zu nutzen und die Effizienz des akustischen Filters aufrechtzuerhalten. Aufrechterhaltung der Effizienz des akustischen Filters: Reinigung des Röhrchens mit der Pumpe. Die Gehörschützer verschmutzen beim täglichen Tragen: Es dringt Staub ein, es lagert sich Ohrenschmalz ab usw. Diese Elemente setzen sich auf dem Gehörschutz, aber vor allem auch im Akustikkanal und im Filter, ab. Die Gehörschützer sind regelmäßig zu reinigen, um Tragekomfort und Effizienz des akustischen Filters aufrecht zu erhalten und durch Wahrung der Verständigungsmöglichkeit eine zu starke Isolierung zu vermeiden“.

InEar²²: „Freshear-Basic-Reinigungsset: Durch eine sorgfältige Pflege zu Hause können Sie wesentlich zur Langlebigkeit Ihrer Produkte beitragen. Durch Verwendung neuester Technologien und durch Entwicklung neuer Rezepturen entsprechen diese Produkte allen geforderten Gesundheits- und Umweltstandards. Reinigungstücher sind problemlos anzuwenden. Gründlich gereinigte Ohrstücke (Otoplastiken), InEar-Monitore sowie Gehörschutz verringern das Risiko von Hautirritationen und Fehlfunktionen der sensiblen Technik. Freshear-Reinigungs-Tücher wurden speziell zur effektiven Beseitigung von Verunreinigungen an Ihrem Hörsystem entwickelt. Reinigungsdose und Reinigungstabletten sind speziell für die Reinigung von unseren Ohrstücken und Gehörschutz entwickelt worden. Sie enthalten Reinigungsstoffe und antiseptische Komponenten, die aktiven Sauerstoff abgeben. Der Airball dient zum trockenen Auspusten von Hörkanälen bei Gehörschutz oder Hörgeräten.

Optional: Freshear-Reinigungs-Spray zur Entfernung von Verunreinigungen wie Cerumen, Hautschweiß oder Umweltablagerungen. Es beugt bei regelmäßiger Anwendung Hautirritationen und Infektionen vor. Sprühen Sie etwas Reinigungsflüssigkeit auf ein weiches, fusselfreies Tuch und reiben Sie Ihre InEar-Monitore vorsichtig damit ab. Die Reinigungsflüssigkeit löst Ver-

20 <http://api-pro-sante.com/v3/silent5/?lang=de> (2014)

21 <http://www.cotral.com/pdf/Wartung-Pflege-Gehoerschutz.pdf> (07/2014)

22 <http://www.inear-arbeitsschutz.eu/de/produkte/pflegeprodukte/arbeitsschutz-pflege.htm> (2014)

schmutzungen und wirkt gleichzeitig antibakteriell. Achten Sie darauf, dass Ihre InEar-Monitore und Gehörschützer nicht zu nass werden. So vermeiden Sie, dass Flüssigkeit ins Innere eindringt und die empfindliche Technik beschädigt“.

Infield-Safety²³: „*Pflege*: Der INFIELD Gehörschutz sollte regelmäßig mit einem leicht feuchten Tuch gereinigt werden. Die Phonor® Variante kann unter fließendem Wasser abgespült und der Filter ausgeblasen werden. Der ER Music und der ER Work sollten nur mit einem feuchten Tuch abgewischt werden. Dabei darf der ER-Filter keinesfalls nass oder verschmutzt werden, da so die Membran zerstört wird und der Gehörschutz nicht mehr die vorgegebenen Eigenschaften erfüllt. Nach Gebrauch und Reinigung bewahren Sie den Gehörschutz im mitgelieferten Etui auf. Die beigelegte Oto-fresh-Creme kann bei extrem trockener Haut im Gehörgang dünn auf den Gehörschutz aufgetragen werden. Mit dem Reinigungsstift kann der Schallkanal gereinigt werden. *Wartung*: Der Gehörschutz sollte in regelmäßigen Abständen auf Sitz und Passform überprüft werden“.

Variphone Benelux²⁴: *Wie warten Sie Ihren Gehörschutz?* Durch korrekte Wartung kann die Lebensdauer Ihres Gehörschutzes erheblich verlängert werden. - Bewahren Sie Ihren Gehörschutz sorgfältig in dem dafür vorgesehenen Etui auf. - Reinigen Sie den Gehörschutz nach jedem Gebrauch mit dem mitgelieferten Tuch. - Sie können den Gehörschutz auch mit lauwarmem Wasser reinigen. In diesem Fall ist es das Beste, wenn Sie vor der Reinigung das Filtermodul entfernen. Lassen Sie den Gehörschutz kurz trocknen, bevor Sie das Filtermodul zurückplatzieren. - Wenn der Schallkanal mit Ohrenschmalz verstopft ist, benutzen Sie zuerst das mitgelieferte Ohrenschmalzhäkchen, um den Ohrenschmalz zu entfernen. Verwenden Sie niemals einen anderen Gegenstand, um den Ohrenschmalz zu entfernen“.

23 http://www.infield-safety.de/Gehoerschutz/bilddaten/downloads/anleitung_2014.pdf

24 http://www.variphone.nl/img/Gebruiksaanwijzingen%20VP/MEP2G_handleiding.pdf

3. Laboruntersuchungen und Feldstudien

3.1 Untersuchungsmethoden

Funktionsprüfung der Filterelemente für Gehörschutz-Otoplastiken mittels Überdruck

Die Druckmessung an den Filterelementen wurde zu Beginn der Studie mit einem einfachen flüssigkeitsgefüllten W-Rohr-Manometer durchgeführt. Zur Bestimmung der Durchlässigkeit²⁵ der Filterelemente wurde die Zeitdauer bestimmt, die für einen Druckabfall von 15 mmWS²⁶ benötigt wurde. Im weiteren Studienverlauf wurde anstelle des Flüssigkeitsmanometers ein elektronisches Druckmessgerät mit PC-gestützter Aufzeichnung und Auswertung des zeitlichen Druckverlaufs eingesetzt (s. **Abbildung 5**).

Mittels Kalibriermessungen wurde die Übertragbarkeit der Messergebnisse mit dem Flüssigkeitsmanometer und der elektronischen Druckmessung sichergestellt. Somit können alternativ die Messergebnisse eines Messverfahrens in das jeweils andere umgerechnet werden.

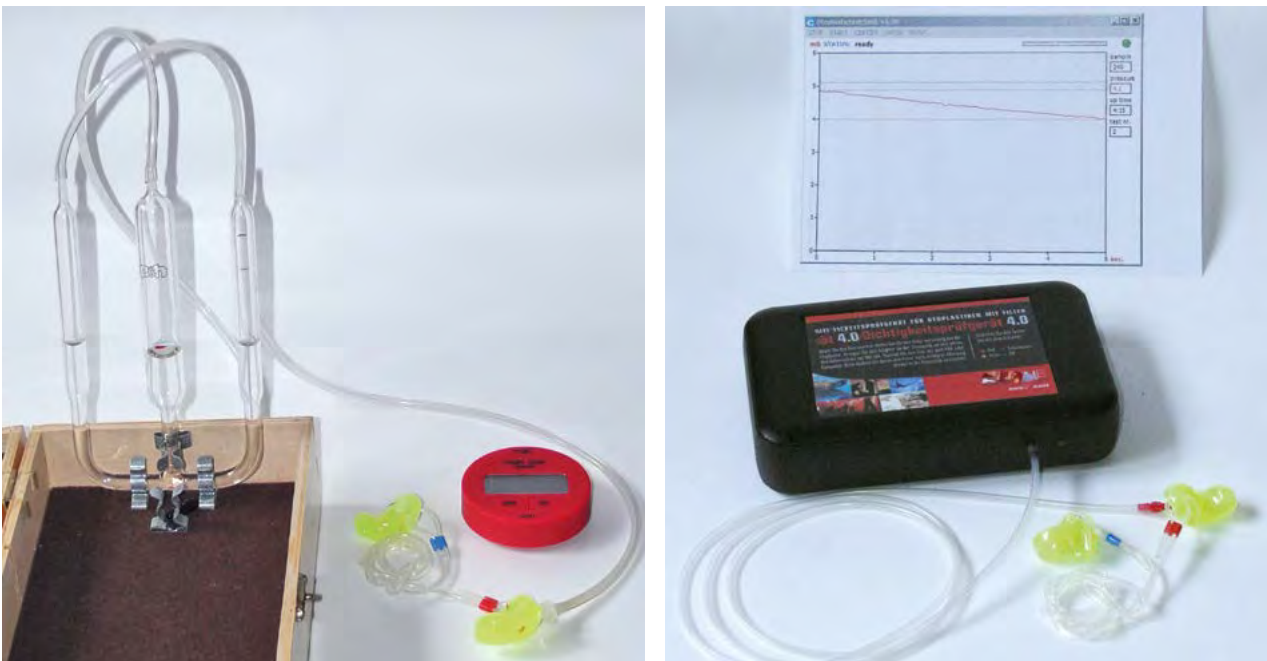


Abbildung 5: Überdruckverfahren. Links: Flüssigkeitsgefülltes W-Rohr-Manometer „Leckprüfgerät RUBO-Akustomat“; rechts: PC-gestützter Dichtigkeitsprüfer 4.0 mit USB-Schnittstelle

