

# Gehörgefährdung durch professionelle Feuerwerkskörper

Dr. Andrea Wolff<sup>1</sup>, Tim Schumacher<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 53757 Sankt Augustin, E-Mail: andrea.wolff@dguv.de

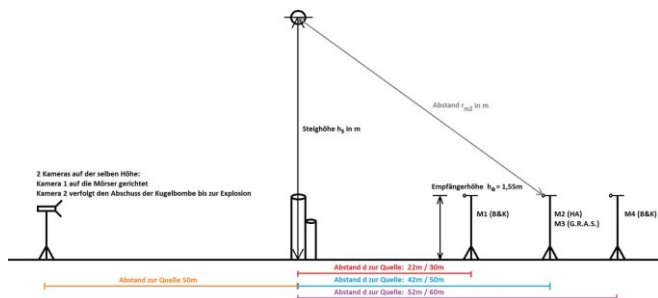
<sup>2</sup> Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich 5: Medien, E-Mail: tim.schumacher86@t-online.de

## Einleitung

Im Rahmen einer Bachelorarbeit „Wirkung des impulshaltigen Schalls von Großfeuerwerksbomben auf den Menschen“ [1] sollten verschiedene Aspekte der Lärmbelastung durch professionelle Feuerwerke betrachtet werden. Schwerpunkt war dabei die Lärmexposition des Pyrotechnikers, der in der Regel die Konzeption, den Aufbau, die Durchführung und den Abbau eines Großfeuerwerks ausführt. Weiterhin wurde die Lärmbelastung der Zuschauer untersucht, ebenso wie die Belastung im Sinne des Nachbarschaftslärms für Anwohner. Um eine belastbare Aussage zur Lärmexposition treffen zu können, wurden zunächst verschiedene Schallpegelgrößen für verschiedene Arten und Kaliber von professionellen Feuerwerkskörpern durch Messung ermittelt. Während dieser Messungen wurde auch die Dämmwirkung verschiedener Gehörschützer stichprobenartig mit Hilfe eines Kunstkopfes gemessen.

## Immissionsmessung

Die Messungen wurden auf einem Testgelände zur Erprobung von Feuerwerk durchgeführt. Auf dem Abschussplatz befanden sich Abschussvorrichtungen für sechs verschiedene Kugelbombenkaliber zwischen 65mm und 200mm und zwei verschiedene Bodenknallkörper mit Blitzknallsatz. Der Abschuss der Feuerwerkskörper erfolgte durch elektronische Fernzündung. Die Lärmimmission durch einzelne Feuerwerkskörper wurde mit zwei ½“-Mikrofonen in 30 und 60 Meter Entfernung zum Abschussort der Kugelbomben erfasst. Ein Kunstkopf zur Ermittlung der Dämmwirkung verschiedener Gehörschützer wurde in 50 Meter Entfernung aufgestellt. Alle drei Messpunkte befanden sich einer geraden Linie zum Abschussort auf Asphaltboden. Mit Hilfe zweier Kameras wurden die genauen Steighöhen der einzelnen Kugelbomben erfasst. Eine Skizze des Messaufbaus findet sich in Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Skizze des verwendeten Messaufbaus. Die Steighöhe der Kugelbomben wurde mit zwei Kameras erfasst, die Lärmimmission in drei Abständen zum Abschusspunkt gleichzeitig erfasst. Am mittleren Messpunkt 2 befand sich der Kunstkopf, mit dessen Hilfe

die Dämmwirkung verschiedener Gehörschützer untersucht wurde.

Je Kugelbombenkaliber (65mm, 75mm, 100mm, 125mm, 150mm und 200mm) wurden drei Bomben gemessen. Die Messwerte und Steighöhen für die sechs Kaliber in den Abständen 30m und 60m sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Messwertübersicht Spitzen- und Maximalschalldruckpegel verschiedener Kugelbomben in 30m und 60m Bodenabstand zum Abschussort. Angegeben ist jeweils das Maximum über drei Abschüsse. Alle Pegel sind in dB angegeben.

