Wirkung von Gehörschutz auf die Kommunikation in Lärmbereichen

Jean-Sébastien Niel
Gwenolé Nexer

Dezember 2013

Aus dem Französischen übersetzt

Diese Studie wird den Einfluss von Gehörschutz und insbesondere dessen Kurvenabfall auf die Sprachverständlichkeit im Lärm untersuchen.

Mit Hilfe eines subjektiven Tests mit 22 Testpersonen, wurde eine Erhöhung von ca. 20% der erkannten Wörter mit Gehörschutz mit einer gleichwertigen Wiedergabe beobachtet. Verglichen wurde dieser mit Gehörschutz ohne gleichwertiger Wiedergabe jedoch mit gleichen Dämmwerten.

Sich vor Lärm schützen
E-130-1

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG 4

1.1 Vorwort 4

1.1.1 Die Notwendigkeit im Lärm Warnsignale zu hören und sich zu verständigen 4

1.1.2 Ziel dieser Studie 4

1.1.3 Die Gleichwertigkeit der Gehörschützer bewerten 5

1.1.4 Sprachverständlichkeit im Lärm bewerten 6

2 IM LÄRM KOMMUNIZIEREN 7

2.1 Die Elemente, die eine Rolle spielen 7

2.2 Beschaffenheit von Lärm 7

2.3 Der Sprecher / Eigenschaft des nützlichen Signals 8

2.3.1 Sprechanstrengung in Bezug auf Lärm 8

2.3.2 Trageeffekt von Gehörschutz 11

2.4 Hörer/Wahrnehmung des Signals 12

2.4.1 Tragen von Gehörschutz sowie Hörbeeinträchtigungen 12

2.4.2 Maskierungseffekt 13

2.4.3 Fähigkeit der Wiederherstellung der Botschaft 15

2.5 Rahmenbedingungen 16

2.5.1 Beeinflussung der Distanz zwischen den Gesprächspartnern bzgl. der Lautstärke des empfangenen Signals: 16

2.5.2 Richtwirkung des Kopfes: 16

3 MESSUNGSVERFAHREN DER VERSTÄNDLICHKEIT 17

3.1 Objektive Methoden 17

3.1.1 SIL-Verfahren 17

3.1.2 STI-Verfahren 19

3.1.3 STI-Verfahren unter Berücksichtigung der Maskierung und der Hörschwelle 21

3.2 Die subjektiven Tests 23

3.2.1 Phonetische Tests 23

3.2.2 Verständlichkeitstests 23

3.3 Verhältnis zwischen den Methoden 24

3.3.1 Getestete Modelle 25

3.3.2 Die Testpersonen 26

3.3.3 Die Testvorrichtung 26

3.3.4 Das Sprachmaterial 27

3.3.5 Geräuschbelastende Umgebungen 28

3.4 Vereinfachtes Ergebnismodell 30

3.4.1 Erste Annäherung 30

3.4.2 Zweite Annäherung 31

3.4.3 Dritte Annäherung 31
3.4.4 Das Modell 32
4 VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT DEM STI 34
4.1 Simulation der Testbedingungen 34
4.2 Ergebnisse 35
5 ERMITTLUNG EINES VERFAHRENS ZUR VORHERSAGE DER SPRACHVERSTÄNDLICHKEIT 37
6 ZUSAMMENFASSUNG 38
7 BIBLIOGRAPHIE 39
ANHANG 1: DÄMMWERTE DER GENANNTEN GEHÖRSCHÜTZER IN DIESER STUDIE 41

1 Einleitung

1.1 Vorwort

1.1.1 Die Notwendigkeit im Lärm Warnsignale zu hören und sich zu verständigen

In der Industrie werden diverse Warnsignale eingesetzt, die sich wie folgt unterscheiden:

- Warnsignal, dessen Rolle es ist, die Mitarbeiter vor einer drohenden Gefahr zu warnen (Beispiel: Feueralarm, Signal eines zurückfahrenden Fahrzeugs etc.),
- Informationshaltiges Signal, das eine Handlung vom Mitarbeiter erfordert (Klingeln eines Telefons, Laufzeitende einer Maschine etc.).

Die drei folgenden Begriffe geben den Interpretationsgrad der Signale wieder:

1. Wahrnehmen: ein Signal hören, ohne es zu erkennen.
2. Erkennen: das Signal identifizieren. Bei einer Stimme beispielsweise, erkennen wir, dass es sich um eine Frauenstimme handelt ohne ihre Worte zu verstehen.
3. Verstehen: die Botschaft identifizieren und ihre Bedeutung verstehen.

Sobald der Lärmpegel zu hoch ist, erreicht das Ohr einen Zustand der Sättigung. Unser auditives System, insbesondere die Cochlea, ist gesättigt und nicht in der Lage, die aufgenommenen Informationen einzuordnen. Unsere Fähigkeit Signale zu erkennen und zu verstehen, verringert sich somit.
Das Tragen eines persönlichen Gehörschutzes unterstützt in der Regel eine bessere Verständlichkeit, indem der Lärmpegel verringert wird und dabei keine Sättigung der Cochlea stattfinden kann (Casali J. G., 2000 [1]).

Die europäische Norm EN 458 von 2005 gibt folgendes an: *„Ist die Erkennbarkeit von Signalen, wie z. B. Sprache und Warnsignale, kritisch, sind Gehörschützer mit einer frequenzunabhängigen Schalldämmcharakteristik zu bevorzugen.“*
Dies erscheint vielleicht logisch, aber es ist wichtig, dies zu belegen und zu untersuchen in welchem Größenverhältnis dies geschieht.

1.1.2 Ziel dieser Studie

Ziel dieser Studie ist es, die Wirkung von Gehörschutz auf die Verständlichkeit einer Kommunikation im Lärm zu bewerten. Hierfür stellt dieses Dokument die Hauptmechanismen, die während der Übermittlung der Sprache vom Sender zum Hörer im Lärm auftauchen, zusammen.
Wir werden ebenfalls die Wirkung des Kurvenabfalls der Dämmung des Gehörschutzes auf die Verständlichkeit, mithilfe eines subjektiven Tests, untersuchen.

Wir werden anschließend die Ergebnisse, die während des subjektiven Tests erfasst wurden mit einem objektiven Verständlichkeitsindex, dem STIr, vergleichen. Sollte der STIr nicht die beobachtete Realität wiedergeben, werden wir die erfassten Ergebnisse als Modell nehmen, um einen Ersatzindex zu berechnen.

1.1.3 Die Gleichwertigkeit der Gehörschützer bewerten

Die Dämmwerte des Gehörschutzes werden von anerkannten Zertifizierungsstellen anhand von Testpersonen ermittelt. Der Durchschnittsdämmwert, der bei den Testpersonen erfasst wurde (bei dem die Standardabweichung abgezogen wird), bestimmt die Dämmung des Gehörschutzes. Die Dämmung wird für jede zentrale Frequenz des Oktavbandes von 63Hz bis 8000Hz in Dezibel gemessen.

In der Norm ISO 4869-2 („Abschätzung der beim Tragen von Gehörschützern wirksamen A-bewerteten Schalldruckpegel“) werden die Berechnungen des SNR und des HML-Wertes für die Europäische Gemeinschaft festgelegt.

Der SNR ist der allgemeine Index bzgl. der Dämmung (Single Number Rating) und gibt den Durchschnittsdämmwert auf allen gemessenen Frequenzen wieder. Anhand des SNR wird die Stärke des akustischen Filters wiedergegeben.
Die HML-Werte sind Durchschnittsdämmwerte in den hohen Frequenzen (high), den mittleren Frequenzen (medium) und den tiefen Frequenzen (low). Die HML-Werte geben die Gleichwertigkeit des Filters wieder.

Beispiel der beiden Filter (s.u.):

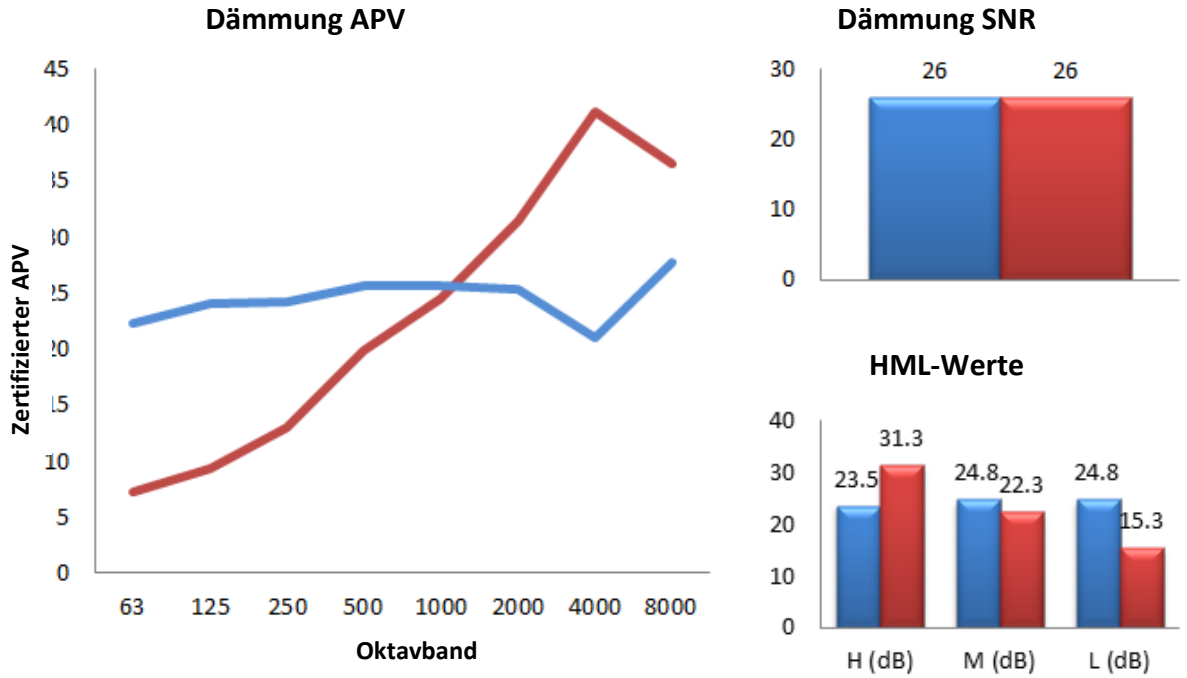


Abbildung 1: drei unterschiedliche Darstellungen einer Dämmung von zwei Gehörschützern. Wenn man die Darstellung pro Frequenz mit der Darstellung nach HML-Werten vergleicht, kann man eine Abweichung zwischen diesen erkennen, obwohl der SNR bei beiden identisch ist.

Man stellt fest, dass die Dämmung, die vom SNR wiedergegeben wird, identisch ist.
Allerdings gibt es eine starke Verzerrung des Audiospektrums mit dem Filter, der rot dargestellt wird. Der Abfall der roten Kurve ist wesentlich stärker.
In dieser Studie haben wir beschlossen, die Gleichwertigkeit eines Gehörschutzes durch einen einzelnen Index zusammenzufassen:

seinen Kurvenabfall mit Abfall = H - L

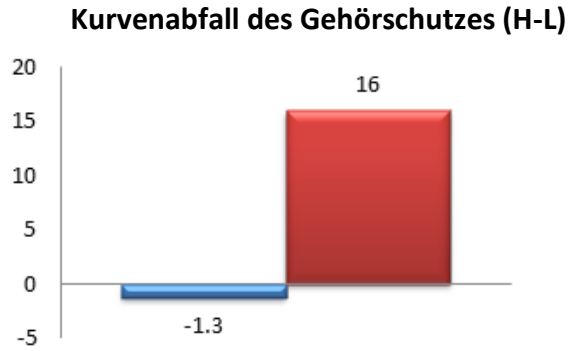


Abbildung 2: Kurvenabfall (H-L) der Gehörschützer mit dem gleichen SNR.

1.1.4 Sprachverständlichkeit im Lärm bewerten

Die Verständlichkeit der Sprache wird anhand der Sprachübermittlungsrate einer Quelle (Sprecher, Lautsprecher etc.) zu einem Hörer erfasst.
Die ersten Messungen zur Sprachverständlichkeit wurden in der Vergangenheit mit Hilfe von Sprechern und Hörern **subjektiv** durchgeführt (Test von Campbell 1910, Fletcher & Steinberg 1929, Fairbanks, Modified Rhyme Test, Diagnostic Rhyme Test).
Diese Methoden sind schwierig umzusetzen und stellen Probleme bei der Objektivität sowie Reproduzierbarkeit dar. Im Allgemeinen wird die Sprachverständlichkeit der Botschaften (Wörter, Sätze etc.), die korrekt vom Hörer wahrgenommen werden, in % wiedergegeben.

Die objektiven sowie voraussagenden Messungen der Sprachverständlichkeit ermöglichen es, die Sprachverständlichkeit zu messen, ohne auf Testpersonen zugreifen zu müssen. Hierzu gibt es mehrere Indikatoren: insbesondere der Artikulationsindex (**AI**), der Sprachübertragungsindex (**S.T.I.**) oder der Sprachinterferenzpegel (**S.I.L.**) Der AI gibt das Gesamtergebnis der subjektiven Messungen an, die im Bereich der Sprache und des Lärms beobachtet wurden. Der SIL wird anhand des Umgebungsgeräuschpegels, der Sprachlautstärke des Senders, des Tragens oder des Nicht-Tragens von Gehörschutz und der Muttersprache gemessen. Der STI ermöglicht es, störende Elemente wie Lärm, die Reflexion eines Übertragungskanals, sowie die Elemente, die sendergebunden sind, wie Geschlecht,

Sprechlautstärke oder die Distanz zwischen den Gesprächspartnern zu berücksichtigen. Der SIL und der STI werden in der Norm EN ISO 9921 2004 beschrieben.

2 Im Lärm kommunizieren

2.1 Die Elemente, die eine Rolle spielen

Die Erkennung der Sprache ist an eine Reihe von Parametern gebunden.
Die Hauptparameter sind folgende:

- Umgebungsgeräusche:
- Lautstärke
- Spektrum
- Veränderung in der Zeit: stationär/ nichtstationär

- Das gesendete Sprachsignal vom Sender
- Klarheit der Botschaft
- Spektralbereich (Geschlecht, Sprechanstrengung)
- Wahrnehmung seiner eigenen Stimme und Einstellung des spektralen Inhalts / Lautstärke
- Tragen von angepasstem Gehörschutz (verstärkt die Wahrnehmung seiner eigenen Stimme)

- Der Hörer
- Hörschwellen
- Maskierungseffekt des Individuums
- Fähigkeit die Botschaft zu rekonstruieren
- Beherrschung der Sprache / Kultur
- Geistige Unterstützung (Kontext)
- Fähigkeit des Lippenlesens
- Tragen von Gehörschutz

- Die Gestaltung des Umfelds
- Distanz zwischen den Gesprächspartnern
- Empfangswinkel der Botschaft aufgrund der Kopfrichtung
- Identifizierung des Lärms
- Raumakustik (Schallreflexion etc.)

2.2 Beschaffenheit von Lärm

Lärm kann stationär oder nichtstationär sein.

Lärm ist nichtstationär:
Das Spektrum variiert mit der Zeit. Im Laufe eines Satzes beispielsweise, kann ein Teil der Botschaft durch die Umgebungsgeräusche verfälscht werden.