Die Erstprüfung der Filterelemente erfolgte soweit möglich zusammen mit der Otoplastik-Herstellfirma bei der Auslieferung der Gehörschutz-Otoplastiken. Während der Studiendauer wurden bei einem Teil der Otoplastiken wiederholt die Filterelemente einer funktionalen Prüfung unterzogen. Die Wiederholungsprüfungen nach der Überdruck-Methode wurden von Beschäftigten der Berufsgenossenschaft Holz und Metall durchgeführt.²⁷

Akustische Messungen an Filterelementen

Für die akustischen Messungen im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden Ohrsimulatoren und das EarFit-Messsystem²⁸ benutzt. Beim EarFit-Messsystem werden üblicherweise präparierte Gehörschutz-Stöpsel verwendet. Die in den Gehörschutz-Stöpsel eingebrachten Schläuche verändern die Übertragungsfunktion des daran angesteckten Mikrofons. Für die Brauchbarkeit der Messergebnisse ist insbesondere die Korrektur der Übertragungsfunktion des Mikrofons erforderlich. Die Übertragungsfunktion wird maßgeblich durch die Länge und den Innendurchmesser der verwendeten Sondenschläuche bestimmt. Die Korrektur wird von der Betriebssoftware des EarFit-Messsystems durchgeführt.

Für die Messung an Gehörschutz-Otoplastiken wurden diese entsprechend modifiziert. Aus Probestöpseln wurden Sondenschläuche herauspräpariert und in die Gehörschutz-Otoplastiken und Messadapter eingesetzt (siehe **Abbildung 6**).

25 Jedes Filterelement setzt der durchströmenden Luft einen „Strömungs“-Widerstand entgegen. Je höher der Strömungswiderstand ausfällt, desto geringer ist die Durchlässigkeit.

26 mmWS auch mmH₂O = Millimeter Wassersäule

27 Die Funktionsprüfung wurde zur Kontrolle der in die Gehörschutz-Otoplastik eingesetzten Filterelemente durchgeführt.

28 3M E-A-Rfit Validation System, objektives f-Mire Messsystem mit Lautsprecherbeschallung

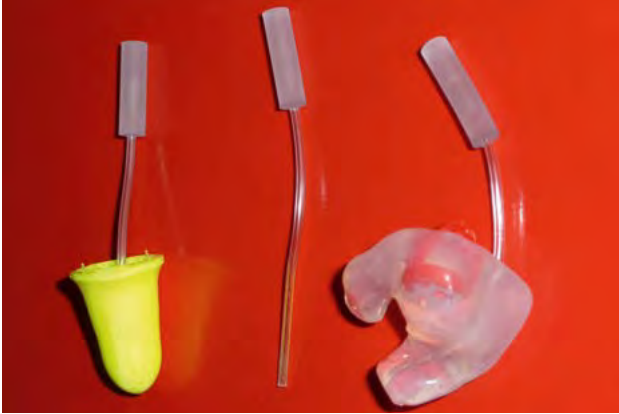


Abbildung 6: Links: EARfit Test-Stöpsel
Mitte: Sondenschlauch
Rechts: modifizierte Gehörschutz-Otoplastik

3.2 Laboruntersuchungen

Die mechanischen und akustischen Eigenschaften von Kanalfiltern wurden untersucht. Hierzu wurden die zuvor beschriebenen Verfahren eingesetzt.

Die Laboruntersuchungen wurden an neuen unbenutzten Filterelementen durchgeführt. Hierzu wurden von den Otoplastik-Herstellfirmen zur Verfügung gestellte Filterelemente untersucht – bis zu zwölf pro Modell.

Veränderungen an Kanalfiltern wirkten sich deutlich auf den zeitlichen Verlauf des Druckabbaus aus. Produktionsstreuungen innerhalb einer Charge, Veränderungen von Charge zu Charge oder Fertigungsprobleme lassen sich gut feststellen und dokumentieren. Deshalb wurden die Filterelemente immer zuerst mit einem Verfahren der Überdruck-Methode untersucht. Erst bei Auffälligkeiten wurden weitere Untersuchungen mit akustischen Verfahren vorgenommen.

Im Rahmen der Studie wurde auch der Einfluss der Reinigung auf Gehörschutz-Otoplastiken und Filterelemente untersucht.

3.3 Feldstudien

3.3.1 Vorbereitung

Von den am deutschen Markt vertretenen Otoplastik-Herstellfirmen wurden Referenzkunden – Unternehmen, bei denen mehr als 20 Gehörschutz-Otoplastiken eingesetzt werden – erfragt. Nach Ermittlung des für die Unternehmen zuständigen Unfallversicherungsträgers wurde Kontakt mit der zuständigen Aufsichtsperson aufgenommen und die weiteren Aktivitäten wurden in Abstimmung mit ihr vorgenommen.

Bei den ersten Gesprächen mit Unternehmern, Betriebsleitung und Sicherheitsfachkräften wurde festgelegt, ob stichprobenartige oder langfristig angelegte Untersuchungen durchgeführt werden können. Soweit vorhanden und möglich wurden Betriebsräte sowie Betriebsärztinnen und -ärzte in die Gespräche und Untersuchungen einbezogen. Für Langzeituntersuchungen wurden zusätzlich noch Beschäftigte der Berufsgenossenschaft Holz und Metall mit Gehörschutz-Otoplastiken ausgestattet. Die Otoplastik-Herstellfirmen waren an den Feldstudien in den einzelnen Mitgliedsunternehmen der Berufsgenossenschaft nicht direkt beteiligt.

Zur Bestimmung von Referenzwerten wurden neue, unbenutzte Filterelemente von den Otoplastik-Herstellfirmen zur Verfügung gestellt. Teilweise wurden Messungen direkt bei den Otoplastik-Herstellfirmen durchgeführt.

3.3.2 Stichproben und Langzeituntersuchung

Fünf Mitgliedsbetriebe der Berufsgenossenschaft Holz und Metall nahmen an Stichprobenuntersuchungen teil. Dabei wurden $m = 110$ Filterelemente²⁹ von Otoplastiken, die Beschäftigte benutzten, vor Ort überprüft. Wenn möglich wurden verstopfte oder fehlerhafte Filterelemente zeitnah durch die Otoplastik-Herstellfirma ausgetauscht. Teilweise wurden der Berufsgenossenschaft verstopfte Filterelemente für weitere Untersuchungen überlassen.

Bei den Beschäftigten ($n = 62$) von zwei Mitgliedsunternehmen und bei den im Rahmen der Studie ausgestatteten BG-Beschäftigten ($n = 18$) konnten regelmäßige Kontrollmessungen an Filterelementen ($m = 218$) über einen Zeitraum von bis zu sechs Jahren durchgeführt werden.

²⁹ m untersuchte Filterelemente von n Beschäftigten.

4. Ergebnisse der Laboruntersuchungen und Feldstudien

4.1 Untersuchungsumfang

- Befragung: n = 75
- Überdruckmessungen
 - Laboruntersuchung: 30 Filtervarianten von 6 Herstellfirmen
 - Fragestellung: Zusammenhang „Überdruck“ – Dämmwerte Baumusterprüfung
 - Fertigungstoleranzen, sonstige Auffälligkeiten und Reinigung
 - Stichproben: 110 Messungen bei 5 Mitgliedsbetrieben
 - Wiederholungsmessungen im Abstand von 0,2 Jahren (42 Messungen)
 - Langzeituntersuchung: 218 Messungen bei 2 Mitgliedsbetrieben und Beschäftigten der BG
- Überdruck- und akustische Messungen
 - Laboruntersuchung: Messungen zur Fragestellung „Überdruck“ – Dämmwerte
 - Fertigungstoleranzen: 5 Filtervarianten von 1 Herstellfirma, sonstige Auffälligkeiten: 7 Filtervarianten von 1 Herstellfirma und Messungen nach Reinigung
 - Akustische Eigenschaften: 1 Filtervariante von 1 Herstellfirma

4.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

4.2.1 Überdruckmethode und SNR-Wert

Bei der benutzten Überdruckmethode wurde der Druck durch das Filterelement aufgebaut und der zeitliche Verlauf des Druckabfalls beobachtet. Beim Druckauf- und -abbau wirkt das Filterelement wie ein Strömungswiderstand und begrenzt die Geschwindigkeit der Druckänderung.