Kaliber	30 Meter			60 Meter		
	L <sub>AE</sub>	L <sub>pCpeak</sub>	L <sub>Almax</sub>	L <sub>AE</sub>	L <sub>pCpeak</sub>	L <sub>Almax</sub>
65mm	91,1	133,2	109,9	88,5	130,5	108,7
75mm	92,8	135,1	113,4	87,2	134,8	112,3
100mm	96,5	139,8	116,6	93,8	135,2	111,7
125mm	94,7	140,1	115,4	91,8	135,0	112,1
150mm	94,7	141,1	116,9	91,3	136,2	112,5
200mm	92,6	136,8	114,5	90,2	133,1	111,0

**Tabelle 2:** Übersicht über die durchschnittlichen Steighöhen der verschiedenen Kugelbombenkaliber

Kaliber	Mittlere Steighöhe
65mm	87,5 m
75mm	92,0 m
100mm	156,5 m
125mm	211,3 m
150mm	175,0 m
200mm	206,5 m

Variationen in den Pegeln sind dabei zum einen auf äußere Faktoren wie Wind, leicht schräge Abschusswinkel oder die Messausrüstung an sich zurückzuführen. Zum anderen werden die meisten Kugelbomben in Handarbeit gefertigt, was beispielsweise zu Variationen im Explosionsdruck führt.

Die Bodenknallkörper mit 10g und 50g Füllung wurden 8 Meter vor dem Abschussplatz der Kugelbomben gezündet, so dass die Abstände zu den Messorten hier 22 m, 42 m und 52 m betragen. Auch hier standen pro Kaliber drei Exemplare für die Messung zur Verfügung. Die Messergebnisse für die Bodenknallkörper in 22m und 52m Abstand sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Messergebnisse für jedes Kaliber lagen jeweils recht eng beieinander. Bei 10g Füllung lag der maximale Pegelunterschied der

Einzelmessungen des  $L_{AE}$  bei 0,8 dB, bei 50g Füllung betrug er 2,2 dB.

**Tabelle 3:** Messwertübersicht Einzelereignis- und Maximalschalldruckpegel der Bodenknallkörper mit 10g und 50g Füllung in 22 m und 52 m Bodenabstand zum Abschussort. Angegeben ist jeweils das Maximum über drei Explosionen. Alle Pegel sind in dB angegeben.

	22m Abstand		52m Abstand	
	$L_{AE}$	$L_{AImax}$	$L_{AE}$	$L_{AImax}$
10g	111,9	125,6	102,3	115,9
50g	117,3	130,4	109,1	122,1

Der Blitzknallsatz bestand aus einer Mischung von 70% Kaliumperchlorat mit 30% Aluminiumpulver.

Bei allen Knallen, sowohl der Kugelbomben, wie auch der Bodenknallsätze, handelt es sich um tieffrequente Ereignisse mit  $L_C - L_A \geq 5\text{dB}$ .

Die hier gewonnenen Ergebnisse lassen sich nicht direkt auf Konsumerfeuerwerk übertragen, da bei freiverkäuflichem Feuerwerk ausschließlich Schwarzpulver eingesetzt wird. Dadurch müssen die Hülsen der Knallkörpern deutlich massiver gestaltet werden um einen ausreichend hohen Explosionsdruck aufzubauen. Leichte Variationen bei der Fertigung der Hülsen bedingen dann auch Schwankungen der Spitzenschalldruckpegel.

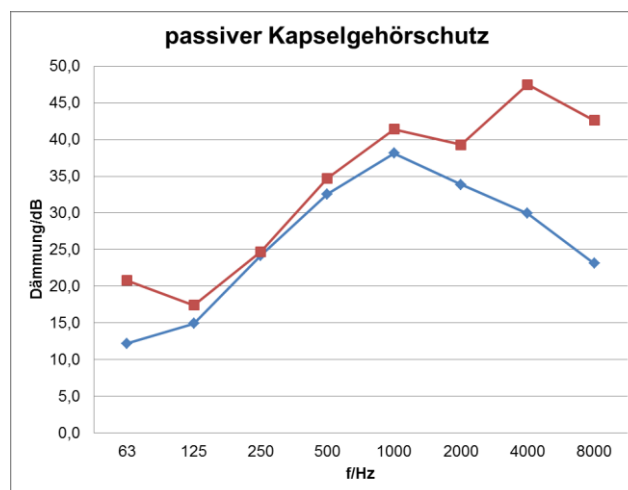
## Wirksamkeit von Gehörschutz

Mit Hilfe eines Kunstkopfes wurde die Dämmwirkung von vier verschiedenen Gehörschützern untersucht. Es handelte sich um einen passiven Kapselgehörschutz (Hersteller: Peltor), einen Kapselgehörschutz mit pegelabhängiger Dämmung (Hersteller: Peltor), sowie um eine Stöpselkombination mit einer passiven und einer peakdämmenden Seite (Hersteller: 3M). Von dieser Kombination wurden beide Seiten untersucht.