Lärm ist stationär:
Es handelt sich um ein Umgebungsgeräusch, dessen Spektrum mit der Zeit nicht variiert. Die Person ist diesem Lärm die ganze Zeit während der Sendung der Botschaft ausgesetzt.

Hier ein Spektrum eines Industrielärms:

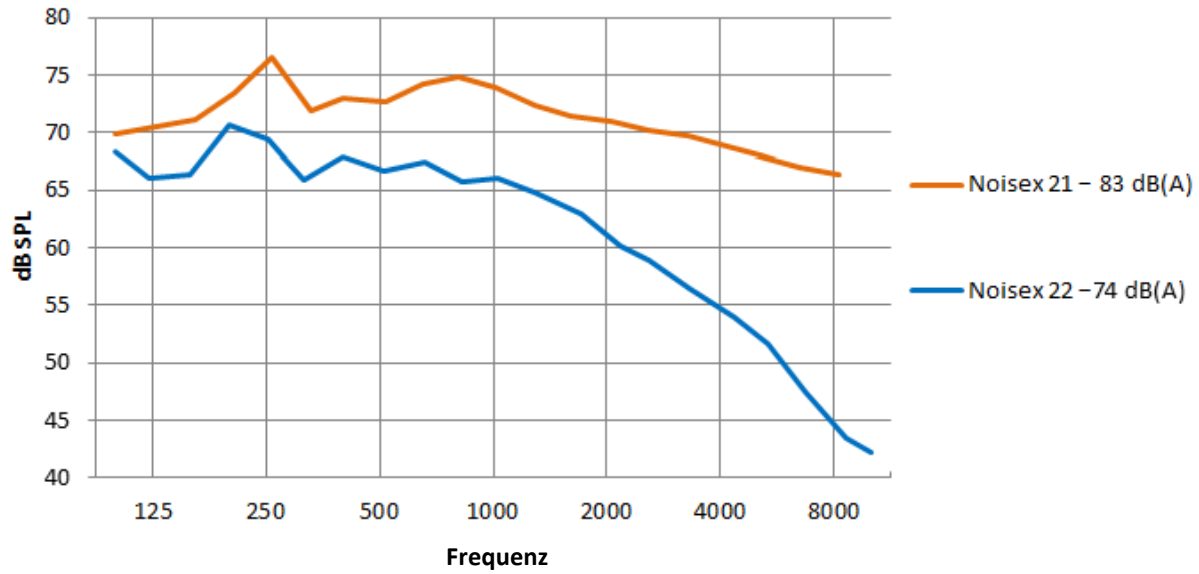


Abbildung 3: Spektrum von zwei stationären industriellen Geräuschen. Aufgenommen in einer Automobilfabrik, entnommen aus der Datenbank Noisex 1990, Daten aus Le Cocq C. (2011 [20])

2.3 Der Sprecher / Eigenschaft des nützlichen Signals

2.3.1 Sprechanstrengung in Bezug auf Lärm

2.3.1.1 Lombard-Effekt

Der Lombard-Effekt, der nach Etienne Lombard benannt wurde, ist ein Phänomen der menschlichen Aussprache (fundamentale Frequenzen, Lautstärke, Artikulation, Verlängerung der Vokale). Im Lärm passt der Sprecher seine Stimme automatisch an, um sich verständlich zu machen.

Das Diagramm (s.u.) gibt das Verhältnis, das in der Norm ISO 9921 definiert ist, zwischen der **Sprechanstrengung** (kontinuierliche Lautstärke, Äquivalent der Sprache bei 1 Meter) und dem **Umgebungsgeräuschpegel** beim Sprecher wieder.

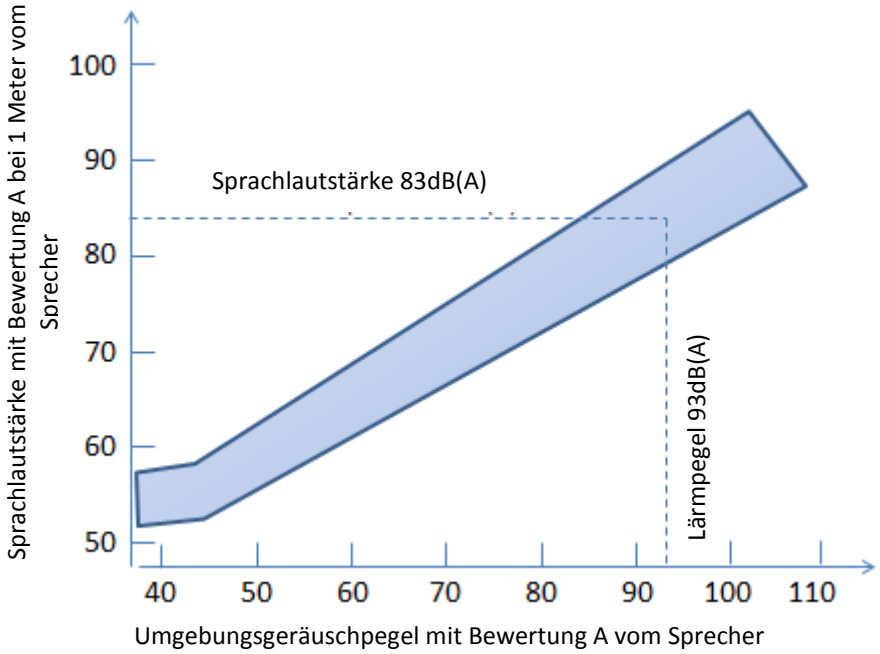


Abbildung 4: Verhältnis zwischen der kontinuierlichen Lautstärke, Äquivalent der Sprache bei einem Meter und dem Umgebungsgeräuschpegel (Auszug aus der Norm ISO 9921)

Je stärker der Sprecher seine Stimme erhebt (betrifft insbesondere Personen, die keinen Gehörschutz in Lärmbereichen tragen), desto stärker ist das Inhaltsspektrum der Botschaft verzerrt. Dadurch wird die Verständlichkeit der Botschaft verfälscht (Hétu, R., 1994 [2] , Pickett, J., 1956 [3]).

2.3.1.2 Verzerrung der Stimme

Mehrere Sprechlautstärken wurden von Kryter (1985 [5]) und Webster (1979 [4]) definiert. Wir stellen in Tabelle 1 fest, dass eine hohe Lautstärke einer weiblichen Stimme bei ca. 74dB liegt. Der Laustärkepegel eines Schreis oder einer Stimme mit maximaler Lautstärke konnten nicht lange durch die Person ohne Beifügen eines Verstärkersystems, gehalten werden.

Des Weiteren werden diese Lautstärkepegel bei geringer Distanz gemessen (bis maximal einem Meter). Je größer der Abstand zwischen den Personen, desto geringer wird die Lautstärke.

Sprechanstrengung	Gesamtlautstärkepegel - dB(A)
Maximal	88
Schrei	82
Sehr laut	74
Erhöht	65
Normal	57
Entspannt	50
Geflüstert	40

Tabelle 1: Sprechanstrengung, die mit den unterschiedlichen Sprechlautstärkepegeln in dB (A) bei einem Meter Abstand vor dem Sprecher gemessen wurde (Webster, 1979 [4])

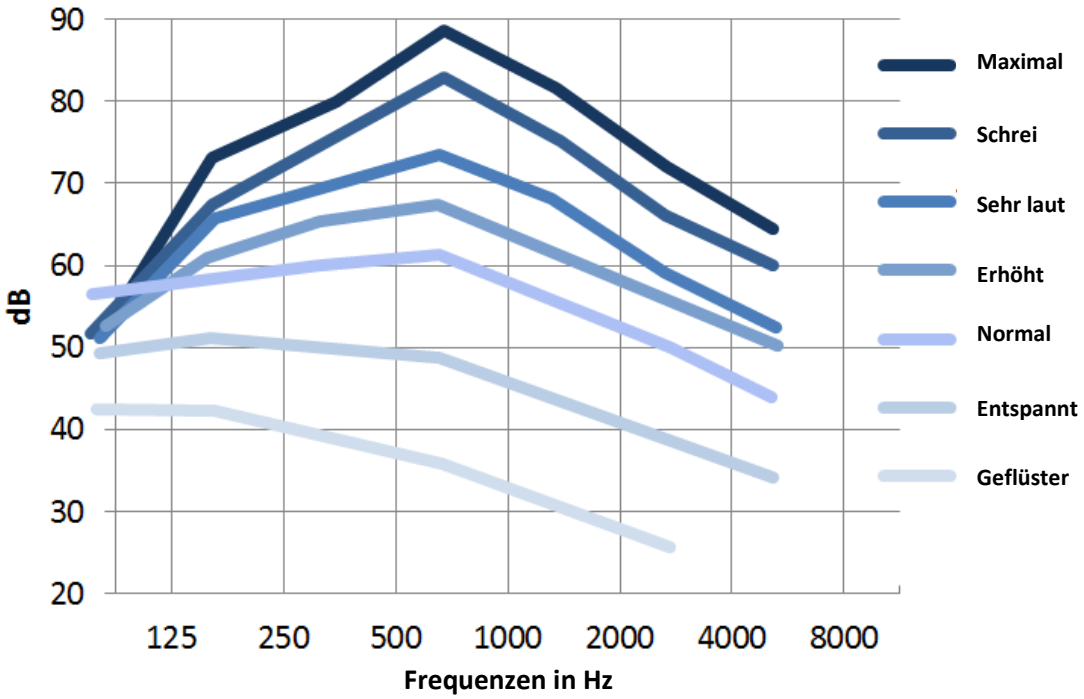


Tabelle 2?: Durchschnittsspektrum einer Sprache auf lange Sicht gesehen bei unterschiedlichen Sprechlautstärken einer Männerstimme bei einem Meter Abstand zur Testperson (Webster, 1979 [4])

Das Frequenzband der Männerstimme ist viel breiter als die der Frauenstimme. Es besteht ebenfalls ein Unterschied zwischen Männer- und Frauenstimmen in der Sprechanstrengung im Lärm.

Sprechlautstärke	Männer	Frauen
Normal	58	55
Erhöht	65	63
Laut	76	71
Schrei	89	82

Tabelle 3: Sprechlautstärke von Vortragenden, Männern und Frauen bei weniger als einem Meter Abstand gemessen (Kryter 1985 ***[5]****).*

2.3.1.3 Wirkung auf die Sprachverständlichkeit

Die Wirkung der Sprechanstrengung auf die Sprachverständlichkeit wurde von Pickett (1956 [3]) erfasst.
Die unten abgebildeten Kurven zeigen das Verhältnis zwischen Sprachverständlichkeit, die Sprechanstrengung sowie dem Signal-Rausch-Verhältnis.
Man stellt fest, dass die geflüsterte oder geschriene Stimme, sprich verzerrte Stimme, eine starke Abnahme in der Sprachverständlichkeit in den drei unterschiedlichen getesteten Signal/Lärm-Konfigurationen mit sich zieht. Das Signal-Rausch-Verhältnis hat naturgemäß eine direkte Auswirkung auf die Sprachverständlichkeit.

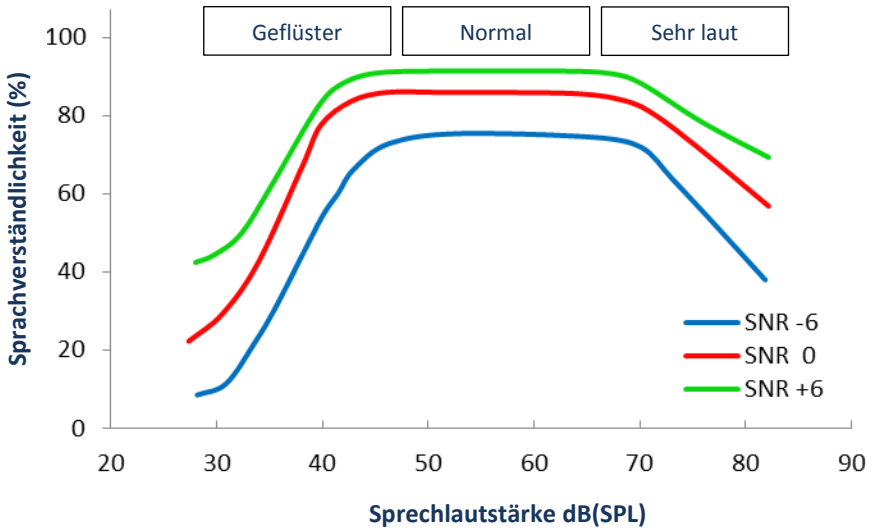


Abbildung 5: Verhältnis zwischen der Sprachverständlichkeit, der Sprechlautstärke und dem Signal-Rausch-Verhältnis. Nach Pickett (1956 [3])

2.3.2 Trageeffekt von Gehörschutz

2.3.2.1 Veränderung der Stimme

Mit dem Tragen eines Gehörschutzes, hört der Sprecher das Umfeld viel schwächer. Allerdings nimmt er seine eigene Stimme viel stärker wahr. Dieses Phänomen wird durch den Okklusionseffekt verursacht, der die Wahrnehmung von physiologischen Geräuschen verstärkt und die Wahrnehmung der Stimme verändert.
Aus diesem Grund ist es möglich, dass der Sprecher, aufgrund des Tragens eines Gehörschutzes, seine Sprechanstrengung automatisch an die Wahrnehmung seiner eigenen Stimme anpasst. Suter (1992 [6]) hat diesbezüglich zahlreiche Studien untersucht.

Howell und Martin (1975 [7]) haben insbesondere festgestellt, dass wenn ein Sprecher einen Gehörschutz trägt, die Verringerung der Sprechanstrengung 4 dB beträgt. Im Gegenzug ist diese Beobachtung ausschließlich für hohe Lärmpegel (93 dB) gültig und nicht für geringe Lärmpegel (54 dB). Hörmann, Lazarus-Mainka, Schubeius, und Lazarus (1984 [8]) haben diese Ergebnisse anschließend ebenfalls bestätigt.

Die Norm ISO 9921 sieht aus diesem Grund vor, dass die Sprechanstrengung des Sprechers mit Tragen von Gehörschutz um 3 dB verringert wird.

Dadurch, dass die Sprechanstrengung abnimmt, nimmt dadurch die Sprachverständlichkeit für den Hörer ebenfalls ab (Kryter 1946 [9], Robinson and Casali, 2000 [10], Gelfand, 2004 [11]).

Howell und Martin (1975 [7]) haben festgestellt, dass der Verlust der Verständlichkeit nicht nur auf die verringerte Sprechanstrengung zurückzuführen ist. Sie haben angenommen, dass die Personen, die einen Gehörschutz tragen auch wesentlich unklarer sprechen. Martin et al. (1976 [12]) haben die spektralen Unterschiede der Sprachqualität des Sprechers mit und

ohne Gehörschutz bewertet. Ihre spektrale Analyse wird in Abbildung 8**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** dargestellt und zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen den Sprechlautstärken bei geschlossenen sowie offenen Ohren (ca. 2 bis 3 dB (A)). Allerdings wurden keine signifikanten Unterschiede im Frequenzbereich festgestellt.