Hoch dämmende Filter stellen einen großen Strömungswiderstand, niedrig dämmende Filter einen kleinen Strömungswiderstand dar. Daraus folgt, dass bei hoch dämmenden Filtern der Druckausgleich durch das Filterelement länger dauert als bei niedrig dämmenden Filtern. Aus der Druckdifferenz und der Dauer lässt sich der Druckabfall pro Sekunde berechnen. Für verschiedene Filterelemente wurde der Druckabfall pro Sekunde (mbar/s) bestimmt und dem SNR-Wert aus der Baumusterprüfung der jeweiligen Gehörschutz-Otoplastik gegenübergestellt (siehe **Abbildung 7**). Gleichfarbige Symbole stehen für unterschiedlich stark dämmende Filterelemente einer Bauform bzw. Baureihe³⁰ einer Otoplastik-Herstellfirma.

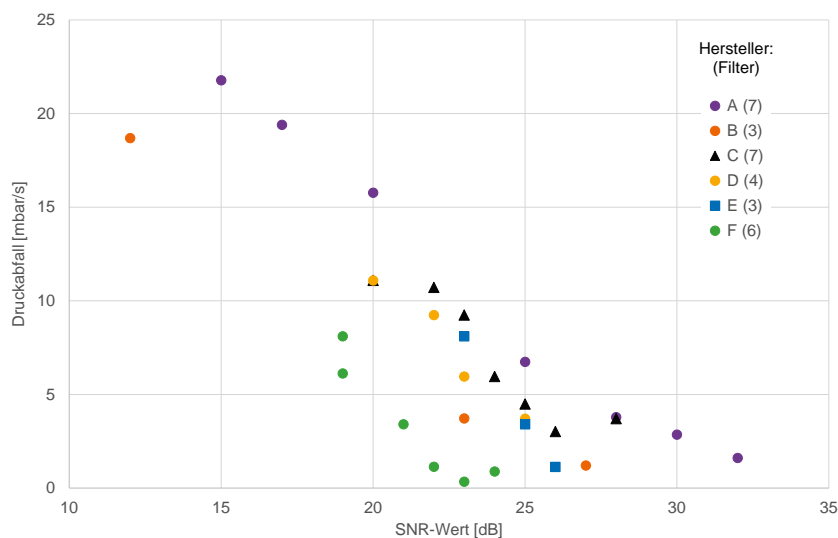


Abbildung 7: Druckabfall pro Sekunde (Mittelwert aus 12 Messungen) in Abhängigkeit vom Dämmwert (SNR-Wert aus der Baumusterprüfung) für unterschiedliche Filterelemente. Gleichfarbige Symbole stehen für Filterelemente einer Herstellfirma. Anm.: Daten von 6 Herstellfirmen [A - F] mit bis zu 7 unterschiedlich stark dämmenden Filterelementen

³⁰ Filterelemente einer Herstellfirma mit z. B. unterschiedlicher Länge aber gleichem Innendurchmesser werden hier einer Bauform bzw. Baureihe zugeordnet.

Mittels Regressionsfunktion wurde die Abhängigkeit zwischen Dämmwerten (63 Hz-Wert, SNR-Wert) und Werten für den Druckabfall bestimmt (siehe **Abbildung 8**). Liegt ein funktionaler Zusammenhang vor, lässt sich ein Korrelationskoeffizient r abschätzen. Anstelle des Korrelationskoeffizienten r wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Je näher das Bestimmtheitsmaß R^2 an 1 liegt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhangs. Die in **Abbildung 8** als Beispiel dargestellten Werte (Dämmwerte bei der Prüffrequenz 63 Hz, SNR-Werte und Werte für den Druckabfall) dienen der weiteren Erläuterung.

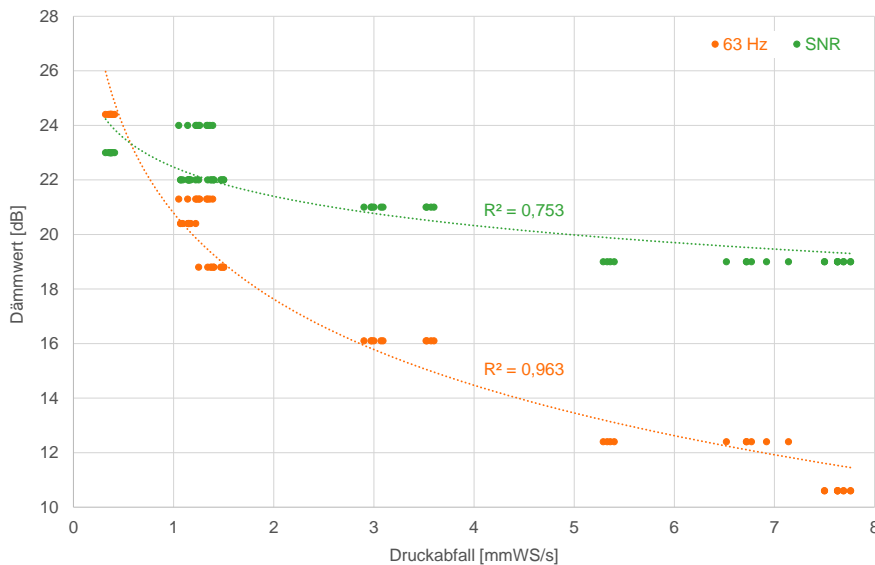


Abbildung 8: Darstellung der Art und des Grads des funktionalen Zusammenhangs zwischen Dämmwerten (hier: 63 Hz, SNR-Wert) und Druckabfall für 6 Filterelemente der Herstellfirma [F (aus Abb. 7, grün)]. Anm.: • = Stichprobenwerte, R^2 = Bestimmtheitsmaß = quadrierter Wert des Korrelationskoeffizienten r

Aus der Dauer des Druckabfalls kann jedoch nicht in jedem Fall auf die Dämmung (SNR-Wert) der Gehörschutz-Otoplastik geschlossen werden. Der Druckabfall wird bei gleichem SNR-Wert durch die Bauform und damit durch die frequenzabhängige Dämmung des Filterelements beeinflusst.³¹ Im Rahmen der Studie wurde deshalb für jedes Filterelement der Wert des normierten Druckabfalls in mmWS/s bzw. mbar/s bestimmt und als Referenzwert³² festgehalten.

Der Druckabfall der Filterelemente einer Bauform bzw. Baureihe einer Herstellfirma zeigt eine gute Korrelation mit den Dämmwerten der tiefen Prüffrequenzen (bis 250 Hz). Die Werte des Bestimmtheitsmaßes R^2 liegen hier jeweils über 0,9. Die zugehörigen SNR-Werte der Filterelemente korrelieren deutlich schlechter mit dem Druckabfall ($R^2 < 0,8$).

Der SNR-Wert wird aus den Werten der angenommenen Schutzwirkungen APV_f ³³ der acht Prüffrequenzen berechnet. Die mittleren und hohen Prüffrequenzen gehen jedoch deutlich stärker in den SNR-Wert ein.

Im Folgenden wird mit fünf Beispielen gezeigt, dass ein SNR-Wert von 25 dB durch sehr unterschiedliche Werte der frequenzabhängigen APV_f erzielt werden kann (s. **Tabelle 1** und **Abbildung 9**).

Tabelle 1: Zusammenstellung der frequenzabhängigen Dämmwerte zum Erreichen eines SNR-Wertes von 25 dB. Für die Beispiele wurde ein Maximalwert $APV_{f,max}$ von 25 dB festgelegt.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	SNR
1	6	21	25	25	25	25	25	25
2	11	19	24	25	25	24	22	25
3	15	18	20	25	25	25	24	25
4	20	25	25	25	25	23	20	25
5	25	25	25	25	25	24	21	25

31 Der SNR-Wert wird wesentlich durch die Dämmwerte der mittleren und hohen Frequenzen bestimmt. Die Dämmwerte der tiefen Frequenzen tragen entscheidend weniger zum SNR-Wert bei.