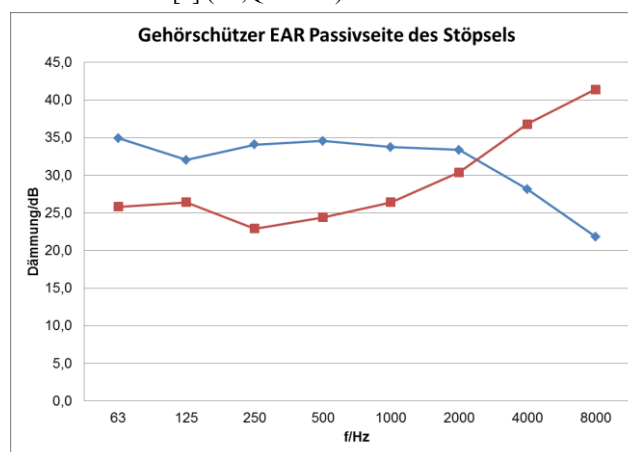
Motivation für die Einbeziehung des aktiven Kapselgehörschutzes und des Stöpsels mit Peakdämmfunktion sind die besonderen Arbeitsbedingungen des Pyrotechnikers. Bis auf das Abbrennen von Feuerwerken führt dieser nur Tätigkeiten aus, die nicht mit gehörgefährdendem Lärm verbunden sind. Eignet sich jedoch beim Transport oder Verleiten eines Feuerwerks ein Unfall, bei dem ein Feuerwerkskörper in unmittelbarer Nähe zum Pyrotechniker explodiert, so ist nach VDI 2058-2 [3] von der Entstehung eines akuten Gehörschadens auszugehen. Somit sollte bei solchen Tätigkeiten präventiv ein Gehörschutz mit hoher Dämmwirkung getragen werden. Andererseits ist die Kommunikation mit Kollegen und Helfern während des Umgangs mit Feuerwerkskörpern essentiell für die Sicherheit und darf somit nicht durch einen passiven, hochdämmenden Gehörschutz außer Kraft gesetzt werden. Der untersuchte aktive Kapselgehörschutz und der Stöpsel mit Peakdämmfunktion sollen eine normale Kommunikation ermöglichen und bei einem unerwartet auftretenden Knall dennoch das Gehör schützen. Die beiden passiven Gehörschützer (Peltor und 3M) wurden zu Vergleichszwecken herangezogen, da für diese im Rahmen

der Baumusterprüfung die Dämmwerte nach einem einheitlichen Verfahren nach DIN EN 13819-2 [7] bereits bestimmt sind.

Die Dämmwerte der Gehörschützer wurden wie folgt ermittelt. Zu jedem Kugelbombenkaliber wurden drei Exemplare der Bombe gezündet. Mit dem Kunstkopf wurde jeweils ein Abschussereignis ohne Gehörschutz und zwei Ereignisse mit Gehörschützer aufgenommen. So ergeben sich für jeden Gehörschützer vier bis sechs gemessene Knallereignisse (bei Kugelbomben treten zwei Knalle pro Bombe auf, einer bei Abschuss und einer bei Zerlegung), verursacht durch verschiedene Knallkörper mit verschiedenen Kalibern. Zur Bestimmung der Dämmwirkung wurden zunächst die Messergebnisse des rechten und linken Ohres in jeder Oktave für jedes Knallereignis gemittelt. Anschließend fand eine Mittelung über die verschiedenen Knallereignisse statt. Die resultierenden mittleren Dämmkurven sind in den Abbildungen 2 bis 5 dargestellt.



**Abbildung 2:** Anhand der gemessenen Knallereignisse ermittelte Dämmkurve des passiven Kapselgehörschützers (blau, Raute). Zum Vergleich die Dämmkurve nach DIN EN 13819-2 [7] (rot, Quadrat).