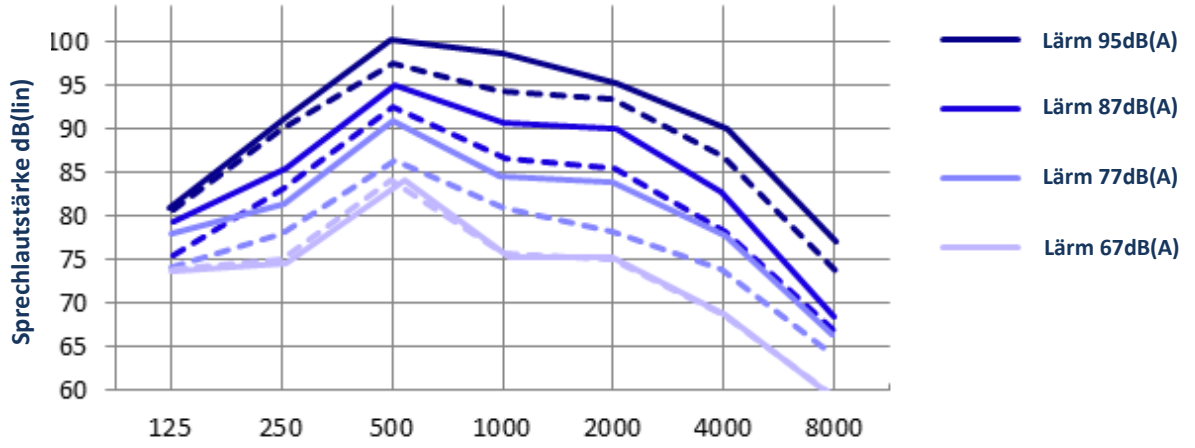


Abbildung 6: Durchschnittslärmpegel pro Oktavband von 67 bis 95 dB(A). Die Sprecher haben keine geschlossenen Ohren (durchgehende Kurve) oder tragen Gehörschutz (gestrichelte Kurve) (Martin, Howell, & Lower, 1976 [12]).

2.3.2.2 Sprechgeschwindigkeit des Sprechers:

Hörmann, Lazarus-Mainka, Schubeius, und Lazarus (1984 [8]) haben außerdem festgestellt, dass bei hohen Lärmpegeln (92 dB(A)), die Sprecher, die einen Gehörschutz tragen, schneller artikulieren und die Pausen zwischen den Wörtern und Sätzen um ca. 25% verringern. Die Schnelligkeit bei der der Informationsaustausch durchgeführt wird, die durch die Messung der Reaktionsgeschwindigkeit des Hörers erfasst wird, wird durch die Erhöhung des Lärmpegels und bei Tragen von Gehörschutz vom Sprecher und Hörer verringert.

2.4 Hörer/Wahrnehmung des Signals

2.4.1 Tragen von Gehörschutz sowie Hörbeeinträchtigungen

Das Tragen von Gehörschutz, vor allem von Gehörschutz mit gleichwertiger Dämmung auf allen Frequenzbändern, kann die Verständlichkeitsprobleme der Personen mit einer Hörbeeinträchtigung, verschlimmern.
Der Gehörschutz kann die akustischen Signale so stark verringern, dass diese unter die Hörschwelle der betroffenen Person fallen. Die folgende Grafik zeigt, die aus den Daten von Lazarus (1983 [13]) entnommen wurde, den Effekt eines hypotetischen Kapselgehörschutzes, bei dem Signal und Lärm bei einer normal hörenden Testperson und einer Testperson mit Hörbeeinträchtigung gedämmt wird.

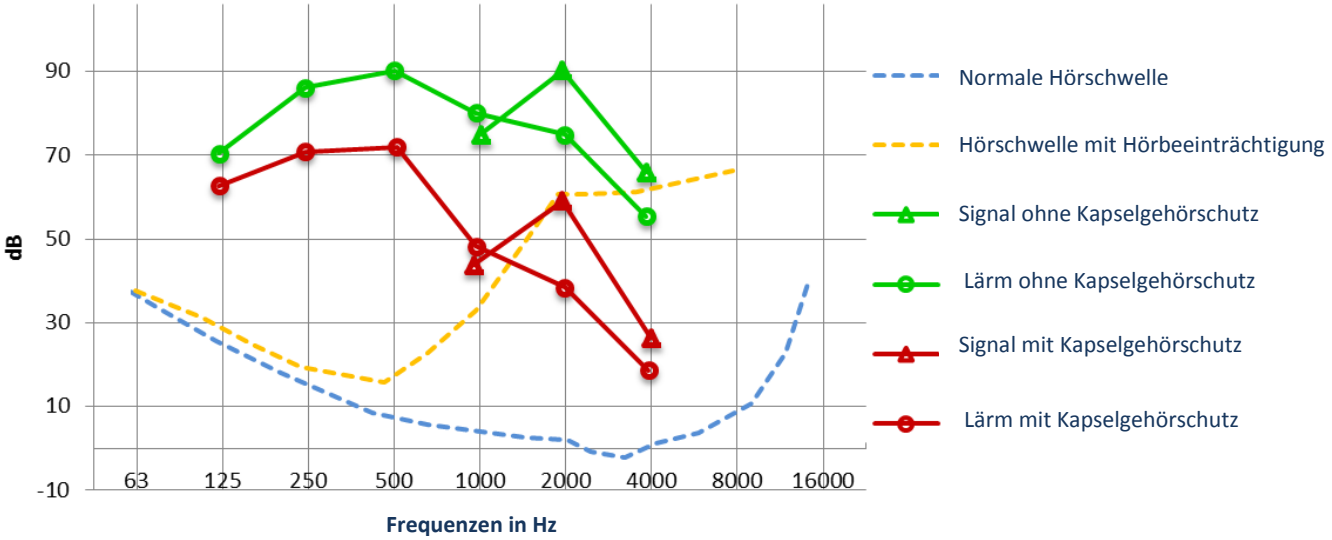


Abbildung 7: Effekt eines Kapselgehörschutzes bei Signal und Lärm bei einer normal hörenden (blaue Kurve) Testperson und einer Testperson mit einer neurosensoriellen Hörbeeinträchtigung (orangene Kurve). Die grünen Kurven geben Signal und Lärm am Ohr der Testperson ohne Kapselgehörschutz wieder. Daten entnommen von Lazarus (1983 [13])

Es wird dadurch klar, dass das Phänomen deutlich verstärkt wird, wenn der Gehörschutz die hohen Frequenzen sehr stark dämmt, was häufig der Fall ist.

2.4.2 Maskierungseffekt

Sobald die Hörschwelle eines Tons (maskiert) aufgrund eines anderen Tons (Maskierer) erhöht wird, spricht man von Maskierung. Die Maskierung tritt ein, wenn zwei akustische Signale gleichzeitig die Cochlea des Hörers erreichen. Ein sehr lautes Signal, das maskiert auf die Frequenz trifft, verursacht eine mehr oder weniger starke Maskierung anderer Töne auf benachbarte Frequenzen, entsprechend der Amplitude und der Frequenz des maskierten Signals.
Die Maskierungsphänomene sind komplex und die allgemeine Maskierungstheorie, eingeführt von Fletcher 1937, besteht immer noch nicht.

Es gibt viele Mechanismen im Bereich der Maskierung, die eine Rolle spielen. Einer davon ist das Phänomen „Busy line“. Die Neuronen, die für die Verschlüsselung des Signals zuständig sind, werden bei einem hohen Lärmpegel beansprucht. Die Refraktärzeit der neuronalen Entladung ermöglicht es nicht gleichzeitig Lärm- und Signalinformationen zu übermitteln. Das maskierte Signal besetzt die neuronale Leitung.

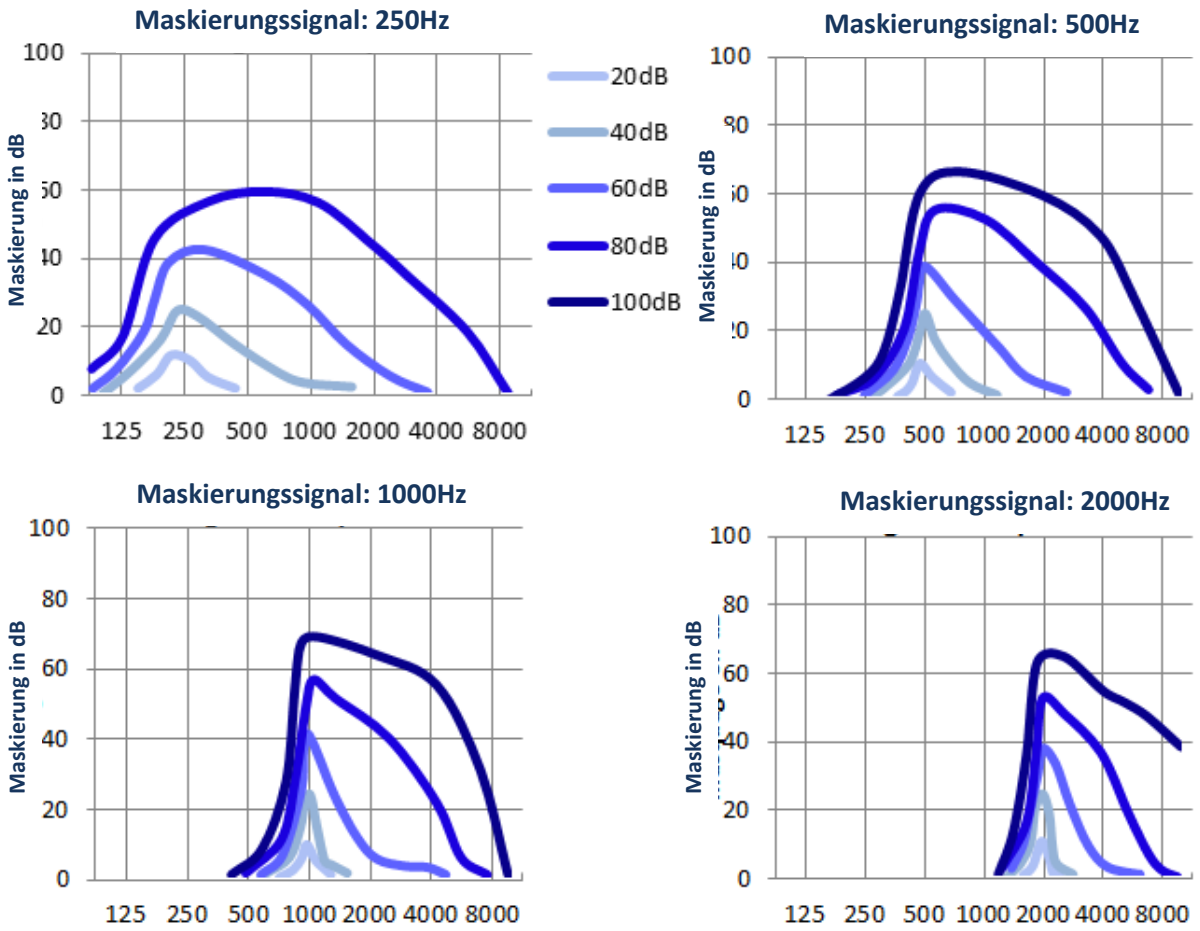


Abbildung 8: Verhalten der Maskierung, die durch unterschiedliche reine Töne und für unterschiedliche maskierte Signalpegel entstanden sind. Angepasst von Ehmer (1958 [21])

Man kann beobachten, dass der Effekt sich ab der maskierten Frequenz erstreckt. Diese fehlende Symmetrie zeigt das Verhalten unseres Innenohres bei dem die tiefen Töne die hohen Töne häufig zu maskieren scheinen.

Die industriellen Geräusche besitzen im Allgemeinen eine starke Energie in den tiefen Frequenzen. Der Maskierungseffekt, der durch diese Geräusche hervorgerufen wird, bedeckt fast das gesamte akustische Spektrum und verfälscht die Fähigkeit, die Sprachsignale wahrzunehmen, zu erkennen und zu verstehen.

Das Tragen von Gehörschutz verringert gleichzeitig das maskierte und das nützliche Signal. Die Verringerung des maskierenden Lärmpegels ruft eine Verringerung dieses Maskierungseffekts hervor.

Dennoch konnten wir feststellen, dass die Gehörschützer im Allgemeinen eine nicht gleichwertige Dämmung auf allen Frequenzbändern aufweisen, so dass die Dämmung in den hohen Frequenzen stärker ist. Die Verringerung des Maskierungseffektes, der durch das Tragen von Gehörschutz verursacht wird, ist somit weniger von Nutzen, insbesondere, wenn der Hörer unter einer Hörbeeinträchtigung leidet (Tran Quoc und Hétu, 1996 [14]).

2.4.3 Fähigkeit der Wiederherstellung der Botschaft

Die Sprachverständlichkeit ist selbstverständlich an die Klarheit des empfangenen Signals gebunden, das vom Sprecher, vom Umfeld und vom Hörer abhängt. Jedoch dürfen wir nicht vergessen, dass der Hörer die Fähigkeit besitzt, die Botschaft zu interpretieren.

Die Interpretation der Botschaften ist direkt mit der Beherrschung der Sprache selbst und mit dem Verständnis der enthaltenen Wörter in der Botschaft verbunden. Man stellt im Allgemeinen eine verringerte Verständlichkeit für die gleiche Botschaft fest, sollte der Sprecher und der Hörer Muttersprachler sein und eine zweite Sprache flüssig sprechen (ISO 9921).

Sollte das Signal stark verzerrt sein, wird die mentale Unterstützung eingesetzt. Es handelt sich hierbei um eine Interpretationsstrategie, die insbesondere von Personen benutzt wird, die schlecht hören, um das Wichtigste einer Unterhaltung zu erfassen, bei der nicht mehr als ein Viertel der Wörter verstanden wird.

Sollten sich die Gesprächspartner gegenüberstehen, kann außerdem das Lippenlesen eingesetzt werden. Die Fähigkeit Wörter auf den Lippen zu erkennen, hängt von der Erfahrung der Testperson und des Gesprächskontextes ab.

Die Frage der visuellen Indikatoren in der Frontalkommunikation wurde von Rink (1979 [15]) untersucht. Rink hat beobachtet, dass in einem lärmenden Umfeld, schlecht- bzw. normal Hörende bessere Ergebnisse mit visuellen Indikatoren erzielen und dies unabhängig vom getesteten Gehörschutz. Howell und Lower (1976 [12]) haben vorher festgestellt, dass das Vorhandensein von visuellen Indikatoren die Unterschiede zwischen den erhaltenen Ergebnissen mit verschlossenen und offenen Ohren verringert. Bei hohen Lärmpegeln, steigen die Ergebnisse der Erkennung um 30%.

2.5 Rahmenbedingungen

2.5.1 Beeinflussung der Distanz zwischen den Gesprächspartnern bzgl. der Lautstärke des empfangenen Signals:

Der Lärmpegel am Ohr des Hörers kann mithilfe der Stimmenlautstärke des Sprechers und der Distanz zwischen den Gesprächspartnern geschätzt werden.

Abstand zwischen Gesprächspartner	Maximaler Pegel am Ohr, wenn mit folgender Lautstärke gesprochen wird, um sich zu verstehen:			
	Schreiende Stimme	**Sehr laute Stimme**	**Laute Stimme**	**Normale Stimme**
15 cm	90 dB(A)	84 dB(A)	78 dB(A)	72 dB(A)
30 cm	84 dB(A)	78 dB(A)	72 dB(A)	66 dB(A)
60 cm	78 dB(A)	72 dB(A)	66 dB(A)	60 dB(A)
120 cm	72 dB(A)	66 dB(A)	60 dB(A)	54 dB(A)

Tabelle 5: Diese Tabelle (ohne vorgeschriebenen Wert), ermöglicht eine Schätzung bzgl. der Lautstärke eines Sprechsignals beim Ohr des Hörers (Phan Chan The, (2003) [22]).