32 Die Ermittlung der Referenzwerte erfolgte an bis zu zwölf fabrikneuen und unbenutzten Filterelementen.

33 APV_f Assumed Protection Value (Angenommene Schutzwirkung)

$APV_f =$ mittlere Dämmung m_f – Standardabweichung s_f bei der jeweiligen Prüffrequenz f

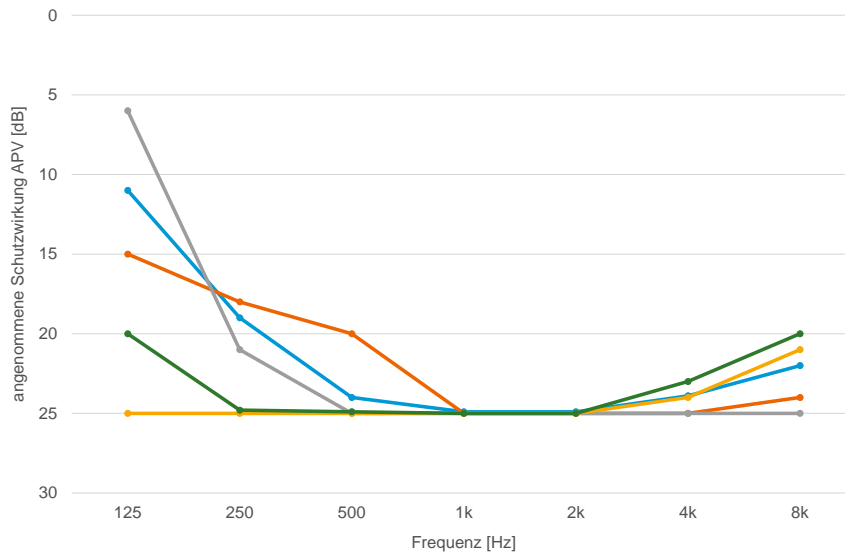


Abbildung 9: Grafische Darstellung der Werte der angenommenen Schutzwirkung APV_f zum Erreichen eines SNR-Wertes von jeweils 25 dB. Festlegung: Maximalwert $APV_{f,max} = 25$ dB

4.2.2 Fertigungstoleranzen

Zur Abschätzung von Fertigungstoleranzen wurden jeweils zwölf Filterelemente je Dämmstufe untersucht. Die Messergebnisse, hier insbesondere der Druckabfall pro Zeiteinheit, wurden statistisch aufbereitet. Nur in sehr wenigen Fällen wurden Auffälligkeiten beobachtet.

Niedrig dämmende Filterelemente zeigen erwartungsgemäß einen höheren Wert beim Druckabfall pro Zeiteinheit als hoch dämmende. Bei Metall- und Keramikfiltern zeigten sich kleinere Fertigungstoleranzen als bei Kunststofffiltern. In **Abbildung 10** sind die Dichteverteilungen³⁴ des Druckabfalls pro Zeiteinheit für unterschiedlich stark dämmende Kunststoff-Filterelemente dargestellt. Die Dichteverteilungen zeigen deutliche Unterschiede.

Schmale, hohe Verteilungen resultieren aus einer kleinen Standardabweichung, also einer kleinen Fertigungstoleranz; breite, flache Verteilungen resultieren aus größeren Standardabweichungen, also entsprechend größeren Fertigungstoleranzen. Obwohl hoch dämmende Filterelemente schwieriger herzustellen sind, wurde keine Korrelation zwischen der Breite der Dichteverteilung und den Dämmwerten der Filterelemente gefunden.

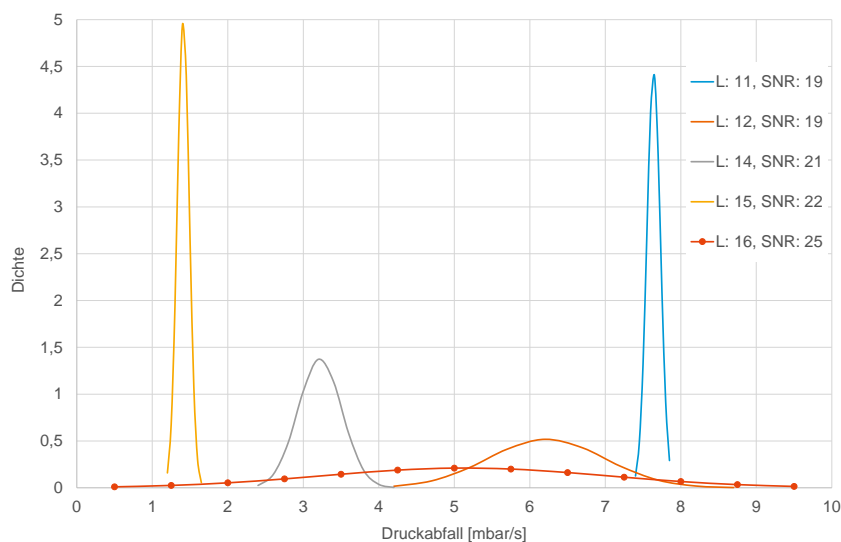


Abbildung 10: Beispiele der Dichteverteilung des Druckabfalls pro Zeiteinheit für fünf Kanalfilter mit unterschiedlich hoher Schalldämmung (Anmerkung: schmale Verteilungen resultieren aus einer kleinen Standardabweichung, dicht zusammenliegenden Einzelwerten).

³⁴ Berechnet aus Mittelwert und Standardabweichung der zwölf Messwerte der fünf untersuchten Dämmstufen ($11 \leq L\text{-Wert} \leq 16$).

Bemerkenswert ist die Dichteverteilung des Filterelements mit einem L-Wert von 16 dB bzw. einem SNR-Wert von 25 dB (rote Kurve). Die weitere Analyse ergab, dass die Filterelemente in zwei Gruppen mit deutlich voneinander abweichenden Werten eingeordnet werden konnten. Der mittlere Druckabfall pro Zeiteinheit betrug bei der einen Gruppe ca. 4,2 mbar/s, bei der anderen ca. 8,4 mbar/s. Die Dichteverteilung der Stichprobe X (rote Kurve) und die Dichteverteilungen der Teilmengen X1 und X2 sind in **Abbildung 11** eingetragen. Die Teilmengen³⁵ waren nicht gleich stark belegt.

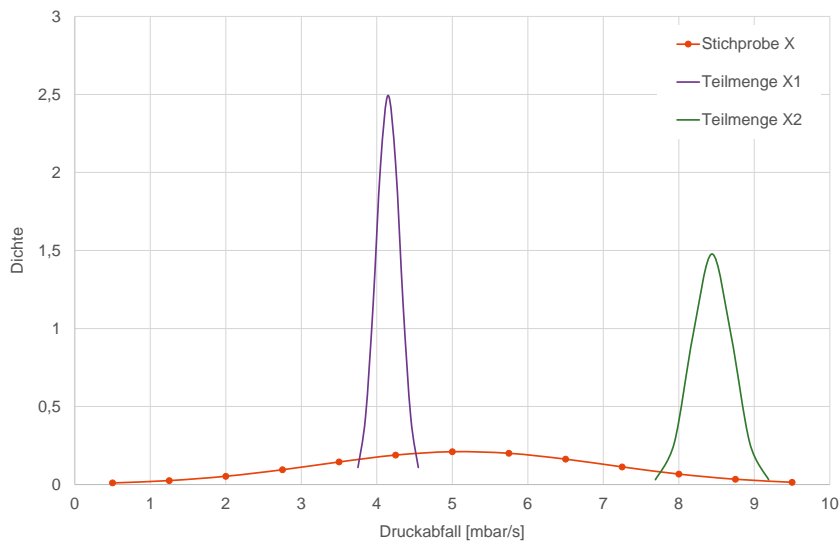


Abbildung 11: Dichteverteilung des Druckabfalls pro Zeiteinheit der Stichprobe X und der Teilmengen X1, X2 für Kanalfilter mit gleich deklarerter Schalldämmung (SNR-Wert 25 dB)

Die Auswirkung auf die akustischen Eigenschaften wurde an zwei Filterelementen³⁶ aus der Teilmenge X1/X2 und zwei Kanülen mit unterschiedlichem Innendurchmesser als Vergleichsobjekte näher untersucht. Die Untersuchungsobjekte wurden dazu in einen Messadapter eingesetzt. Die Anordnung wurde mittels Lautsprecher mit rosa Rauschen beschallt und die Oktavschalldruckpegel bei den Frequenzen der Baumusterprüfung wurden bestimmt. Aus den Messergebnissen wurden Pegeldifferenzen berechnet. Das Filterelement (Nr. 5) mit der höchsten Schalldämmung diente als Referenz³⁷.