**Abbildung 3:** Anhand der gemessenen Knallereignisse ermittelte Dämmkurve des Stöpsels (blau, Raute). Zum Vergleich die Dämmkurve nach DIN EN 13819-2 [7] (rot, Quadrat).

Zum Vergleich sind für den passiven Kapselgehörschutz und die Passivseite des Stöpsels auch die Dämmkurven nach

DIN EN 13819-2 [7] eingezeichnet. Aus den so errechneten Oktav-Dämmwerten wurden weiterhin die L- und M-Werte der Gehörschützer bestimmt, die zum Beispiel benötigt werden um die Eignung eines Gehörschutzes zu prüfen [2]. Die L- und M-Werte sind in Tabelle 4 dargestellt.

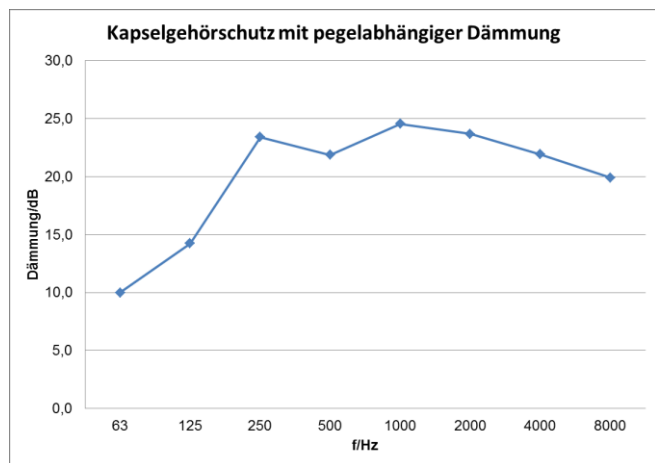


Abbildung 4: Anhand der gemessenen Knallereignisse ermittelte Dämmkurve des aktiven Kapselgehörschützers mit pegelabhängiger Dämmung (blau, Raute).

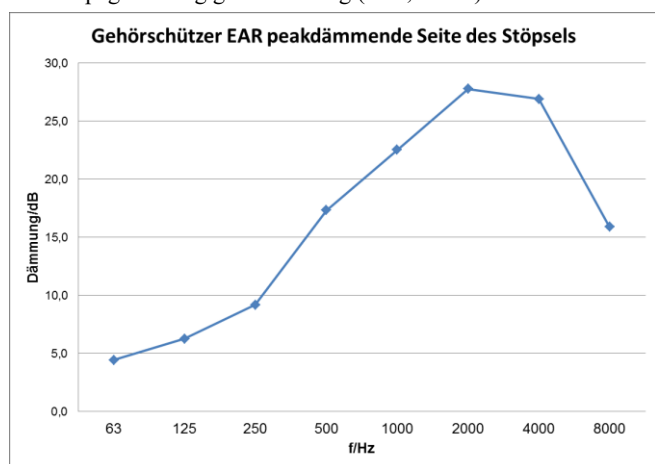


Abbildung 5: Anhand der gemessenen Knallereignisse ermittelte Dämmkurve der peakdämmenden Seite des Stöpsels (blau, Raute).

Tabelle 4: Die Dämmwerte M und L der vier untersuchten Gehörschützer als Mittelwerte aus allen Messungen. Alle Dämmwerte sind in dB angegeben.

	Kapsel Passiv	Kapsel mit pegelabh. Dämmung	Stöpsel passiv	Stöpsel Peakdämmung
L	23	21	33	12
M	31	23	32	19

Für den passiven Kapselgehörschützer zeigen sich im Bereich 125 Hz bis 2 kHz sehr gute Übereinstimmungen der Messungen mit den Ergebnissen der Baumusterprüfung. Die Messergebnisse für die Passivseite des Stöpsels fallen in diesem Bereich deutlich besser als die der Baumusterprüfung aus. Dies ist wahrscheinlich auf eine gute Passform im runden Ohrkanal des Kunstkopfes zurückzuführen.

Bei beiden passiven Gehörschützern zeigen sich jedoch bei hohen Frequenzen systematische Abweichungen zwischen den Dämmwerten der Baumusterprüfung und den

Messergebnissen. Ab 2000 Hz fallen die Dämmwerte aus den Messungen massiv ab, während die Dämmwerte aus den Baumusterprüfungen hier ansteigen.