Diese Schätzungen können mit folgender Berechnungsformel ermittelt werden:
$L = L_{1m} - 20Log(d)$
L: Lautstärke am Ohr des Hörers in dB
L_{1m}: Lautstärke bei 1 Meter vom Hörer entfernt in dB
d: Distanz zwischen den Gesprächspartnern

Dieses Verhältnis ist gültig bis zu 2 Metern, sogar 8 Metern unter gewissen festgelegten Bedingungen aus der Norm ISO 9921. Indem die Messung der Lautstärke einer erhobenen Stimme bei einem Meter bekannt ist (Webster, 1979 [4]), kann die wahrgenommene Lautstärke bei anderen Distanzen geschätzt werden.

2.5.2 Richtwirkung des Kopfes:

Der Winkel zwischen Signalquelle und Kopf des Hörers hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die akustische Wahrnehmung. Manche Frequenzen werden mehr oder weniger vom Winkel der akustischen Quelle wie der Stimme, gedämmt.

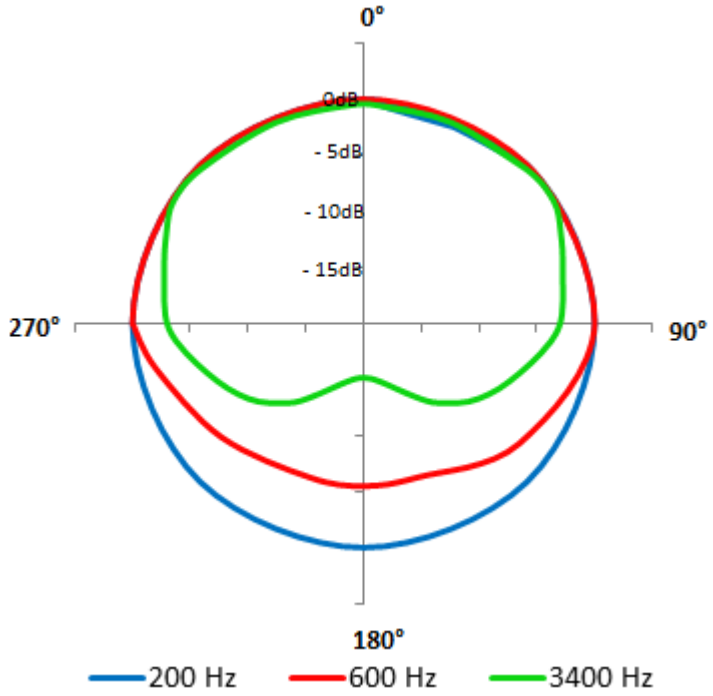


Abbildung 9: Schema der Richtwirkung des menschlichen Kopfes.
Daten entnommen von Delétré (2001 [16])

Im Allgemeinen sind die tiefen Frequenzen von dieser Richtwirkung weniger stark betroffen als die hohen Frequenzen.

3 Messungsverfahren der Verständlichkeit

3.1 Objektive Methoden

3.1.1 SIL-Verfahren

Der Sprach-Interferenz-Pegel (Speech Interference Level) ermöglicht ein einfaches Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Sprachverständlichkeit bei einer **direkten Kommunikation** in einer **lärmerfüllten Umgebung**.

Berücksichtigte Parameter:

- Arithmetischer Durchschnitt des **Lärmspektrums**
- Sprechanstrengung des Sprechers
- Distanz zwischen Sprecher und Hörer

Der SIL ist eine Berechnung des Lärmsignals:
$SIL = L_{SAL} - L_{SIL}$
Sprich SIL = Lautstärke der Sprache – Lärminterferenzpegel

Berechnung des Lärmintereferenzpegels L_{SIL}
Bei dem SIL-Verfahren ist der Lärmintereferenzpegel der Sprache (L_{SIL}) im arithmetischen Durchschnitt des Umgebungsgeräuschpegels der vier Oktavbänder folgender:
500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz et 4 000 Hz.

$$LSIL = \frac{1}{4} \sum L_{N,oct}$$

3.1.1.1 Schätzung der Sprechanstrengung L_{SAL}

3.1.1.1.1 Berücksichtigung des Lombard-Effekts

Wir haben in den vorherigen Kapiteln gesehen, dass die Sprechanstrengung vom Umgebungsgeräusch abhängt (Norm ISO 9921). In Abbildung 10 können wir feststellen, dass die Sprechanstrengung (kontinuierlicher äquivalenter Lautstärkepegel der Sprache) bei einem Meter bei einer Umgebungslärmaussetzung variiert.

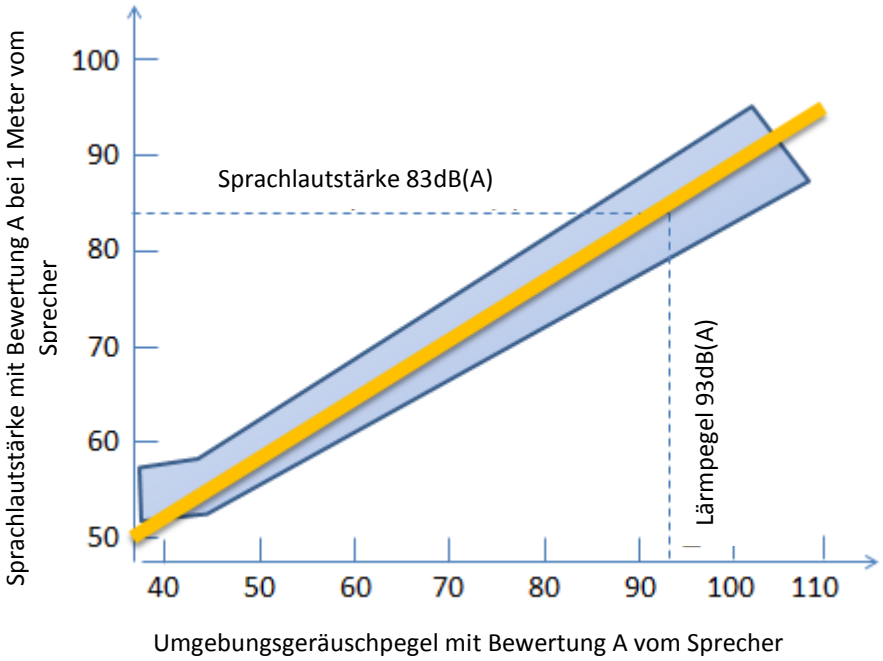


Abbildung 10: Verhältnis zwischen dem kontinuierlichen äquivalenten Lärmpegel der Sprache bei einem Meter Entfernung und dem Umgebungsgeräuschpegel, in gelb, eine Schätzung dieses Verhältnisses.

Das Verhältnis, das in Abbildung 10 gezeigt wird, wird folgendermaßen geschätzt:

$L_{SA1m} = 0{,}57 \times L_{NAS} + 30$ (gelbe Kurve s.o.)

oder: L_{SA1m} ist der Schallpegel der Sprache bei einem Meter des Sprechers
und: L_{NAS} ist der Umgebungsgeräuschpegel mit Bewertung A vom Sprecher

3.1.1.1.1.1 Berücksichtigung des Gehörschutzes

Wenn das Umgebungsgeräusch > 75 dB liegt, so verringert sich die Sprechanstrengung des Sprechers um 3dB.

3.1.1.1.1.2 Verringerung der Sprachqualität

Wenn die Leistung > 75dB liegt, so sinkt die Sprachqualität.
Dieser Verfall kann berücksichtigt werden, indem die Sprechleitung um 0,4*(LSAM1-75) verringert wird.

3.1.1.1.1.3 Berücksichtigung der Distanz zwischen den Gesprächspartnern

$$L_{SAL} = L_{SA1m} - 20\log\left(\frac{r}{r0}\right)$$

oder:
r ist die Distanz in Metern zwischen Sprecher und Hörer;
$r0 = 1m$

3.1.1.1.1.4 Berücksichtigung der Muttersprache

Es werden 4 dB abgezogen, sollte der Sprecher und/oder der Hörer nicht in der eigenen Muttersprache kommunizieren.

Beispiel der Nutzung des SIL-Verfahrens:
- bei einem Umgebungsgeräuschpegel von 80 dB, hat der Sprecher eine Sprechanstrengung von 72,6 dB (Lombard-Effekt)
- Es handelt sich hierbei um das weiße Rauschen

$SIL = 80 - 72{,}6 = -7{,}4$
Dies entspricht einer „schlechten“ Verständlichkeit gemäß der Norm ISO 9921.

Dieser Index ist einfach zu berechnen, bleibt jedoch sehr ungenau. Der Hauptmangel dieses Verfahrens ist die **Nichtberücksichtigung von Elementen des Signal- und Lärmspektrums**. Denn dies ist die Information, die wir benötigen, um den **Einfluss der Gehörschützer mit gleichwertiger Dämmung** auf allen Frequenzbändern **auf die Verständlichkeit** zu bewerten. Der SIL ist ein praktisches Mittel, jedoch ungeeignet für unsere Anwendung.

3.1.2 STI-Verfahren

Das STI-Verfahren wird in der Norm ISO 9921 und IEC 606268 beschrieben, sowie in Basics of the STI measuring method (Referenzdokument von Steeneken et Houtgast [17]):

Im Gegensatz zum SIL, ist dieses Verfahren **viel präziser und berücksichtigt die Elemente der Signal- und Lärmspektren.** Dieses Verfahren wird insbesondere eingesetzt, um die Qualität in Bezug auf die Verständlichkeit eines **Übertragungskanals** zu bewerten (Teil, Übertragungssystem etc.). Neben der genutzten Parameter des SIL-Verfahrens, berücksichtigt dieses Verfahren **akustische Eigenschaften des Umfelds** (Schallreflexionen, Echo etc.).
Das STI-Verfahren wurde ursprünglich zur Erstellung von **Messungen** entwickelt. Hierfür wurde ein spezifisches Testsignal entwickelt, das nach seiner Entsendung über einen Testkanal einer komplexen Analyse unterzogen wurde, um anschließend das effektive **Signal-Rausch-Verhältnis** in unterschiedlichen Frequenzbändern zu bestimmen und um den STI zu berechnen.

Diese Bearbeitungen sind schwierig umzusetzen. Allerdings können wir das **Signal-Rausch-Verhältnis mit Hilfe der Berechnungen** ohne Messung abschätzen. Wir können außerdem annehmen, dass im Fall einer **direkten Kommunikation**, die Positionen des Sprechers und des Hörers allgemein nah sind. Die akustischen Eigenschaften des Umfelds können somit nur einen **geringen Effekt** auf die Sprachverständlichkeit haben.

Auf diese Weise können wir dieses **Verfahren nutzen, um die Sprachverständlichkeit folgender Faktoren vorherzusagen:**

- im Oktavband wahrgenommener Lärmpegel
- im Oktavband wahrgenommenes Signal
- Distanz zwischen den Gesprächspartnern

Berechnung einer Schätzung des Signal-Lärm-Verhältnisses im Oktavband:

Laut STI-Verfahren, sind die Signal-Lärm-Verhältnisse in der Palette -15 dB bis +15 dB linear an den Beitrag zur Verständlichkeit in der Palette 0 bis 1 gebunden. Somit wird das tatsächliche Signal-Lärm-Verhältnis in einen entsprechenden Übertragungsindex (TI_k) spezifisch des Oktavbandes k gemäß folgender Gleichung, umgewandelt:

$$\boldsymbol{Tl_k} = \frac{\mathrm{SNR_{kdB}} +15}{30}$$

Der korrigierte Übetragungsindex der Sprache wird ermittelt, indem eine bewertete Addition der Modulationsindexen für die sieben Oktavbänder mit den entsprechenden Redundanzkorrekturen durchgeführt wird.

$$STir = \sum_{k=1}^{7} \alpha_k \mathrm{TI}_k - \sum_{k=1}^{6} \beta_k \sqrt{\mathrm{TI}_k \times \mathrm{TI}_{k+1}}$$

wo:
die Faktoren α_k sind die bewerteten Faktoren der Oktave;
β_k sind die Faktoren der Redundanzkorrekturen.

Hier ein Berechnungsbeispiel des STIr

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Eingesetzter Lärm dBA	70.4	74.2	72.4	69.9	60	58.5	39.3
Männerstimme dBA	59	67	58.3	61.7	59.9	59.3	55.1
Dämmung des Gehörschutzes	8.7	9.1	12.1	19.2	27.4	31.4	39.1
Signal/Lärm am Ohr	-11.40	-7.20	-14.10	-8.20	-0.10	0.80	15.80
TI Übetragungsindex	0.12	0.26	0.03	0.23	0.50	0.53	1.00
STIr	**0.42**						

Tabelle 6: Berechnungsbeispiel des STIr-Indexes in Bezug auf den Lärm- und Signalpegel am Ohr des Hörers im Oktavband. Die Übetragungsindexe werden pro Oktavband berechnet. Der STIr ist eine bewertete Addition des TI.

3.1.3 STI-Verfahren unter Berücksichtigung der Maskierung und der Hörschwelle

Wie wir bereits gesehen haben, können wir den STI nutzen ohne die akustischen Eigenschaften des Umfelds zu berücksichtigen. Somit wird der Verständlichkeitsindex ausschließlich ab dem Lärm-, Signal- und Distanzspektrum zwischen den Gesprächspartnern berechnet.
Das bedeutet, dass der STI ausschließlich vom Signal-Lärm-Verhältnis, das vom Benutzer wahrgenommen wird, pro Oktavband berechnet wird.

Bei klassischen akustischen Filtern, auch linear genannt (gleichwertig oder nicht), unabhängig des Kurvenabfalls des eingesetzten passiven Filters, liegt bei dem Lärmsignal und dem Sprachsignal die gleiche Filterung vor.
Somit ist der Koeffizient des Lärmsignals unverändert, unabhängig davon, welcher lineare Gehörschutz benutzt wird.
Beispiel auf dem Oktavband 1000Hz, bei dem Signal-Lärm-Verhältnis von 20 dB:

Aus diesem Grund kann der STI, wie er vorher definiert wurde, nicht den Kurvenabfall des Gehörschutzes berücksichtigen.

Hierfür müssen die Frequenzmaskierung und die Hörschwelle, wie in der Norm EN 60628-16 beschrieben, berücksichtigt werden.

Denn ein sehr hoher Lärmpegel wird eine stärkere Maskierung der Information durch die Stimme hervorrufen. Auch wenn das Stimmsignal zu schwach ist, kann der Hörer einen Teil der Information (dieses Signal kann unter der Hörschwelle des Hörers liegen) überhören und dies unabhängig vom Signal-Lärm-Verhältnis.

Bei der Berechnung wird der Modulationsindex mk für jedes Oktavband an dem Signal-Lärm-Verhältnis berechnet, das vorher geschätzt wurde.

$$mk = \frac{10^{SNR / 10}}{1 + 10^{SNR / 10}}$$

Die auditive Maskierung und die Hörschwelle rufen eine Verringerung des Modulationsindexes hervor:

$$m'_k = m_k \frac{I_k}{I_k + I_{am,k} + I_{rs,k}}$$

- I_k stellt den gesamten Lärmpegel (Lärm und Stimme) dar, der vom Hörer wahrgenommen wird.
- $I_{rs,k}$ stellt die Hörschwelle pro Oktavband dar, die in der Norm IEC 60628-16 zur Verfügung steht,
- $I_{am,k}$ stellt die Lautstärke des fehlenden Signals auf dem Oktavband k dar.