Außerdem wurden die akustischen Kennwerte (HML-Werte und SNR-Wert) für die beiden Filter und zwei Kanülen berechnet und dem gemessenen Druckabfall pro Zeiteinheit gegenübergestellt. In **Tabelle 2** sind die Ergebnisse aufgelistet und in **Abbildung 12** grafisch dargestellt. Aus den Messungen an den Kanülen wurde ein Innendurchmesser der Filterelemente von etwa 0,3 mm abgeschätzt.

Tabelle 2: Auflistung der Messwerte und berechneten akustischen Einzahlwerte für die untersuchten Messobjekte (Filterelemente und Kanülen³⁸)

Messobjekt	Druckabfall [mbar/s]	H-Wert [dB]	M-Wert [dB]	L-Wert [dB]	SNR-Wert [dB]
Filter aus Teilmenge X1 (Referenzobjekt, Filter 5)	3,9	28	21	16	24
Filter 8 aus Teilmenge X2	8,7	28	18	11	21
Kanüle mit d ~ 0,3 mm	8,9	28	21	15	24
Kanüle mit d ~ 0,5 mm	15,7	27	15	7	18

35 Anmerkung: Zur Teilmenge X1 konnten 2/3 und zur Teilmenge X2 lediglich 1/3 der Filterelemente-Stichprobe X zugeordnet werden.

36 Für den Vergleich wurden die Filterelemente mit dem niedrigsten und dem höchsten Druckabfall pro Zeiteinheit ausgewählt.

37 0 dB-Linie in Abbildung 12

38 Die Kanülen wurden auf Filterlänge gekürzt. Innendurchmesser d laut Herstellerangabe

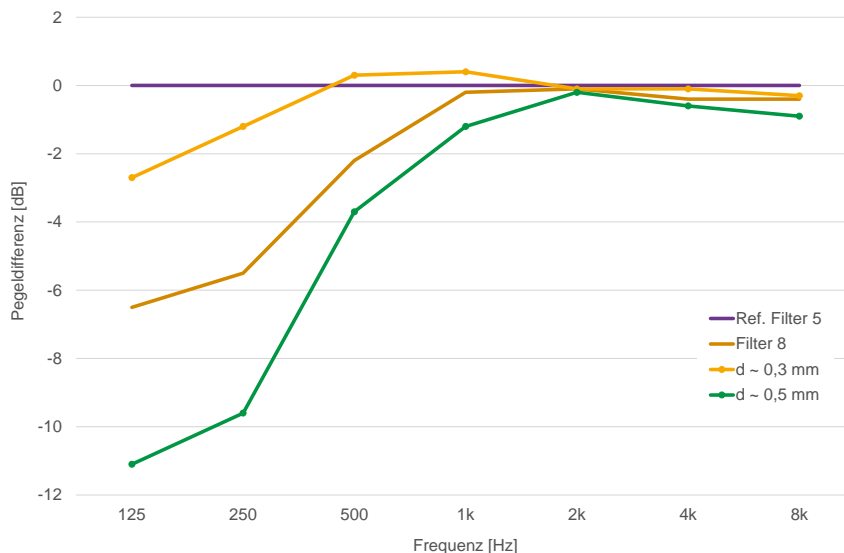


Abbildung 12: Ermittelte Pegeldifferenzen (Oktavschalldruckpegel), bei den Messfrequenzen der Baumusterprüfung, für die Messobjekte aus Tabelle 1. Referenz: Filter 5

4.2.3 Sonstige Auffälligkeiten

Abweichungen bei der Fertigung

Trägt man die Werte der Schalldämmung für jedes Filterelement (Dämmstufe F1 - F7, Filterbaureihe einer Herstellfirma) gegen den gemessenen Druckabfall auf, erwartet man einen stetigen Kurvenverlauf. Filterelemente mit höherer Dämmung zeigen einen geringeren Druckabfall als Filterelemente mit geringerer Dämmung. Weichen die Werte von neuen, unbenutzten Filterelementen ab, weist dies auf Abweichungen bei der Fertigung der Filter hin.

In dem hier gezeigten Fall (siehe **Abbildung 13**) weichen die Filterelemente mit der Dämmstufe F2 (großer Punkt) deutlich und die mit der Dämmstufe F3 (kleiner Punkt) geringfügig vom erwarteten Verlauf (punktirierte Linie) ab. Zumindest für die Filterelemente der Dämmstufe F2 hat die Otoplastik-Herstellfirma Abweichungen bei der Fertigung zugestanden³⁹.

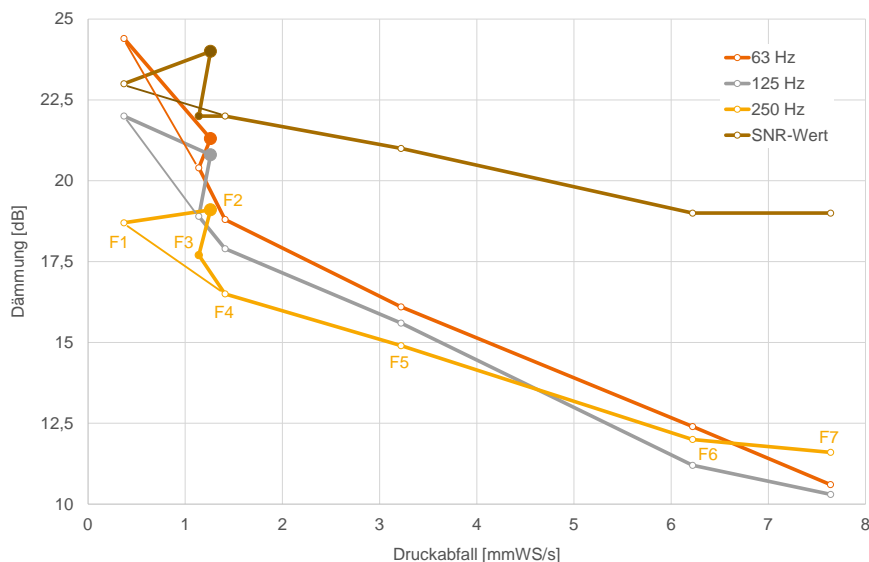


Abbildung 13: Frequenzabhängige Dämmwerte und Druckabfall sieben verschieden stark dämmender Filterelemente (F1 - F7: Dämmung abnehmend) einer Baureihe. Abweichungen vom erwarteten Verlauf weisen auf Fertigungsabweichungen hin. Punktirierte Linie: erwarteter Verlauf, große Punkte: Filterelement F2 mit deutlicher Abweichung

³⁹ Nach Herstelleraussage werden alle Filterelemente der neuen Produktion vor der Verwendung getestet.

Beschädigung beim Einbau

In seltenen Fällen wurden Filterelemente schon beim Einbau beschädigt. Damit die Filterelemente nicht aus der weichen Silikon-Otoplastik herausfallen, werden die Schallkanäle mit kleinen Durchmessern gebohrt. Beim Einschieben der Filterelemente (sehr weiche Kunststoffröhrchen) wurden die Filterbohrungen mit dem Montagewerkzeug zusammengedrückt.

Werden Spritzformen sehr lange verwendet, schließen sie nicht mehr einwandfrei und es können Grate an den Formübergängen entstehen. In wenigen Ausnahmefällen wurden diese Grate über die Bohrungen der Filterelemente gebogen und verstopften die Bohrungen vollständig oder teilweise. Neben den akustischen werden auch die mechanischen Eigenschaften der Filterelemente ungünstig beeinflusst.

4.2.4 Reinigung verstopfter Filterelemente

Bei einer Stichprobenuntersuchung in drei Mitgliedsbetrieben der Berufsgenossenschaft Holz und Metall wurde die Durchlässigkeit von $m = 114$ Filterelementen mittels Überdruckmethode bestimmt. Die Gehörschutz-Otoplastiken waren zwischen einem und fünf Jahr(en) im betrieblichen Einsatz. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 14** dargestellt.

Nach den Angaben der Nutzenden wurden die Gehörschutz-Otoplastiken durchschnittlich zweimal im Jahr gereinigt. Dazu wurden die Gehörschutz-Otoplastiken über Nacht in eine Reinigungsflüssigkeit (Herstellerempfehlung) gelegt und danach mit einem Blasebalg trockengepustet.