Der Grund für diese Abweichungen liegt vermutlich in der Art der Schalleinwirkung mit hoher Amplitude und tieffrequentem Spektrum. Das hier beobachtete Abfallverhalten der Dämmwirkung findet sich auch in den Messergebnissen zum aktiven Kapselgehörschutz und bei der peakdämmenden Seite des Stöpsel wieder, so dass weitere Untersuchungen durchgeführt werden sollten.

Wenn nun beispielsweise im Rahmen einer Gefährdungsermittlung die Einhaltung des maximalen, am Ohr wirksamen Pegel  $L'_{pCpeak}$  überprüft werden soll, so ergibt sich nach [2] unter Berücksichtigung der Praxisabschläge von 5 dB für fertig geformten Gehörschutz oder Kapselgehörschutz und dem tieffrequenten Charakter der Knalle ( $L_C - L_A \geq 5dB$ )

$$L'_{pCpeak} = L_{pCpeak} - (L - K_s - 5dB) \quad [dB] \quad (1)$$

Bei  $K_s$  handelt es sich um den Praxisabschlag (für die verwendeten Gehörschützer beträgt dieser 5 dB), L ist der Dämmwert des Gehörschützes für tiefe Frequenzen und  $L_{pCpeak}$  der aufgenommene Messwert. Der maximale am Ohr wirksame Pegel darf nach Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [6] nicht mehr als 137 dB betragen.

Für den peakdämmenden Gehörschutzstöpsel ergibt sich damit eine effektive Reduktion des Spitzenschalldruckpegels um nur 2 dB. Beim passiven Stöpsel liegt die Reduktion bei 23 dB, bei der passiven Kapsel liegt sie bei 13 dB und für die Kapsel mit pegelabhängiger Dämmung noch bei 11 dB. Durch qualifizierte Benutzung des Gehörschutzes kann bei entsprechender Einweisung auf den Praxisabschlag verzichtet werden, was die effektiven Dämmwerte um 5 dB anheben würde. Dennoch reicht die Dämmwirkung nicht aus um bei Explosionen in nächster Nähe den oberen Auslösewert am Ohr einzuhalten. Dennoch kann bei den hochdämmenden Gehörschützern wahrscheinlich ein akuter Gehörschaden verhindert werden.

Zu beachten ist jedoch, dass es sich bei den präsentierten Ergebnissen um stichprobenartige Messungen handelt. Eine Fehlerangabe, insbesondere durch die Unsicherheit bei der Bestimmung des Freifeldpegels, kann aufgrund der geringen Zahl von Messungen hier nicht erfolgen.

### Sicherheits- und Schutzabstände

Während des Aufbaus und des Abbrennens eines Feuerwerks sind nach [4] verschiedene Sicherheitsabstände für unbeteiligte Personen, wie zum Beispiel Zuschauer oder Passanten, einzuhalten. Diese Abstände zielen primär auf einen Schutz vor dem Feuerwerkskörper bzw. vor abgelösten Teilen ab. Auch in der DIN EN 16261-3 werden Angaben zur Berechnung eines Sicherheitsabstands gemacht. Hiermit kann ein Sicherheitsabstand berechnet werden, ab dem ein gewünschter maximaler Schalldruckpegel nicht mehr überschritten wird.

Bezüglich des maximalen Schalldruckpegels, dem Zuschauer oder Passanten während eines Feuerwerks ausgesetzt sein sollten, kann beispielsweise die VDI 2058-2 [3] herangezogen werden, die in Abschnitt 2.4.1 folgende Aussage trifft: „Bei hohen  $L_{AI}$ -bewerteten Schalldruckpegeln oberhalb von  $L_{AI} = 120$  dB können akute Gehörschäden schon nach Geräuscheinwirkungen über Minuten auftreten.“ Um eine Gehörgefährdung für alle Personen auszuschließen, kann, wie im Konsumerfeuerwerkbereich, ein Ansatz zur Definition eines Schutzabstandes beispielsweise durch die Bedingung  $L_{AI} = 120$  dB definiert werden. Da bei einem Feuerwerk aber auch andere Gefährdungen auftreten, sollte dann immer der größte Schutzabstand gewählt werden, der unter Berücksichtigung aller Gefährdungen auftritt.