Der Maskierungseffekt, wie dieser im STI-Verfahren dargestellt wird, hängt nicht vom betrachteten Frequenzband ab, sondern vom Lärmpegel. So verringert sich beispielsweise bei einem wahrgenommenen Lärmpegel zwischen 55 und 65 dB der Kurvenabfall der Maskierung um 35 dB pro Oktave. Der Gesamtlärmpegel (Lärm und Signal in unserem Fall) auf einem Oktavband ruft einen Maskierungseffekt auf dem direkt höherliegenden Oktavband hervor. Auf diese Weise können wir den lmk berechnen, die Lautstärke des Maskierungssignals.

Ab dem korrigierten Modulationsindex mk, wird das effektive Signal-Lärm-Verhältnis für den Hörer neu berechnet:

$$SNR_k = 10 \log \frac{m'_k}{1 - m'_k} dB$$

Die neuen Übetragungsindexe werden neu berechnet, um einen korrigierten STI zu erhalten:

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Eingesetzter Lärm dB(A)	70.4	74.2	72.4	69.9	60	58.5	39.3
Männerstimme dB(A)	59.0	67.0	58.3	61.7	59.9	59.3	55.1
Dämmung des Gehörschutzes	8.7	9.1	12.1	19.2	27.4	31.4	39.1
Signal/Lärm am Ohr	-11.40	-7.20	-14.10	-8.20	-0.10	0.80	15.80
TI Übetragungsgindex	0.12	0.26	0.03	0.23	0.50	0.53	1.00
STIr brutto	**0.42**						
Modulationsindex mk	0.07	0.16	0.04	0.13	0.49	0.55	0.97
Korrigierter Modulationsindex mk '	0.04	0.11	0.03	0.12	0.41	0.43	0.56
Signal/Lärm korrigiert	-13.94	-8.93	-14.92	-8.79	-1.61	-1.18	1.02
TI korrigiert	0.04	0.20	0.00	0.21	0.45	0.46	0.53
STIr korrigiert	**0.33**						

Tabelle 7: Berechnungsbeispiel des korrigierten STIr. Die Modulationsindexe werden neu berechnet, um die Maskierung und die Hörschwellen zu berücksichtigen.

Dieser neue Index wird somit folgendermaßen berechnet: Lärmpegel pro Oktavband, Signalpegel vom Sprecher ausgesandt pro Oktavband, Distanz zwischen den

Gesprächspartnern und der Dämmung des Gehörschutzes pro Oktavband. Neben dem Signal-Lärm-Verhältnis, das vom Hörer wahrgenommen wird, wird der Maskierungseffekt und die Hörschwelle, die vom Tragen des Gehörschutzes beeinflusst wird, berücksichtigt.

3.2 Die subjektiven Tests

In der Sprachaudiometrie unterscheidet man zwischen Verständlichkeitstests und phonetischen Tests.

3.2.1 Phonetische Tests

Diese Tests dienen zur Erforschung der Wahrnehmung von Phonemen.
Das Untersuchungsmaterial können Wörter sein (Cochleare Listen von Lafon) oder Logatome *(Logatom = ein- wie mehrsilbige Wörter, die in der untersuchten Sprache keine Bedeutung besitzen).*
Es werden gleichwertige und homogene phonetische Listen für eine detaillierte Analyse genutzt.

3.2.2 Verständlichkeitstests

Diese Tests dienen dazu, die Gesamtverständlichkeit der Sprachsignale zu bewerten. Es gibt folgende Sprachtests:

→ **Der Konsonant/Vokal/Konsonant-Worttest** (3 Buchstaben – Konsonant-Vokal-Konsonant)
Wörter ohne Sinn
Phonetisch ausgeglichen, um das Verhältnis in der Sprache darzustellen

→ **Der einsilbige Worttest**
Wörter, die einen Sinn ergeben
Phonetisch ausgeglichen, um das Verhältnis in der Sprache darzustellen
Diese Listen werden selten genutzt, da diese schwierig sind.

→ **Der zweisilbige Worttest (Listen von Fournier)**
Wörter, die einen Sinn ergeben
Phonetisch ausgeglichen, um das Verhältnis in der Sprache darzustellen
Diese Listen werden am häufigsten genutzt

→ **Der Satztest**
Im Allgemeinen sind, sobald die Kenntnisse des Hörers sich in folgenden Bereichen unterscheiden, die Satztests nicht zu empfehlen, um die Übetragungssysteme zu bewerten:
- Grammatik,
- Bedeutung,
- Syntax, die die Ergebnisse beeinflussen

Des Weiteren sind die Listen zu einfach.

Eine weitere Schwierigkeit besteht im **Aufbau einer Vielzahl von Sätzen, die die Sprache phonetisch** darstellt und die eine definierte Komplexität aufweist.

Im Rahmen unseres subjektiven Sprachtests, benutzen wir die Listen von Fournier, die von der französischen Schule für Hörgeräteakustik (Collège National d'Audioprothèse) auf CD zur Verfügung gestellt wurden.

3.3 Verhältnis zwischen den Methoden

Die Ergebnisse der unterschiedlichen objektiven und subjektiven Methoden wurden miteinander verglichen. Die Norm ISO 9921 schlägt folgende Tabelle vor, die eine Relation zwischen den unterschiedlichen Verständlichkeitsindexen angibt (Norm ISO 9921, 2004):

Bewertung der Verständlichkeit *a*	Bewertung nach Satz *b* %	Bewertung nach Wortart, phonetisch ausgeglichen mit Sinn *c* %	Bewertung nach Wortart nach KVK ohne Sinn %	STI %	SIL *d*	SII *d*, *e*
Hervor-ragend	100	> 98	> 81	> 0, 75	21	-
Gut	100	93 bis 98	70 bis 81	0,60 bis 0,75	15 bis 21	> 0, 75
In Ordnung	100	80 bis 93	53 bis 70	0,45 bis 0,60	10 bis 15	-
Schwach	70 bis 100	60 bis 80	31 bis 53	0,30 bis 0,45	3 bis 10	< 0, 45
Schlecht	< 70	< 60	< 31	< 0, 30	< 3	-

Tabelle 8: Bewertung der Verständlichkeit und Verhältnis zwischen den unterschiedlichen Verständigungsindexen gemäß der Norm ISO 9921;siehe Norm ISO 9921 für die Anmerkungen a, b, c, d und e.

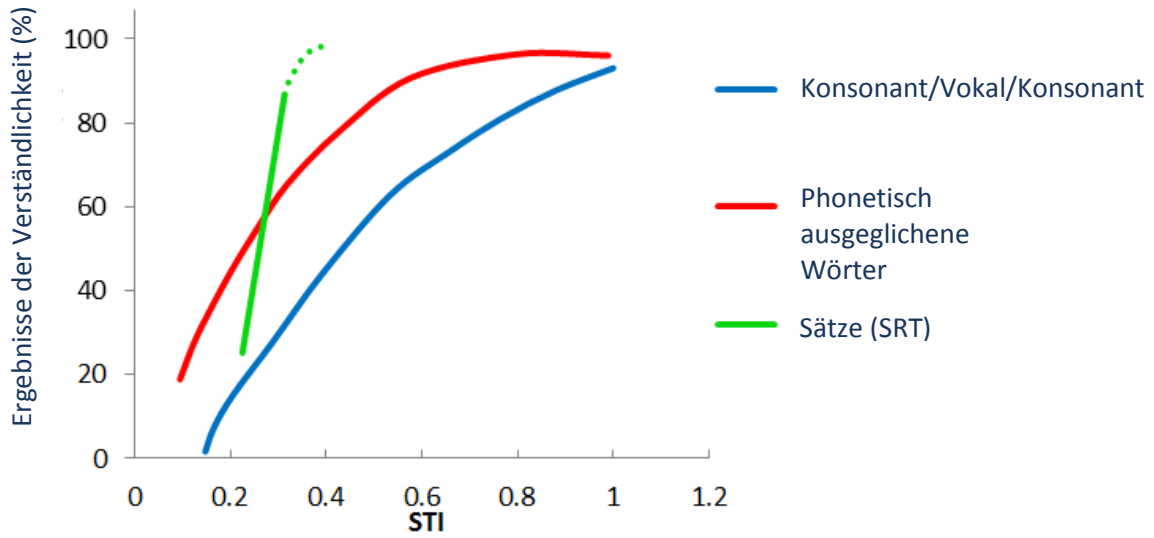


Abbildung 11: Verhältnis zwischen STI und den subjektiven Verständlichkeitstests, Daten aus ISO 9921.

Die folgenden Kurven geben das Verhältnis des STI mit den häufigsten subjektiven Methoden wieder.

Testprotokoll:
Um den Einfluss des Tragens von Gehörschutz auf die Verständlichkeit der Kommunikation im Lärm zu erfassen, haben wir einen subjektiven Test erstellt.

Es wurden 22 Testpersonen stationären Umgebungsgeräuschen mit unterschiedlichen Gehörschützern, die vom Hersteller als „gleichwertig“ und „nicht gleichwertig“ bezeichnet wurden, ausgesetzt.

Ein aufgezeichnetes Sprachsignal entsendet Wortlisten. Die Testperson schreibt das verstandene Wort auf einem Blatt Papier auf. Das erfasste Ergebnis der Verständlichkeit wird in % der erkannten Wörter bewertet.

3.3.1 Getestete Modelle

Wir haben 6 Gehörschutzmodelle getestet: A22, A26, A33, B16, B23, B26. Die Gehörschützer der Palette B werden als gleichwertig bezeichnet, im Gegensatz zu den Gehörschützern der Palette A.

Untenstehend die Eigenschaften der getesteten Gehörschützer:

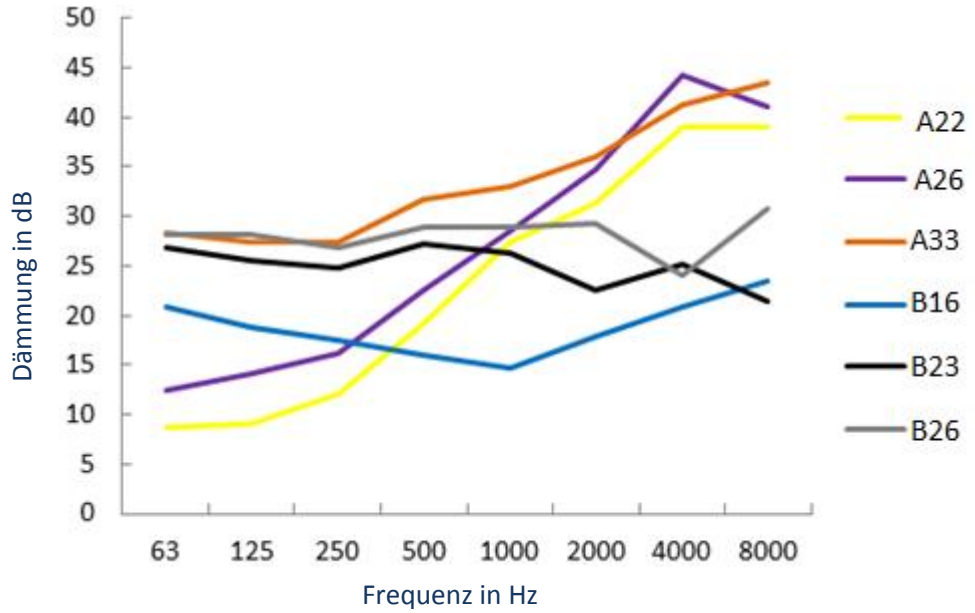


Abbildung 12: Zertifizierte Durchschnittsdämmung der im Oktavband getesteten Gehörschützer

	Dämmung SNR	Kurvenabfall
A22	22	17
A26	26	16
A33	33	7
B16	16	2
B23	23	-3
B26	26	-1

Tabelle 90: SNR und Kurvenabfall der Filter

Die Reihenfolge in der die Gehörschützer von den Testpersonen getestet wurden, basiert auf dem Zufallsprinzip. Vor dem Test des Gehörschutzes, wird die Testperson mit Hilfe von einigen Listen vorbereitet.

3.3.2 Die Testpersonen

Die Gruppe der Testpersonen besteht aus 22 Personen, normalhörend, zwischen 21 und 41 Jahren, 6 Frauen und 16 Männern, mit einer guten Beherrschung der französischen Sprache sowie mit einem guten Hörvermögen.

3.3.3 Die Testvorrichtung

Das aufgenommene Sprachmaterial wird über einen Lautsprecher mit einem Meter Abstand vom Benutzer ausgestrahlt. Der aufgenommene Lärm wird über zwei lateral positionierte Lautsprecher ausgestrahlt.

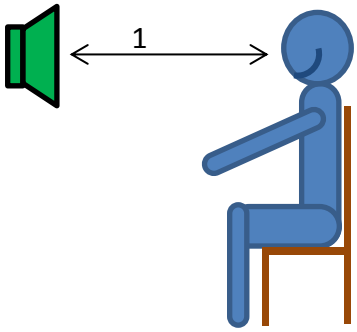


Abbildung 13: Seitenansicht, die Testperson positioniert sich mit einem Meter Abstand frontal zur Sprachquelle. Sitzend schreibt die Testperson die Wörter auf, die sie versteht.

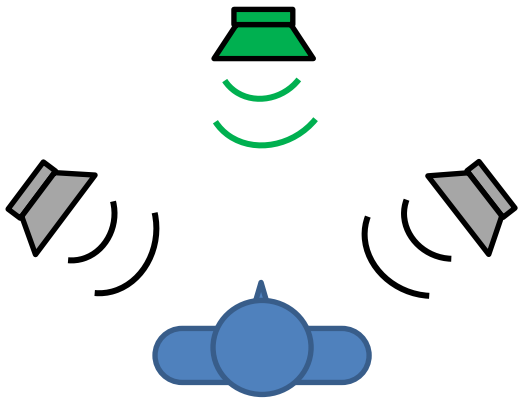


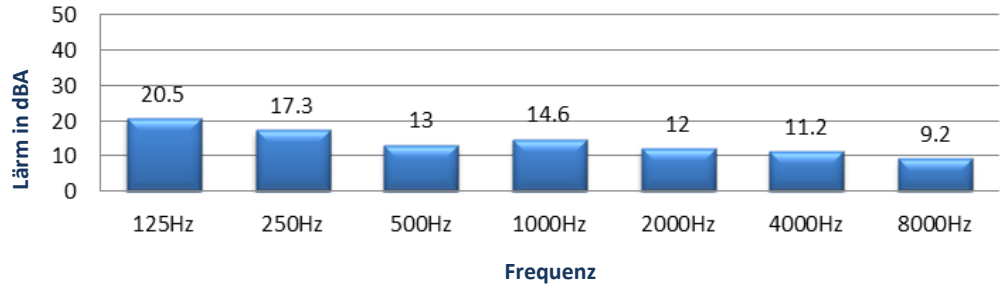
Abbildung 14: Oberansicht, während des Tests. Das Sprachmaterial wird frontal zur Testperson ausgestrahlt, der Lärm wird auf zwei identischen Lautsprechen abgespielt.

Die gesamten Lärm- bzw. Sprachmessungen wurden in dB(A) pro Oktavband gemessen, mit Hilfe eines integrierten Lärmpegelmessgeräts, indem das **Mikrofon in Höhe des Kopfes der Testperson** positioniert wird.

Unter diesen Bedingungen werden bei dem Test die visuellen Indexe, das Lippenlesen oder der Kontext der Verbreitung der Botschaft nicht berücksichtigt.

