

Förderpreis 2019

Richtungsabhängige Bezugskurven für den Freiburger Einsilbertest im Störgeräusch

Bachelor-Abschlussarbeit

Verfasser: Larissa Jäger
Erstgutachter: Dr. techn. Hendrik Husstedt
Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Tchorz
Datum der Abgabe: 21.08.2019

EUHA

Europäische Union der
Hörakustiker e.V.

Herausgeber: Europäische Union der Hörakustiker e. V.
Neubrunnenstraße 3, 55116 Mainz, Deutschland
Tel. +49 (0)6131 28 30-0
Fax +49 (0)6131 28 30-30
E-Mail: info@euha.org
Internet: www.euha.org

Alle hier vorhandenen Daten, Texte und Grafiken sind urheberrechtlich geschützt. Eine Verwertung über den eigenen privaten Bereich hinaus ist grundsätzlich genehmigungspflichtig.

© EUHA 2019

Zusammenfassung

Der Freiburger Einsilbertest kann laut Hilfsmittel-Richtlinie des Spitzenverbandes Bund der Krankenkassen zur Überprüfung des Erfolgs einer Hörgeräteversorgung verwendet werden. Hierfür erfolgt ein relativer Vergleich des Sprachverstehens der unversorgten mit der versorgten Situation in Ruhe und im Störgeräusch. Aus audiologischer Sicht ist es auch von Interesse, die erzielten Ergebnisse mit dem Sprachverstehen von Normalhörenden zu vergleichen. Hierfür gibt es bislang nur eine Bezugskurve für die frontale Darbietung von Sprache und Störschall (S_0N_0).

In der Hilfsmittel-Richtlinie werden Angaben zu den Pegeln der Signale, nicht aber zur räumlichen Darbietung gemacht. Es wird auf die Norm DIN EN ISO 8253-3 für Sprachaudiometrie verwiesen, in der empfohlen wird, das Sprachsignal von 0° und das Störgeräusch gleichzeitig von $\pm 45^\circ$ abzugeben. Im Rahmen der Hörgeräteversorgung werden beim Freiburger Sprachtest üblicherweise andere Richtungen, wie z. B. 0° , 90° oder 180° und selten $\pm 45^\circ$, verwendet. Da die räumliche Darbietung aber einen entscheidenden Einfluss auf das Sprachverstehen hat, kann die bestehende Bezugskurve für S_0N_0 für andere Richtungen nicht herangezogen werden.

Um das Sprachverstehen auch bei anderen Lautsprecheranordnungen mit Normalhörenden vergleichen zu können, wurden innerhalb dieser Arbeit nach den Vorgaben der Norm DIN EN ISO 8253-3 richtungsabhängige Bezugskurven für den Freiburger Einsilbertest erstellt.

Hierfür wurde eine Studie mit 40 normalhörenden Probanden durchgeführt, bei denen das Sprachverstehen für die Darbietung der Wörter des Freiburger Einsilbertests von 0° und des kontinuierlichen CCITT-Rauschens aus den Richtungen 0° (S_0N_0), $\pm 45^\circ$ ($S_0N_{\pm 45}$), 45° (S_0N_{45}), 90° (S_0N_{90}) und 180° (S_0N_{180}) bei jeweils vier verschiedenen Signal-Rausch-Abständen (SNR) bestimmt wurde. Anhand der ermittelten Ergebnisse konnte für jeden SNR das mediane Sprachverstehen berechnet und eine psychometrische Funktion angenähert werden, welche als Bezugskurve für die jeweilige Richtung herangezogen werden kann.

Bei dem Vergleich der Bezugskurven konnte die Erwartung bestätigt werden, dass aufgrund der räumlichen Anordnung der beiden Signale unterschiedliche Sprachverständlichkeitsschwellen entstehen. Deshalb ist ein Vergleich des Sprachverstehens nur mit der Bezugskurve der gleichen Lautsprecheranordnung sinnvoll.