Basierend auf den hier präsentierten Messergebnissen zu zwei Sorten Bodenknallkörper kann festgehalten werden, dass bei dem vom Bundesamt für Materialforschung [4] empfohlenen Schutzabstand von 30 m der  $L_{AI,max}$  den Wert von 120 dB deutlich überschreitet: Auf 30 m linear interpoliert liegt der Maximalpegel  $L_{AI,max}$  für den Blitzknallsatz mit 10 g bei 124,4 dB und für 50 g Füllung bei 128,6 dB.

## Fazit

Professionelle Feuerwerke stellen eine hohe Geräuschbelastung für das Publikum, die Nachbarschaft und den Pyrotechniker dar. Aufgrund der großen Steighöhe vieler Effekte und des tieffrequenten Spektrums sind die mit dem Feuerwerk verbundenen Knalle über große Distanzen wahrnehmbar. Bei Kugelbomben ist für die Betrachtung der Lärmexposition in sehr großen Abständen (Nachbarschaftslärm) aufgrund der Steighöhe nur der Zerlegungsknall von Bedeutung. Bei Betrachtung des Nachbarschaftslärms nach DIN 45645-1 [8] ist mit großen Impulszuschlägen zu rechnen. Die Pegeldifferenzen zwischen den mit der Zeitbewertung „Impuls“ und der Zeitbewertung „Fast“ bewerteten äquivalenten Dauerschallpegeln betragen bei den präsentierten Messungen immer mindestens 15 dB.

Um eine Personengefährdung auszuschließen, sind beim Aufbau und beim Abbrennen von Feuerwerk Sicherheits- und Schutzabstände einzuhalten [4] [5]. Die Abstände fallen für verschiedene Typen von Feuerwerkskörpern unterschiedlich groß aus. Es ist immer der größte der in Frage kommenden Abstände einzuhalten. Dennoch kann es vorkommen, dass der z.B. auf Basis der VDI 2058-2 empfohlene Maximalpegel von  $L_{AI} = 120$  dB auch bei Einhaltung des Schutzabstands überschritten wird, wie die Messungen an zwei Sorten Bodenknallkörpern gezeigt haben.

Die Spitzen- und Maximalschalldruckpegel fielen bei allen untersuchten Feuerwerkskörpern so hoch aus, dass nach VDI 2058-2 bei (unbeabsichtigten) Explosionen in nächster Nähe mit akuten Gehörschäden zu rechnen ist. Dies gilt insbesondere auch für Unfälle mit sogenannten „Polenböllern“, die mit Blitzknallsatz gefüllt sind.

Die angeführten Messwerte gelten nur für die hier untersuchten Feuerwerkskörper eines Herstellers. Der

interne Aufbau, die Mischungsverhältnisse, die Schwarzpulver- und Blitzknallsatzmengen, die Umhüllung und damit auch Steighöhe und Explosionsdruck der Feuerwerkskörper variieren von Hersteller zu Hersteller. Aus diesem Grund ist es auch schwierig, die Lärmexposition durch ein Feuerwerk im Vorfeld genau abzuschätzen.

## Literatur

- [1] Schumacher, Tim: Wirkung des impulshaltigen Schalls von Großfeuerwerksbomben auf den Menschen“, Bachelorarbeit, FH Düsseldorf (2014)
- [2] DGUV-Regel 112-194: Benutzung von Gehörschutz (2011, 2015)
- [3] VDI 2058-2: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung (06/1988)
- [4] L. Kurth: Sicherheitsmaßnahmen für das Abbrennen von pyrotechnischen Gegenständen der Kategorie 4 (F4), Bundesamt für Materialforschung, 23.4.2008
- [5] DIN EN 16261-3: Pyrotechnische Gegenstände – Feuerwerkskörper, Kategorie 4 – Teil 3: Prüfverfahren (03/2013)
- [6] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung), BGBl. I, S. 261, zuletzt geändert am 19.7.2010 (BGBl. I, S. 960)
- [7] DIN EN 3819-2: Gehörschützer – Prüfung – Teil 2: Akustische Prüfverfahren (04/2003)
- [8] DIN 45645-1: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen – Teil 1: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft (07/1996)