Die Tests werden in einem verstärkt akustisch isolierten Raum durchgeführt. Der Raum wurde jedoch nicht dafür konzipiert, Körperschall, der über den Boden übertragen wird, abzuhalten.

Das untenstehende Säulendiagramm zeigt die Lärmpegel im ruhigen Raum an (ohne das Hinzufügen von künstlichen Geräuschen):



3.3.4 Das Sprachmaterial

Im Rahmen des subjektiven Tests, haben wir die Listen von Fournier mit einer Männerstimme, die die französische Schule für Hörgeräteakustik (Collège National d'Audioprothèse) auf CD zur Verfügung gestellt hat, gewählt. Diese Listen haben den Vorteil, dass die französische Sprache phonetisch repräsentativ dargestellt wird. Jede Liste enthält 10 Wörter jeweils zweisilbig, die einen Sinn ergeben. Die aufgenommenen Wörter werden klar und mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit ausgesprochen.

Bei der gesamten Studie haben wir einen Schallpegel der Stimme von 70 dB (A) festgelegt, die bei der Testperson gemessen wird.
Um die Stimme zu messen, wurden die Sprechpausen zwischen den Wörtern informatisch gelöscht, um den Durchschnittsschallpegel des Sprechsignals im Oktavband bei der Testperson zu messen.

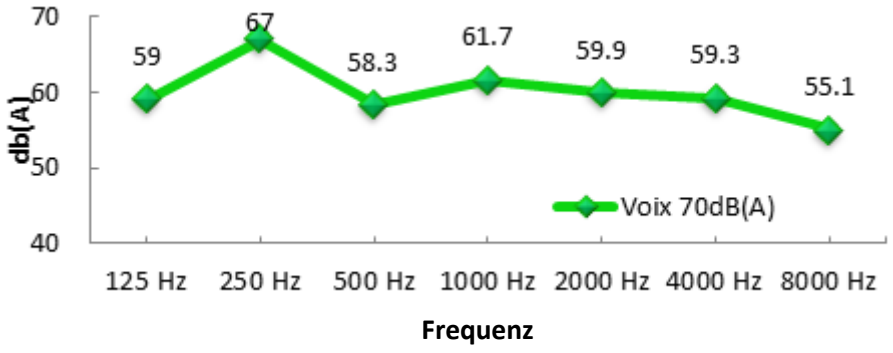


Abbildung 15: Schallpegelmessung der Stimme, im Oktavband bei der Testperson gemessen. Der Pegel in dB(A) liegt bei 70.

3.3.5 Geräuschbelastende Umgebungen

Jeder Gehörschutz wird nach folgenden Kriterien getestet:

Es handelt sich um einen aufgenommenen stationären Lärm mit hauptsächlich tiefen Frequenzen, der anschließend in 8 Geräusche zwischen insgesamt 78 und 92 dB unterteilt wird. Die frequenzielle Zusammenstellung dieser Testgeräusche wird untenstehend vorgestellt:

In Abbildung 17 wird der prozentuale Durchschnitt der erkannten Wörter der 22 Testpersonen in den unterschiedlichen Lärmbereichen für jeden Gehörschutz dargestellt.

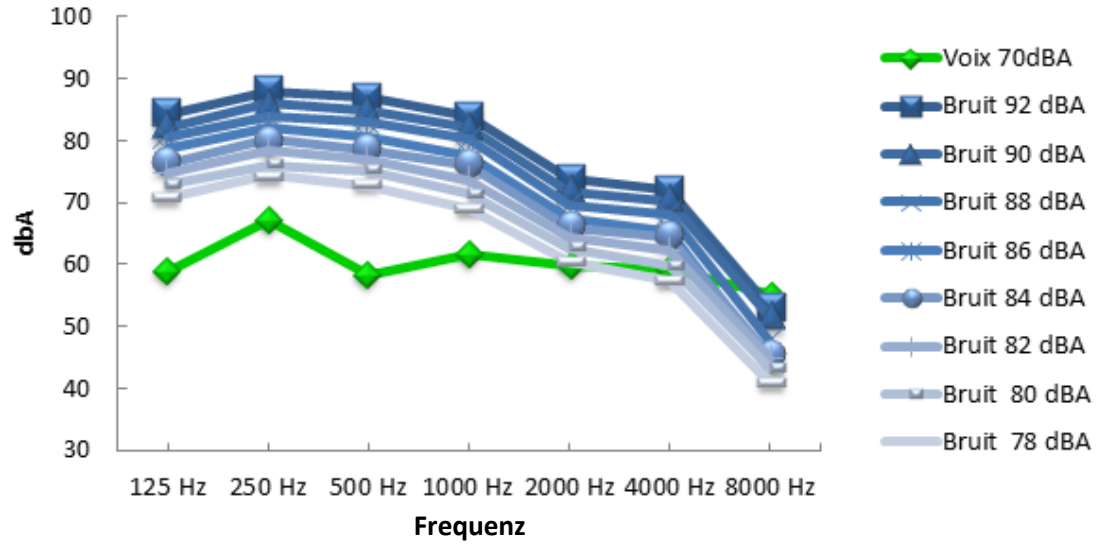


Abbildung 16: Schallpegelmessung der Stimme, im Oktavband bei der Testperson gemessen. Der Pegel in dB(A) variiert zwischen 78 bis 92dB.

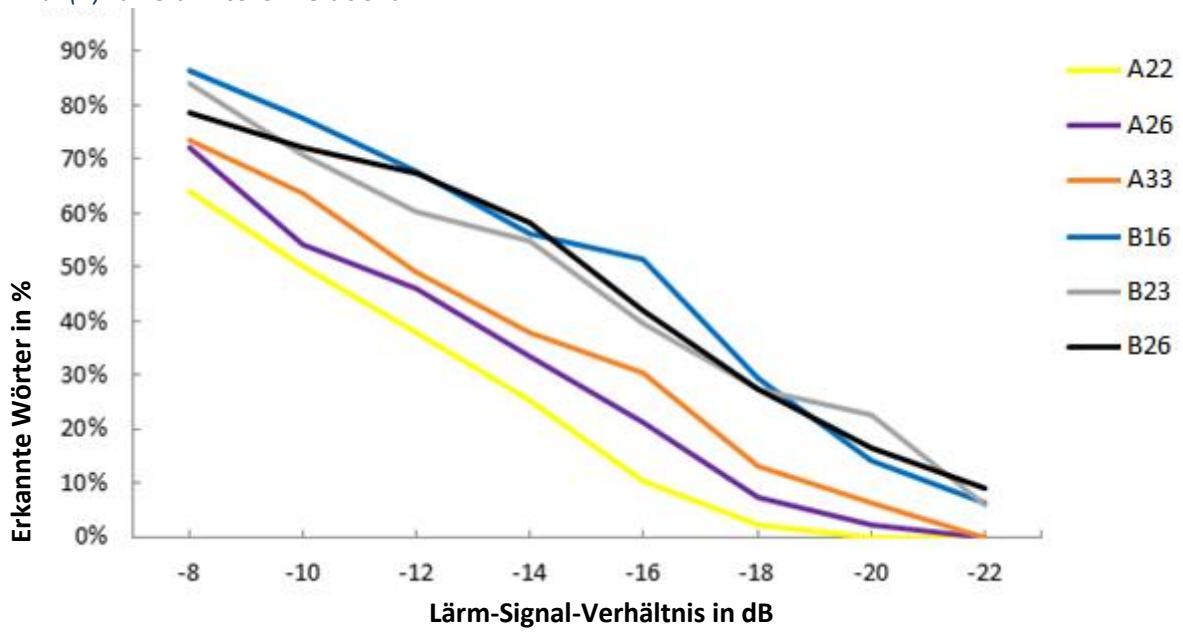


Abbildung 17: prozentualer Durchschnitt der erkannten Wörter der 22 Testpersonen bei unterschiedlichen Lärmbereichen; das Sprachsignal liegt bei 70dB(A) bei 1m, in Höhe des Kopfes vom Hörer.

Wir beobachten eine tatsächliche Wirkung der Dämmungsart bei der Erkennung der Wörter. Die Verständlichkeit nimmt linear aufgrund der Erhöhung des Lärmpegels ab.

Schnell stellen wir fest, dass die Gehörschützer mit gleichwertiger Dämmung auf allen Frequenzbändern eine bessere Verständlichkeit ermöglichen.

Wir stellen ebenfalls fest, dass unabhängig von der Dämmung des getesteten Gehörschutzes mit gleichwertiger Dämmung, sich die Ergebnisse der Verständlichkeit gleichen (s. u.).

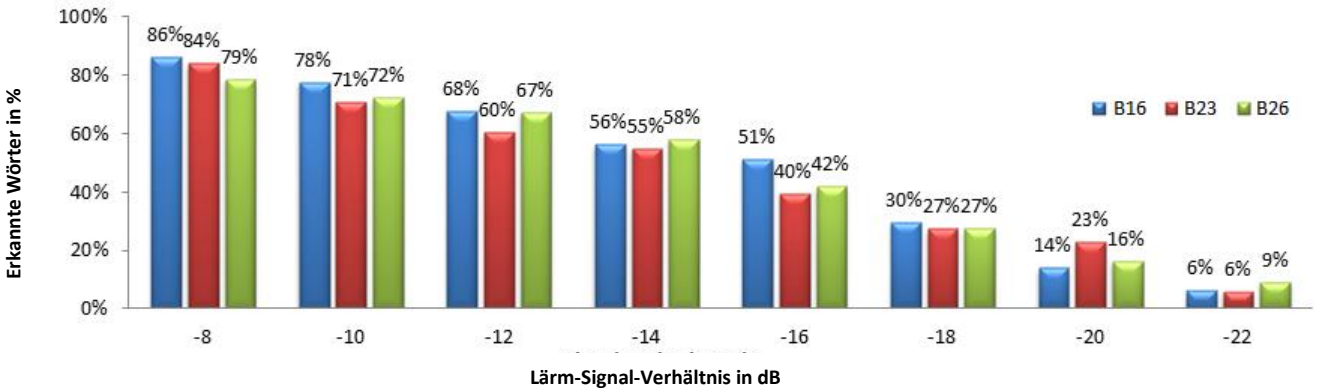


Abbildung 18: % der erkannten Wörter bei mehreren Lärmpegeln, Sprachsignal liegt bei 70 dB(A) bei 1m vom Hörer.

<u>Vergleichen wir nun die Gehörschützer mit äquivalenter Dämmung, allerdings mit anderem Kurvenabfall:</u>

1) Die Gehörschützer B26 und A26 haben die gleichen zertifizierten Durchschnittsdämmwerte (SNR von 26 dB). Allerdings ist ihr Kurvenabfall unterschiedlich (16 bei A26 und -1 bei B26).

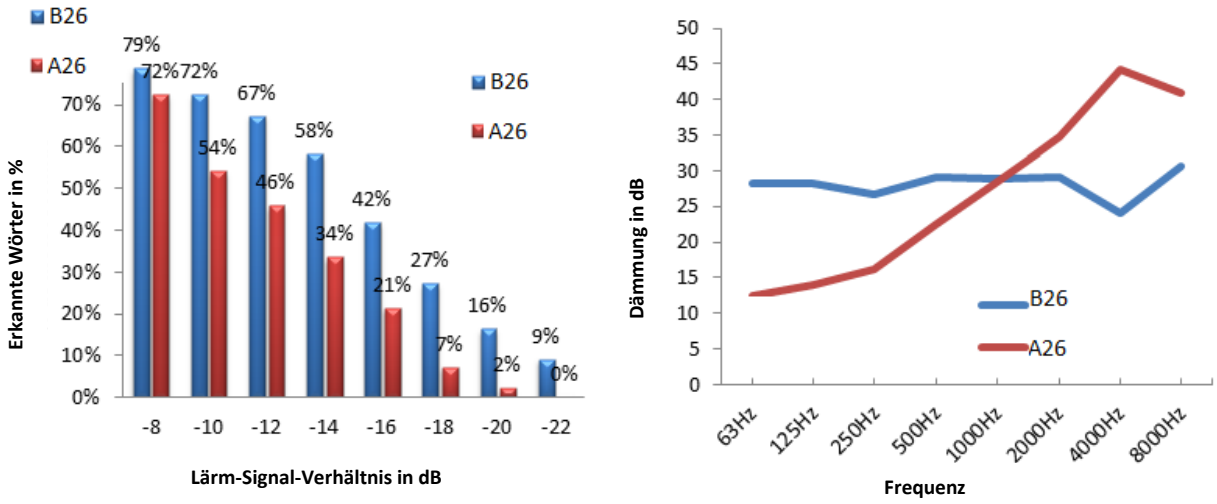


Abbildung 19: Links: in % die bei mehreren Lärmpegeln erkannten Wörter mit den Gehörschützern B26 und A26; Rechts: zertifizierter Durchschnittsdämmwert in dB pro Oktavband der Gehörschützer B26 und A 26.

Die Gehörschützer B23 und A22 haben zertifizierte Dämmungswerte, die sehr nah beieinander liegen (jeweils SNR von 23 und 22 dB). Allerdings sind die Kurvenabfälle unterschiedlich (17 bei A22 und -3 bei B23).

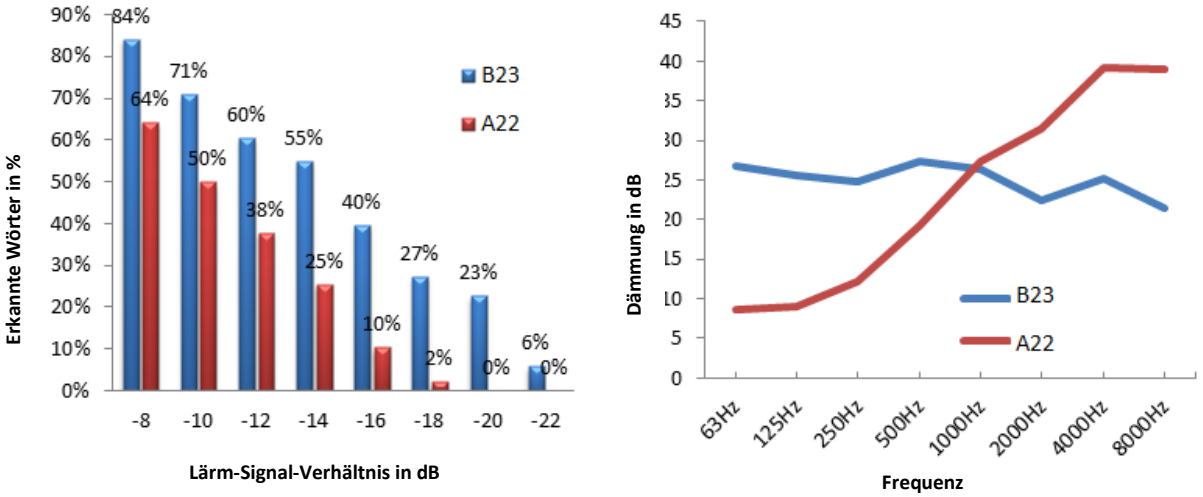


Abbildung 20: Links: die %-Angabe der erkannten Wörter bei unterschiedlichen Lärmpegeln mit den Gehörschützern B23 und A22; Rechts: zertifizierte Durchschnittsdämmung in dB pro Oktavband mit den Gehörschützern B23 und A22.