Bei ca. 40 % der untersuchten Filterelemente zeigten sich erhebliche Verringerungen der Durchlässigkeit der Filterelemente. Daraus resultieren eine höhere Schalldämmung und eine verringerte Belüftung des Gehörgangs bei eingesetzter Gehörschutz-Otoplastik. Acht Filterelemente waren gänzlich verstopft. Eine Korrelation zwischen Alter und Verschmutzung konnte nicht festgestellt werden. Diese Fragestellung wird in Kapitel 4.2.2 noch einmal aufgegriffen.

Weitere ca. 40 % zeigten mäßige Verringerungen der Durchlässigkeit der Filterelemente mit nur geringen Einschränkungen bei der Verwendung. Lediglich ca. 20 % zeigten nur geringe oder keine Veränderungen der Durchlässigkeit der Filterelemente.

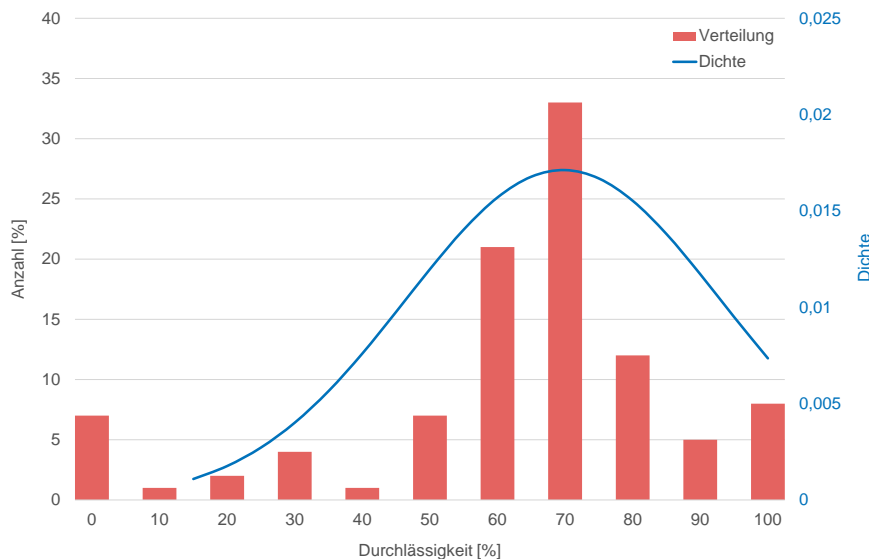


Abbildung 14: Verteilung der Durchlässigkeit von Filterelementen ($m = 114$) und Dichte der berechneten Normalverteilung. Verstopfte Filterelemente weisen eine Durchlässigkeit von 0 % auf.

Es wurde versucht, die verstopften Filterelemente nach Herstellerempfehlung zu reinigen. Da jedoch bei keinem Filterelement die Originalwerte des Druckabfalls pro Zeiteinheit erreicht wurden, wurde die Reinigung fortgesetzt. Nach jedem Reinigungsschritt wurde die Durchlässigkeit der Filterelemente mittels Überdruckmethode erneut bestimmt.

Die Reinigungsmaßnahmen und die Ergebnisse der Druckmessungen (Mittelwerte und Standardabweichungen⁴⁰) sind nachfolgend zusammengestellt:

⁴⁰ Untersuchung von acht Filterelementen

Reinigungsschritt ----- Referenzwert	nach Hersteller- empfehlung ⁴¹	Demontage des Filterelements ⁴²	Reinigung im Ultraschallbad ⁴³	Durchspülen mit Reinigungslösung ⁴⁴	maximal erreichte Durchlässigkeit ⁴⁵
1,26 mmWS/s	85 %	86 %	88 %	90 %	90 %
Standardabw.	12 %	12 %	9 %	5 %	

4.2.5 Auswirkungen auf die akustischen Eigenschaften

Mit zunehmender Nutzungsdauer der Gehörschutz-Otoplastiken wurde ein Absinken der Durchlässigkeit der Filterelemente beobachtet.

Der Mittelwert der Durchlässigkeit der Filterelemente zum Zeitpunkt der Messung (Alter: 0,3 Jahre) betrug 63 % mit einer Standardabweichung von 23 % Punkten. Zu einem späteren Messzeitpunkt (0,5 Jahre) betrug die mittlere Durchlässigkeit nur noch 30 % (Standardabweichung: 20 %-Punkte).

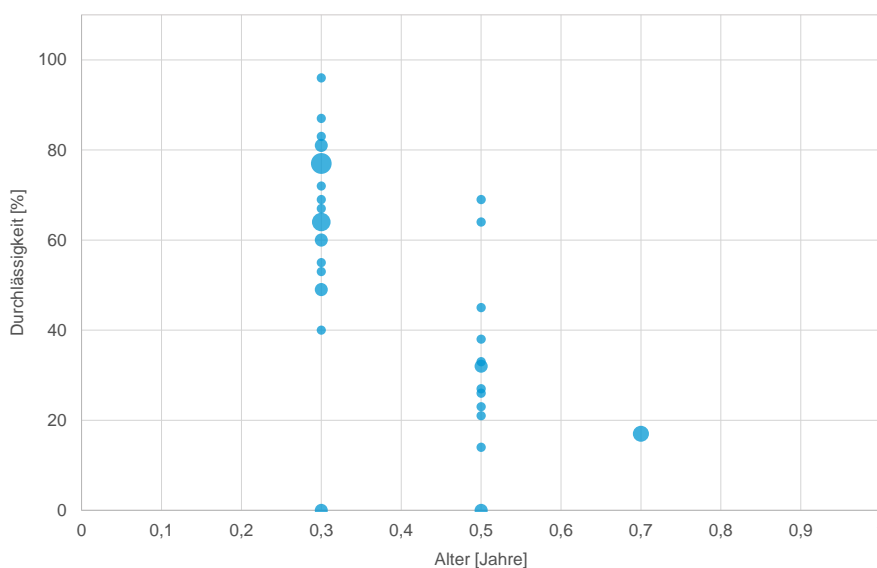


Abbildung 15: Wiederholungsmessungen der Durchlässigkeit von Filterelementen für Gehörschutz-Otoplastiken im Abstand von 0,2 Jahren (n= 21). Normierung: mmWS/s, Druckabfall 15 mmWS. Relative Durchlässigkeit bezogen auf den Referenzwert des jeweiligen Filterelements. Punkte = Einzelwerte, Punktdurchmesser = Häufigkeit

Trotz zum Teil regelmäßiger Reinigung der Gehörschutz-Otoplastiken sank die Durchlässigkeit der Filterelemente innerhalb kurzer Zeit auf 20 %. Wenige Filterelemente waren gänzlich verstopft (Durchlässigkeit 0 %).

Ab einer Durchlässigkeit von 80 % weichen die akustischen Eigenschaften der gereinigten Filterelemente nur geringfügig von denen der unbenutzten Original-Kanalfilter ab. Im tiefen Frequenzbereich bis 500 Hz werden bis zu 3 dB höhere Schalldämmungen in einzelnen Oktaven gemessen.

Bereits nach 4 Monaten lag die mittlere Durchlässigkeit bei 60 %. Die Auswirkungen der verringerten Durchlässigkeit auf die akustischen Eigenschaften wurden im Labor untersucht. Dazu wurden gezielt Filter präpariert und vermessen. Die Durchlässigkeit der Filterelemente, mit einer mittleren Dämmung von 18 dB (SNR-Wert), wurde auf 60 % reduziert. Die Überprüfung der Durchlässigkeit erfolgte mit der bereits beschriebenen Überdruckmethode.

Die frequenzabhängigen Dämmwerte wurden bei den Oktavmittelfrequenzen von 125 Hz bis 8 kHz bestimmt. Außerdem wurden die akustischen Kennwerte (HML und SNR) berechnet. Bei der Messfrequenz von 125 Hz wurde eine um bis zu 10 dB höhere Dämmung festgestellt. Die Zunahme der Dämmung verringert sich mit steigender Frequenz. Bei 1 kHz zeigte sich nur noch eine um bis zu 2 dB höhere Dämmung. Bei den höheren Frequenzen ab 2 kHz zeigte sich keine Änderung. Die abge-

41 Gehörschutz-Otoplastik ca. 2 Stunden in die Reinigungslösung legen

42 Filterelemente aus der Otoplastik herausnehmen und über Nacht in die Reinigungslösung legen

43 Ultraschallbad mit Reinigungslösung, Dauer: 2 Minuten

44 Reinigungslösung mit Spritze aufziehen und Filterelement durchspülen

45 Durchlässigkeit in Prozent bezogen auf Referenzwert des neuen unbenutzten Filterelements

geschätzten Zuwächse lagen für den: H-Wert: bei max. 1 dB, M-Wert: bei max. 6 dB, L-Wert: bei max. 9 dB, SNR-Wert bei max. 6 dB. Die Messergebnisse sind in **Abbildung 16** dargestellt.