Man beobachtet eine **verringerte Sprachverständlichkeit von ca. 20% mit den Gehörschützern mit einer klassischen Dämmeigenschaft** (nicht gleichwertig) bei einer gleichen zertifizierten Dämmung.

3.4 Vereinfachtes Ergebnismodell

Wir suchen ein vereinfachtes mathematisches Modell, das den beobachteten Ergebnissen nachkommt.
Die erhaltenen Ergebnisse enthalten markante Merkmale. Wir werden versuchen ein simples mathematisches Modell, das diese Beobachtungen wiederspiegelt, zu finden.

3.4.1 Erste Annäherung

Wir fassen die Ergebnisse mit Hilfe von Gleichungen zusammen.

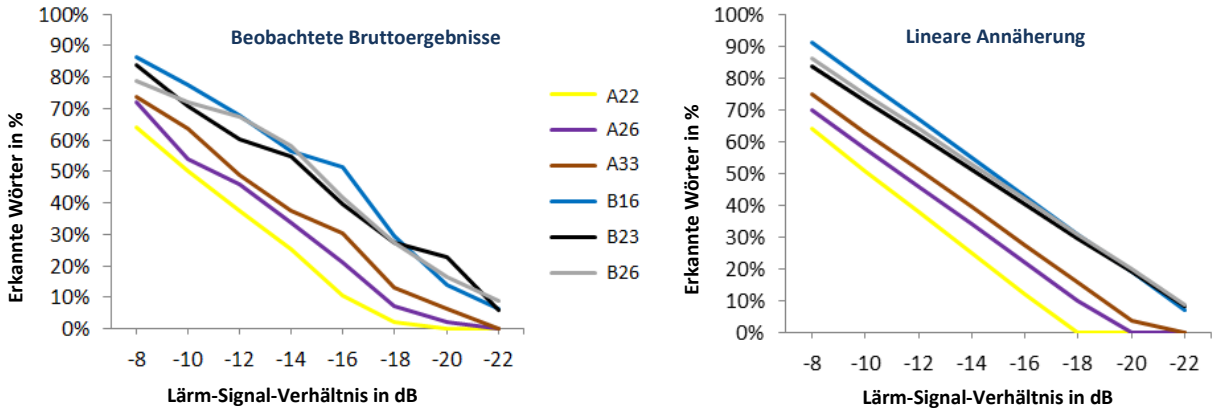


Abbildung 21: Darstellung der Bruttoergebnisse und in linearer Form

3.4.2 Zweite Annäherung

Wir betrachten die Kurvenabfälle als äquivalent

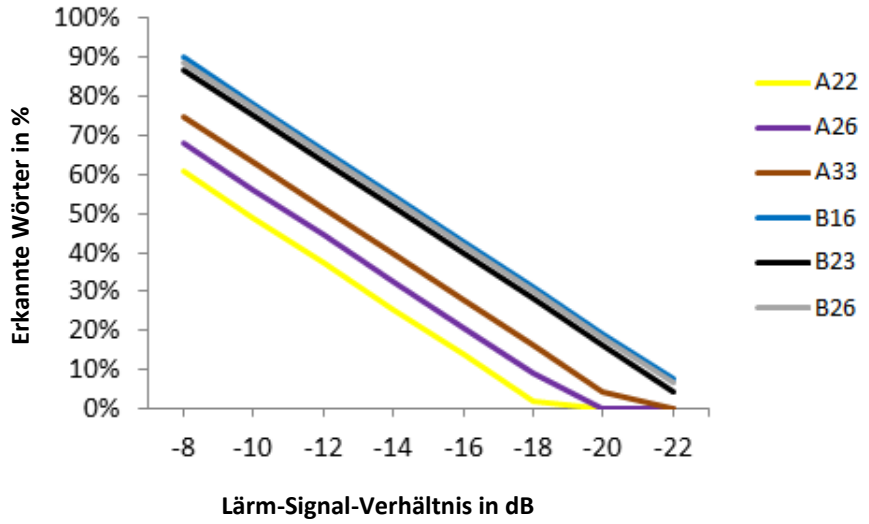


Abbildung 22: Darstellung der Ergebnisse in linearer Form mit einem äquivalenten Kurvenabfall

3.4.3 Dritte Annäherung

Wir stellen fest, dass die Ergebnisse der Sprachverständlichkeit nicht mit dem Dämmwert korrelieren. Wenn man allerdings die absoluten Werte der Abfälle der Dämmungskurven mit den Orientierungen der Kurvenabweichungen (s.u.) vergleicht, fällt auf, dass die Verständlichkeit sehr stark mit dem Kurvenabfall (H-L) des Gehörschutzes korreliert.

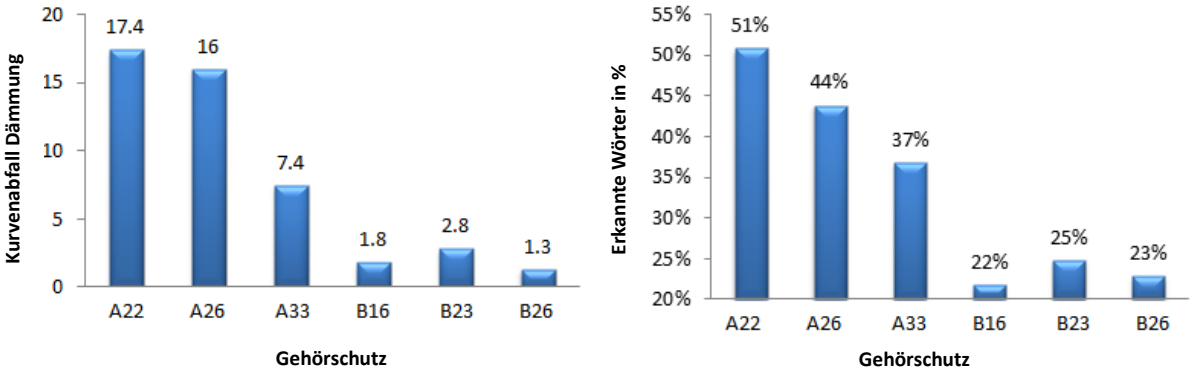


Abbildung 23: Links: absoluter Wert des Dämmungsabfalls (H-L) der Gehörschützer. Rechts: die %-Angabe der nicht erkannten Wörter (bei einem Signal-Lärm-Verhältnis von-10 in diesem Beispiel). Diese Angaben werden in den ersten zwei Annäherungen erfasst.

Unsere Hypothese ist, dass die Sprachverständlichkeit ausschließlich mit dem Kurvenabfall und dem Signal-Rausch-Verhältnis zusammenhängt.

3.4.4 Das Modell

Das folgende mathematische Modell gibt eine Schätzung der beobachteten Ergebnisse wieder.

Um diese Formel aufzustellen, gehen wir davon aus, dass die Ergebnisse den affinen Gleichungen des fixen Kurvenabfalls gleichen und wir stellen außerdem die Hypothese auf, dass aufgrund unserer Beobachtungen, die Sprachverständlichkeit ausschließlich mit dem Kurvenabfall des Gehörschutzes und aufgrund des Signal-Lärm-Verhältnisses zusammenhängt.

$$\text{Sprachverständlichkeit (in \%)} = \frac{47 - |\text{Kurvenabfall}|}{58} + 0{,}06 * (10 + \text{Signal(dBA)} - \text{Lärm(dBA)})$$

In Abbildung 34 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**haben wir die beobachteten Bruttoergebnisse (durchgezogene Linie) mit den Berechnungen mit der oben genannten Formel verglichen (gestrichelte Linie):

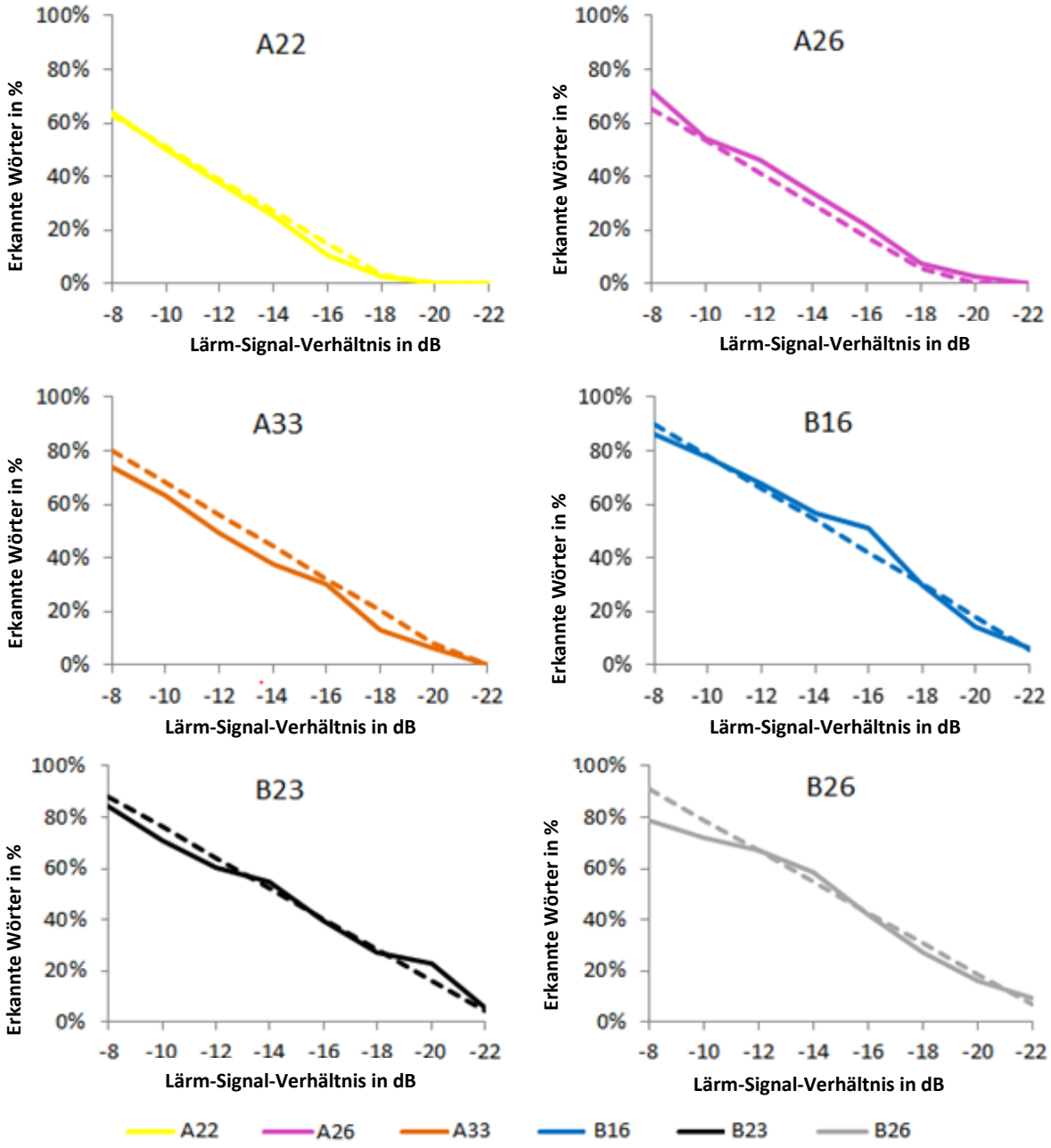


Abbildung 24: Aufzeichnung der Bruttoergebnisse (durchgezogene Linie) mit der Modellberechnung (gestrichelte Linie)

Das definierte Modell gibt repräsentative Annäherungen der beobachteten Messungen unter Berücksichtigung der starken Hypothese wieder, laut der die Sprachverständlichkeit ausschließlich aufgrund des Kurvenabfalls des Gehörschutzes und aufgrund des Signal-Lärm-Verhältnisses zusammenhängt. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse von manchen Gehörschützern leicht überbewertet (A33) und manche unterbewertet (A26).

4 Vergleich der Ergebnisse mit dem STI

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, ermöglicht der STI die Sprachverständlichkeit in einem definierten Umfeld vorherzusagen. Er berücksichtigt, abgesehen von dem Signal-Lärm-Verhältnis, das vom Hörer wahrgenommen wird, die Maskierungseffekte und die Hörschwellen, die durch das Tragen von Gehörschutz betroffen sind.

Dieser Index wird anhand folgender Kriterien berechnet:

- Lärmpegel des Oktavbandes am Ohr der Testperson
- Signalpegel am Ohr der Testperson, das vom Sprecher gesendet wird
- Dämmung des Gehörschutzes des Oktavbandes.

4.1 Simulation der Testbedingungen

Wir wollen die STI-Verfahren und unsere subjektiven Tests bei mehreren Testpersonen vergleichen. Die genutzten Parameter für die Berechnung des STI gehen somit aus den Testbedingungen der subjektiven Messung hervor. Konkret heißt dies:

- Das Sprachsignal ist eine Männerstimme, die Sprechgeschwindigkeit sowie die Lautstärke sind gleichbleibend. Der Durchschnittspegel der gesprochenen Wörter wurde mit 70 dB(A) am Ohr der Testperson gemessen (siehe 3.1.4 Das Sprachmaterial).
- Der Lärm ist verstärkt niederfrequent, bei Lärmpegeln zwischen 78 und 92 dB(A) (siehe 3.1.5 Geräuschbelastende Umgebung)
- Wir verwenden die zertifizierte Durchschnittsdämmung der Gehörschützer A22, A26, A33, B16, B23, B26.

4.2 Ergebnisse

Wir können in Abbildung 35 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**beobachten, dass der berechnete STIr durch den Filter je nach Signal, folgende Eigenschaften aufweist:

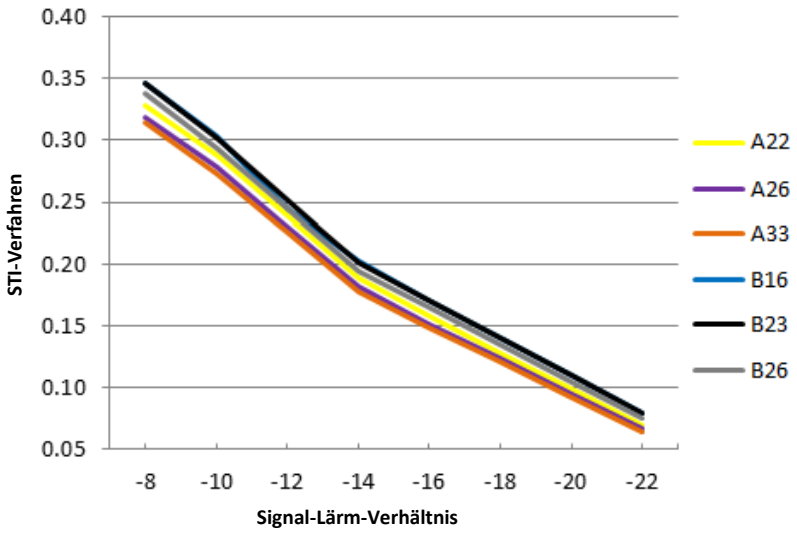


Abbildung 25: berechneter STI je nach Signal-Lärm-Verhältnis mit unterschiedlichen Gehörschützern

Wir beobachten hier, dass das Ergebnis der Sprachverständlichkeit der unterschiedlichen Filter sehr nah beieinander liegt. Das hier angewendete STI-Verfahren gibt den Einfluss des Kurvenabfalls auf die beobachtete Sprachverständlichkeit in Kapitel 3 wieder: der Test ist subjektiv.

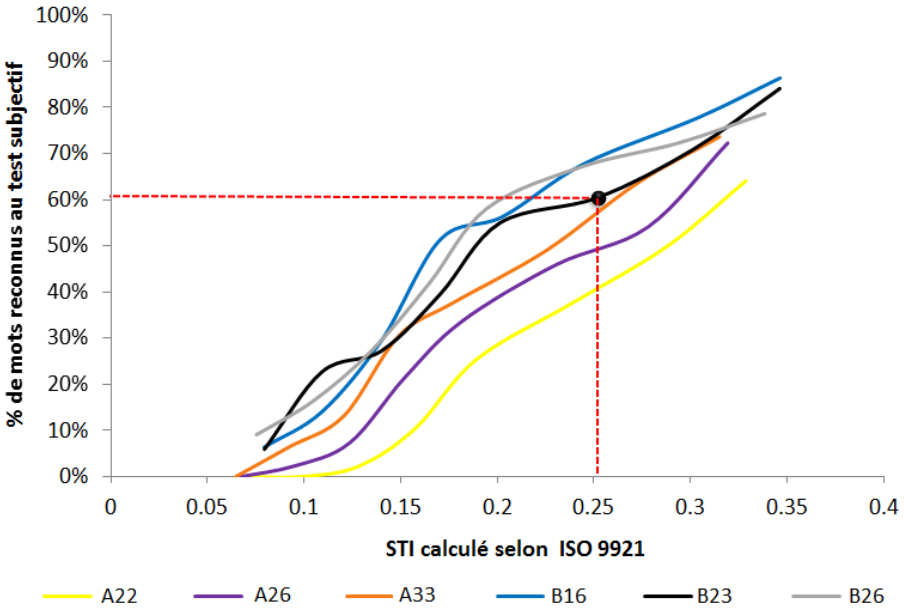


Abbildung 26: Verhältnis zwischen der %-Angabe von erkannten Wörtern bei dem subjektiven Test und der Berechnung des STIr unter gleichen Bedingungen. Die rote gestrichelte Kurve beschreibt das Verhältnis STI und %-Angabe der erkannten Wörter in der Norm ISO 9921.

In Abbildung 36 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**werden die Ergebnisse der beiden getesteten Verfahren verglichen: subjektiver Test und STIr.
Als Beispiel nehmen wir die Messung mit dem Filter B23. Mit einem Sprachsignal bei 70 dB(A) und einem Lärmpegel von 82 dB(A) haben wir bei 22 Testpersonen bei dem subjektiven Test eine durchschnittliche Prozentangabe an erkannten Wörtern von 60% erhalten. Mit diesen Bedingungen (Stimme, Lärm und Gehörschutz) berechnen wir den entsprechenden STIr, so wie dieser in der Norm definiert ist: d.h. 0.25. Bei dem Filter B23, entspricht ein STI 0.25 einer Sprachverständlichkeit von 60%, wobei bei dem Filter A22, ein STI von 0.25 einer Sprachverständlichkeit von 40% entspricht.

Man stellt fest, dass das Verhältnis zwischen den beiden Verfahren je nach getestetem Filter unterschiedlich ist.

Auch wenn die Korrekturen bzgl. der Maskierung und der Hörschwellen in der Berechnung des STIr miteinbezogen werden, so schafft der Index **STIr es nicht, unsere Beobachtungen und vor allem den Einfluss des Dämmungsabfalls des Gehörschutzes zu übersetzen.**

5 Ermittlung eines Verfahrens zur Vorhersage der Sprachverständlichkeit

Wir suchen einen Index zur Substitution des STIr, der an die Gehörschützer angepasst ist und auf unseren Beobachtungen basiert.

Ein simples Verfahren in 2 Schritten:

- Schätzung des Signal-Lärm-Verhältnisses ab Umgebungslärm (gemäß Norm ISO 9921 und des SIL),
- Schätzung der %-Angabe der erkannten Wörter (gemäß unseren Beobachtungen).

1) **Lombard-Effekt** (*siehe: Berücksichtigung des Lombard-Effekts)*:

   Sprechleistung = 0,57 * Lärm + 30

2) **Gehörschutz-Effekt auf den Sprecher** (siehe: *Berücksichtigung des Gehörschutzes)*:

   Sprechleistung ’ = Sprechleistung – 3dB

3) **Distanz-Effekt zwischen den Gesprächspartnern** (*siehe: Berücksichtigung der Distanz zwischen den Gesprächspartnern)***:**

   Sprachpegel bei x Metern = Sprechleistung ’ – 20 log (x)

4) **Berechnungen der %-Angabe der erkannten Wörter** (*siehe: Einfache Modellierung der Ergebnisse)*

   Schätzung der Sprachverständlichkeit in % = $\frac{47 - |Kurvenabfall|}{58}$ + 0,06 * (10 + Signal(dBA) - Lärm(dBA))

6 Zusammenfassung

Wir haben versucht die Hauptphänomene, die bei der Kommunikation und bei der Übermittlung von Informationen im Lärm, insbesondere das Zusammenspiel zwischen Umgebungsgeräsuch, Signal, das vom Sprecher an den Hörer weitergegeben wird und der Konfiguration des Umfelds, wenn der Hörer mit einem Gehörschutz ausgestattet ist, besser zu verstehen.

Die Zusammenfassung von Suter (1992 [6]) stellt in der Tat in den Vordergrund, dass unter gewissen Bedingungen, die Gehörschützer die Spracherkennung verbessern, insbesondere in lautem Umgebungslärm, wenn der Hörer normal hörend ist (Rink 1979 [15]) und Gehörschutz trägt (nicht der Sprecher) (Kryter 1946 [9]).
Diese Verbesserung bei hohen Lärmpegeln erklärt sich aus der äquivalenten Dämmung des Lärms des nützlichen Signals, indem das Risiko einer Tonverzerrung aufgrund der Vergrößerung des akustischen Filters, der bei hohen Lärmpegeln häufig entstehen kann, verringert wird (Coleman et al, 1984 [18]). Bei einem Lärmpegel bei 80 dB(A) entsteht außerdem eine nicht lineare Erhöhung der Maskierung, die eine Rolle spielt. Indem auch hier die Lärm- und Sprachbestandteile auf die gleiche Weise verringert werden, darf das Tragen von Gehörschutz keinen Verlust der spektralen Information verursachen, jedoch eine Verringerung der Verzerrung und der Maskierung hervorrufen, die für eine verbesserte Sprachverständlichkeit sorgt. Die Situation ist jedoch nicht immer zufriedenstellend. **Die meisten Gehörschützer weisen eine nicht-gleichwertige Wiedergabe auf und verringern viel stärker die hohen als die tiefen Frequenzen.** Da die spektralen Eigenschaften des Signals geändert wurden, ermöglicht dies die Energie der tiefen Frequenzen, die Bestandteile der hohen Frequenzen zu maskieren.
Lazarus (1983 [13]) gibt an, je höher der Kurvenabfall der Dämmung pro Oktave des Gehörschutzes **ist, desto größer wird der Hörverlust des Signals sein.** Dieses Phänomen verstärkt sich, wenn der Lärm in den tiefen und mittleren Frequenzen dominant ist und das Signal in den hohen Frequenzen dominant ist, sowie wenn der Benutzer des Gehörschutzes eine Hörbeeinträchtigung aufweist. In diesem letzten Fall, kann sogar ein Gehörschutz mit starker und mit einer relativ flachen Dämmung den **Signalpegel unter dem der Hörschwelle des Hörers** verringern. Diese Möglichkeit ist eher wahrscheinlich mit einem nicht gleichwertigen Filter.

Wir wollten beobachten, wie der Gehörschutz und vor allem wie sein Kurvenabfall der Dämmung die Sprachverständlichkeit beeinflusst. Wir haben hierfür zwei Bewertungsmethoden der Sprachverständlichkeit miteinander verglichen, die in der Lage sind den Parameter des Kurvenabfalls der Gehörschützer zu berücksichtigen: ein subjektiver Test zur Erkennung der Wörter im Lärm und der STIr, ein objektives Verfahren der Vorhersage unter gleichen Bedingungen.

Mit Hilfe eines subjektiven Tests mit 22 Testpersonen, haben wir **eine Steigerung von ca. 20% der erkannten Wörter mit Gehörschützern mit einer gleichwertigen Wiedergabe** im Vergleich zu Gehörschützern mit einer nicht gleichwertigen Wiedergabe bei gleichen Dämmwerten, **beobachtet.**

Die Ergebnisse der Sprachverständlichkeit in % der erkannten Wörter verringern sich linear je nach Erhöhung des Lärms im Verhältnis des Sprachsignals in dB und dies in den gleichen Proportionen, unabhängig vom benutzten Gehörschutz. Unter den gleichen Bedingungen, gibt die Berechnung des STIr, diese Beobachtung nicht wieder, da die Filter sich nicht ausreichend voneinander differenzieren.

7 Bibliographie

[1] J. G. Casali et G. S. Robinson, Auditory Systems Laboratory - Speech communications and signal detection in noise, 2000.

[2] R. Hétu, Mismatches between audiotry demands and capacities in the industrial work environment, Audiology, 33 :1–14, 1994.

[3] J. Pickett, Effects of vocal force on the intelligibility of speech sounds, The journal of the acoustical society of america, 28(5) :902–905., 1956.

[4] J. C. Webster, Effects of noise on speech, 1979.

[5] K. D. Kryter, The effects of noise on man, 1985.

[6] A. H. Suter, Communication and Job Performance in Noise : A Review, ASHA Monographs. 1992 Nov;(28):1-84., 1992.

[7] K. Howell et A. M. Martin, An investigation of the effects of hearing protectors on vocal communication in noise, Journal of the Acoustical Society of America, 41, 181-196, 1975.

[8] H. Hörmann, G. Lazarus-Mainka, M. Schubeirus et H. Lazarus, The effect of noise and the wearing of ear protectors on verbal communication., Noise Control Engineering, 23.69-77, 1984.

[9] K. D. Kryter, Effects of ear protective devices on the intelligibility of speech in noise, Journal of the Acoustical Society of America, 18, 413-417, 1946.

[10] G. Robinson et J. G. Casali, Speech communications and signal detection in noise, American Industrial Hygiene Association (AIHA) Press, 5th edition edition, 2000.

[11] S. A. Gelfand, Hearing : an introduction to psychological and physiological acoustics, Marcel Dekker, New York, 4th edition. Stanley A. Gelfand. ill, 2004.

[12] A. M. Martin, K. Howell et M. C. Lower, Hearing protection on communication in noise, S. D. G. Stephens (Ed.), Disorders of auditory function II. London : Academic Press, 1976.

[13] H. Lazarus, The effect of hearing protectors on the perception of acoustic signals., Zentralblatt fur Arbeitsmedizin, 30, 204-212. , 1983.

[14] H. Tran Quoc et R. Hétu, La planification de la signalisation acoustique en milieu industriel : critère de conception des avertisseurs sonores de danger, Acoustique canadienne, 24(2) :3–17, 1996.

[15] T. L. Rink, Hearing Protection and Speech Discrimination in Hearing-Impaired Persons, Sound and Vibration 13(1), 22-25, 1979.

[16] J. J. Delétré, Mémento comprendre l'acoustique appliquée, École d’architecture de Grenoble - 2001, 2001.

[17] H. J. M. Steeneken et T. Houtgast, Basics of the STI measuring method, 2002.

[18] G. J. Coleman, R. J. Graves, S. G. Collier, D. Golding, A. G. Nicholl, G. C. Simpson, K. F. Sweetland et C. F. Talbot, Communications in noisy environments, Institute of Occupational Medicine, 1984.

[19] G. Nexer, Profils d’affaiblissement des protecteurs individuels contre le bruit sur mesure, 2011.

[20] C. Le Cocq, Communication dans le bruit : perception de sa propre voix et rehaussement de parole, Ecole de technologie supérieure université du Quebec, 2010.

[21] R. H. Ehmer, Masking Patterns of Tones, Journal of the Acoustical Society of America. 31, 1115 , 1958.

[22] E. Phan Chan The, Le bruit : notions de base en ergonomie-métrologie dans le cadre de la pluridisciplinarité, ANMTEPH, n°55, 15/12/2003, pp. 5-11, 2003.

Anhang 1: Dämmwerte der genannten Gehörschützer in dieser Studie

A22

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Durchschnittsdämmung (dB)	8,7	9,1	12,1	19,2	27,4	31,4	39,1	39
Standardabweichung (dB)	2,6	3,6	2,5	3,3	2,6	3,3	3,3	3,3
APV (dB)	6,2	5,5	9,6	15,9	24,8	28,1	35,8	35,6

Kurvenabfall: 17,4	H (dB) 29,1	M (dB) 19,1	L (dB) 11,7	SNR (dB) 22

Tabelle 1: Dämmwert des Gehörschutzes mit Filter A22

A26

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Durchschnittsdämmung (dB)	12,4	14,1	16,1	22,5	28,5	34,7	44,3	41
Standardabweichung (dB)	5,1	4,6	3	2,5	3,9	3,3	3,1	4,4
APV (dB)	7,3	9,4	13,1	19,9	24,6	31,4	41,2	36,6

Kurvenabfall: 16	H (dB) 31,3	M (dB) 22,3	L (dB) 15,3	SNR (dB) 26

Tabelle 2: Dämmwert des Gehörschutzes mit Filter A26

A33

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Durchschnittsdämmung (dB)	28,3	27,5	27,4	31,8	33	36	41,3	43,5
Standardabweichung (dB)	5,3	3,6	3,3	3,9	3,4	2,8	4,2	3,7
APV (dB)	23	23,9	24,2	27,8	29,5	33,3	37,2	39,9

Kurvenabfall: 7,4	H (dB) 34,2	M (dB) 29,8	L (dB) 26,8	SNR (dB) 33

Tabelle 11: Dämmwert des Gehörschutzes mit Filter A33

B16

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Durchschnittsdämmung (dB)	20,8	18,9	17,5	16	14,7	17,8	20,9	23,4
Standardabweichung (dB)	3,5	3,9	2,7	3,2	2,4	3,3	4	3,5
APV (dB)	17,3	15	14,8	12,9	12,3	14,5	16,9	19,9

Kurvenabfall: 1,8	H (dB)	15,4	M (dB)	13,3	L (dB)	13,6	SNR (dB)	16

Tabelle 4: Dämmwert des Gehörschutzes mit Filter B16

B23

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Durchschnittsdämmung (dB)	26,8	25,6	24,8	27,3	26,3	22,5	25,2	21,4
Standardabweichung (dB)	4,2	2,9	2,5	2,2	1,6	2,1	2,6	3,8
APV (dB)	22,7	22,7	22,3	25	24,7	20,5	22,6	17,6

Kurvenabfall: 2,8	H (dB)	20,3	M (dB)	22,9	L (dB)	23,1	SNR (dB)	23

Tabelle 5: Dämmwert des Gehörschutzes mit Filter B23

B26

Frequenz in Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Durchschnittsdämmung (dB)	28,2	28,2	26,8	29	28,9	29,2	24,1	30,7
Standardabweichung (dB)	5,9	4	2,6	3,3	3,2	3,9	3,1	2,9
APV (dB)	22,3	24,1	24,2	25,7	25,7	25,4	21	27,7

Kurvenabfall: 1,3	H (dB)	23,5	M (dB)	24,8	L (dB)	24,8	SNR (dB)	26

Tabelle 6: Dämmwert des Gehörschutzes mit Filter B26