Der Zuwachs an Dämmung durch Verstopfen, Verringerung der Durchlässigkeit, ist abhängig von der Ausgangsdämmung des betrachteten Filterelements. Bei niedrig dämmenden Filterelementen fällt der Zuwachs höher als bei hoch dämmenden aus. Verringert sich die Durchlässigkeit, werden Zuwächse zuerst bei den tiefen Frequenzen festgestellt. Bei weiterer Verringerung der Durchlässigkeit werden Zuwächse auch bei den höheren Frequenzen, bis einschließlich 1 kHz, beobachtet. Selbst bei verstopften Filterelementen (Durchlässigkeit 0 %) wurden keine Zuwächse der Dämmung bei Frequenzen oberhalb von 1 kHz beobachtet.

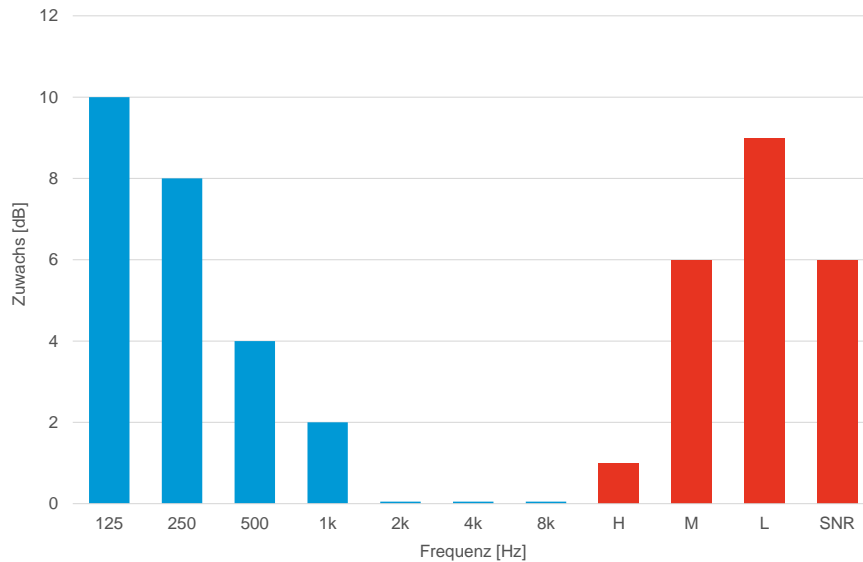


Abbildung 16: Zuwächse der Dämmung bei Reduktion der Durchlässigkeit der Filterelemente auf 60 %, ausgehend von Filterelementen mit einer Dämmung von 18 dB (SNR-Wert). Blaue Säulen: Frequenzabhängige Dämmwerte, rote Säulen: Einzahl-Kennwerte (HML- und SNR-Werte)

4.3 Ergebnisse der Feldstudien

4.3.1 Stichproben

Sind die Schallkanäle der Otoplastik verschmutzt oder verstopft, werden die Messergebnisse verfälscht. In diesen Fällen wurde zuerst versucht, die Schallkanäle zu reinigen. Wenn dies nicht möglich war, wurden die Messergebnisse verworfen. Wichen die Messergebnisse wegen verstopfter Filter vom Referenzwert ab, wurde eine intensive Reinigung der Gehörschutz-Otoplastik z. B. im Ultraschallbad durchgeführt. Brachte dieser Reinigungsversuch keinen Erfolg, wurde der zeitnahe Austausch des Filters angeraten.

Für die grafische Darstellung wurde die relative Durchlässigkeit des Filterelements in Prozent eingeführt. Als Bezug wird der jeweilige Referenzwert des Filterelements in der Maßeinheit mmWS/s bzw. mbar/s benutzt. Ist ein Filter voll funktionsfähig, wird 100 % Durchlässigkeit erreicht. Bei einem teilweise verstopften Filter verringert sich die Durchlässigkeit. Bei einem verstopften Filter sinkt die Durchlässigkeit auf 0 %.

Die Messungen wurden zu Studienbeginn mittels Überdruckmethode mit einem W-Rohr-Manometer, das auch zur Funktionskontrollen von Gehörschutz-Otoplastiken eingesetzt werden kann, durchgeführt. Im weiteren Verlauf der Studie wurde ein moderner PC-gestützter Dichtigkeitsprüfer eingesetzt (ab Okt. 2012).

Bei fehlerhaften Filtern kann sich auch eine Durchlässigkeit über 100 % ergeben. In **Abbildung 17** wurden die Ergebnisse ($m = 48$) für sechs verschiedene Filterelemente einer Baureihe aufgetragen. Die Filterelemente der Gruppe 1 hatten die höchste, die der Gruppe 6 die geringste Schalldämmung. Die untersuchten Filterelemente waren bereits bis zu drei Jahre im betrieblichen Einsatz.

Ob stärker dämmende Filterelemente schneller oder häufiger als niedrig dämmende verstopfen, konnte aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

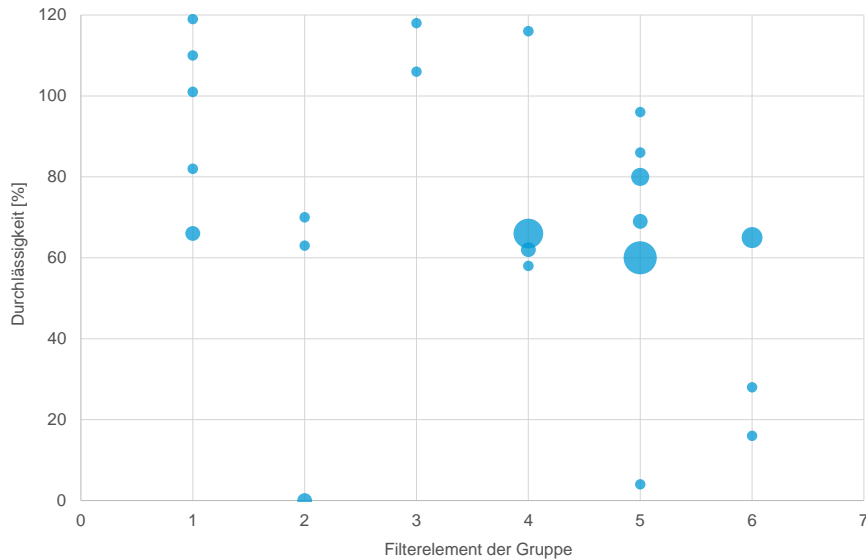


Abbildung 17: Durchlässigkeit von Filterelementen ($m = 48$, Alter: bis 3 Jahre) einer Baureihe. 1 - 6: abnehmende Dämmung, Gruppe 1: hohe Dämmung, Gruppe 6: geringe Dämmung, Punkte = Einzelwerte, Punktdurchmesser = Häufigkeit

4.3.2 Langzeituntersuchung

Bei der zeitnahen Überprüfung der Filterelemente von neu angefertigten Gehörschutz-Otoplastiken zeigte sich ein starkes Nachlassen der Durchlässigkeit der Filterelemente (vgl. Abbildung 14). Es wurde angeraten, die Otoplastiken regelmäßig in einem Ultraschallbad zu reinigen. Eine leichte Verbesserung der Durchlässigkeit der Filterelemente konnte durch die Anwendung der Ultraschallreinigung erzielt werden.

Die Durchlässigkeit von Filterelementen in Abhängigkeit vom Alter der Gehörschutz-Otoplastiken schwankt erheblich. Nahezu altersunabhängig wurden Durchlässigkeiten zwischen 0 % (verstopft) und 100 % (volle Durchlässigkeit) vorgefunden. In **Abbildung 18** wurden die Messergebnisse der ermittelten Durchlässigkeiten von bis zu sechs Jahre alten Filterelementen ($m = 218$) eingetragen.⁴⁶

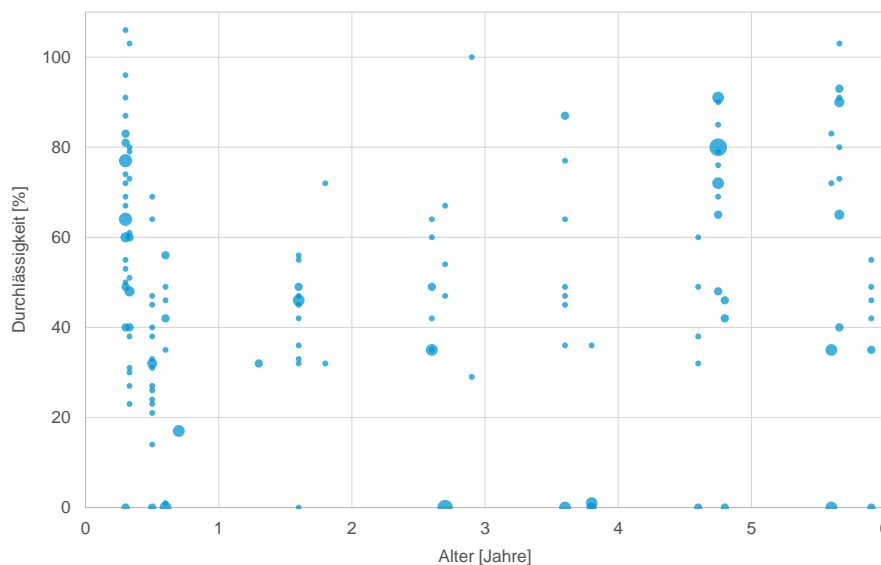


Abbildung 18: Durchlässigkeit von Filterelementen für Gehörschutz-Otoplastiken in Abhängigkeit von ihrem Alter ($m = 218$). Normierung: mmWS/s, Druckdifferenz 15 mmWS. Relative Durchlässigkeit bezogen auf den Referenzwert des jeweiligen Filterelements. Punkte = Einzelwerte, Punktdurchmesser = Häufigkeit.

⁴⁶ Anm.: Durch den Austausch verstopfter Filterelemente im z. B. dritten oder vierten Jahr nimmt scheinbar die Durchlässigkeit der Filterelemente mit zunehmendem Alter wieder zu. Abbildung 18 kann diesen rein optischen Eindruck erzeugen oder verstärken.

4.3.3 Wartung und Pflege - Verstopfte Filterelemente

Während der gesamten Studienlaufzeit wurden immer wieder verstopfte Filterelemente bei den Überprüfungen gefunden. Bei zwei Mitgliedsunternehmen der Berufsgenossenschaft Holz und Metall konnten langfristig Überprüfungen der Filterelemente ($m = 120$) durchgeführt werden. Die überwiegende Zahl der Gehörschutz-Otoplastiken wurde in Arbeitsbereichen mit erhöhtem Staubanfall eingesetzt.

Der Anteil der erstmals verstopften Filterelemente nahm im ersten Jahr des Gebrauchs der Gehörschutz-Otoplastiken rasch zu. Der Eintrag von Verunreinigungen durch die Reinigung, insbesondere durch die fehlerhafte Benutzung des Blasebalgs und Pusten von der falschen Seite, hatten hier einen großen Einfluss (siehe **Abbildung 19**). Nach einer zusätzlichen Unterweisung und der Empfehlung, die Gehörschutz-Otoplastiken im Ultraschallbad zu reinigen, konnte der Anteil deutlich reduziert werden (siehe **Abbildung 20**).

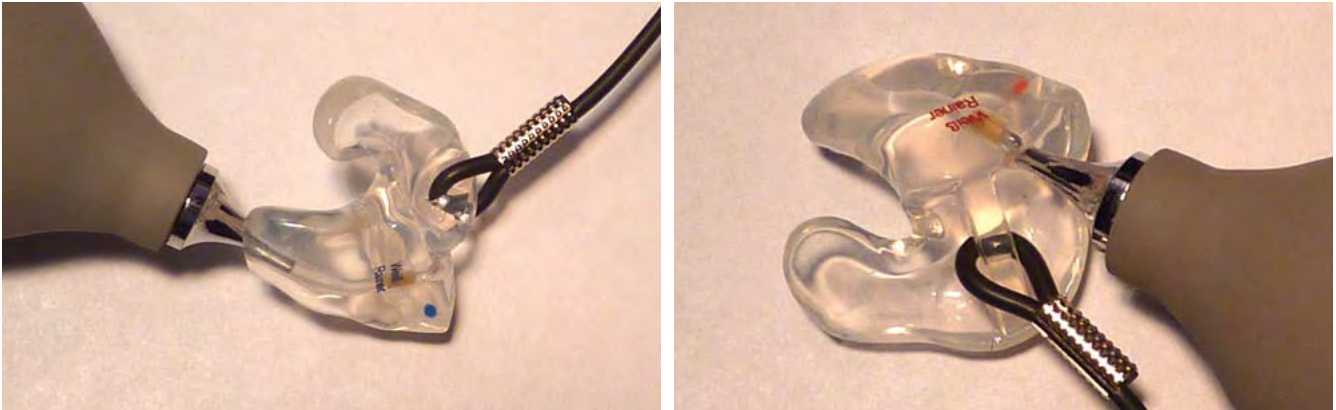


Abbildung 19: Falsche (links) und richtige (rechts) Anwendung des Blasebalgs zum Trockenpusten der Schallkanäle und des Filterelements
Anm.: Immer von außen nach innen pusten

Ob die Verstopfungen der Filterelemente aus fehlender oder fehlerhafter Reinigung resultierten, konnte nicht geklärt werden. Der Einsatz der Ultraschall-Reinigung wirkte sich in beiden Mitgliedsunternehmen positiv aus.

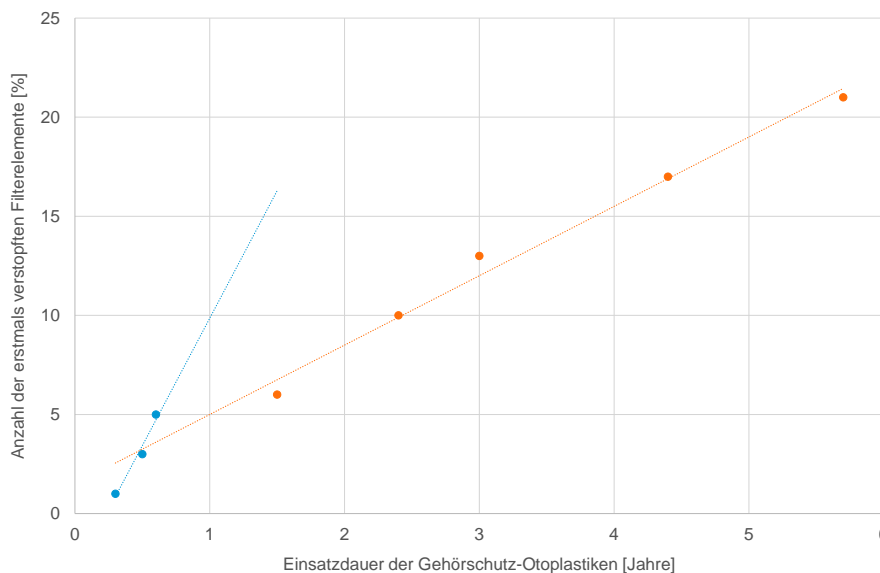


Abbildung 20: Anzahl der erstmals verstopften Filterelemente in Abhängigkeit von der Einsatzdauer der Gehörschutz-Otoplastiken
Blau: ohne Ultraschallbad
Orange: Reinigung im Ultraschallbad

5. Diskussion

Verstopfte Filterelemente verringern nicht nur die Belüftung des Gehörgangs, dem Raum zwischen Otoplastik und Trommelfell, sondern sie verursachen auch eine Zunahme der Schalldämmung und verringern damit die Wahrnehmung von informationshaltigen Geräuschen und erschweren die Kommunikation. Filterelemente tragen damit zu einem erheblichen Teil zur Entscheidung der Benutzung/Nichtbenutzung einer Gehörschutz-Otoplastik bei.

Die derzeit angebotenen Informationen und Hilfsmittel zur Reinigung von Gehörschutz-Otoplastiken sind weit gefächert. Sie reichen jedoch noch nicht aus, um die Veränderung der mechanischen und akustischen Eigenschaften zu verhindern. Geeignete und umsetzbare Reinigungsstrategien müssen entwickelt und durch die Otoplastik-Herstellfirmen angeboten werden. Die Maßnahmen sind nicht nur durch die Personen, die Gehörschutz-Otoplastiken nutzen, sondern auch durch die Arbeitgeber zu unterstützen.

Die Verantwortlichkeiten der Arbeitgeber zur Sicherstellung der Schutzwirkung geeigneter Gehörschützer sind in § 8 der LärmVibrationsArbSchV festgelegt.

**Berufsgenossenschaft
Holz und Metall**

Internet: www.bghm.de

Kostenfreie Servicehotline: 0800 9990080-0