Abstract

The List of Medical Aids in Germany (*Hilfsmittelverzeichnis*) published by the National Association of Statutory Health Insurance Funds (*GKV-Spitzenverband*) defines that the benefit of a hearing aid needs to be verified using speech tests in quiet and in noise. To this end, the Freiburg monosyllabic speech test can be used to compare the aided with the unaided situation. For an audiological evaluation, a comparison of speech intelligibility with the performance of normal hearing people is also relevant. However, a reference speech recognition curve is only available for frontal presentation of speech and noise (S_0N_0).

The List of Medical Aids does not define the configuration of the loudspeakers, but refers to DIN EN ISO 8253-3 according to which the speech signal should be presented from 0° and the noise signal from $\pm 45^\circ$. Nevertheless, for the evaluation of hearing aid fittings usually other directions such as 0° , 90° or 180° , in some cases $\pm 45^\circ$, are used. Since the direction of the noise signal has a significant influence on speech intelligibility, the reference curve for S_0N_0 cannot be used for other directions.

Therefore, in this study, reference speech recognition curves for the Freiburg monosyllabic speech test in noise are determined for various loudspeaker configurations. To this end, according to DIN EN ISO 8353-3, a study with 40 normal hearing people was conducted for speech coming from 0° and the continuous CCITT noise from 0° (S_0N_0), $\pm 45^\circ$ ($S_0N_{\pm 45}$), 45° (S_0N_{45}), 90° (S_0N_{90}), and 180° (S_0N_{180}). Speech intelligibility was measured at four signal-to-noise ratios (SNR) for each loudspeaker configuration. Using the results, the median of the speech intelligibility was calculated for each noise direction and SNR, and psychometric functions were approximated.

For the different directions, various speech reception thresholds (SRT) were determined, thus verifying that individual reference curves are required for each loudspeaker configuration.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	i
Zusammenfassung	ii
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	2
2.1 Richtungshören	2
2.2 Sprachverstehen im Störgeräusch	5
2.3 Freiburger Einsilbertest im Störgeräusch	8
2.4 Festlegungen für Sprachaudiometrie entsprechend DIN EN ISO 8253-3	9
2.5 Psychometrische Funktionen	9
3. Materialien und Methoden	11
3.1 Materialien und Messaufbau	11
3.2 Methodik	12
3.2.1 Signaldarbietung	12
3.2.2 Testkonditionen	13
4. Ergebnisse und Auswertung	16
4.1 Richtungsabhängige Bezugskurven	16
4.2 Auswertung der individuell ermittelten Daten	21
4.2.1 SRT und Steigung der Diskriminationsfunktion	21
4.2.2 Vergleich der Ergebnisse der männlichen und weiblichen Probanden	24
4.2.3 Untersuchung von Asymmetrien im Messaufbau	25
5. Fazit	28
6. Anhang I	30
6.1 Einweisung der Probanden	30
6.2 Individuelle Tonaudiogramme	30
7. Anhang II	31
7.1 Darstellung der Ergebnisse für jede Darbietung als Boxplot	31
8. Anhang III	33
8.1 Tabellarische Darstellung der Bezugskurven	33
9. Anhang IV	35
9.1 Vergleich der männlichen und weiblichen Probanden	35
10. Verzeichnisse	38
10.1 Abkürzungsverzeichnis	38
10.2 Abbildungsverzeichnis	39
10.3 Tabellenverzeichnis	41
10.4 Literaturverzeichnis	42

1. Einleitung

Das Sprachverstehen im Störgeräusch stellt eine herausfordernde Situation für das menschliche Gehör dar. Für diese Situation verfügt der Mensch über diverse Mechanismen, welche die getrennte auditive Verarbeitung von Sprache und Störgeräusch und somit ein Sprachverstehen ermöglichen. Auch Hörgeräte können durch eine richtungsabhängige Verarbeitung das Nutzsignal, hier Sprache, gegenüber Störgeräuschen hervorheben. Wie groß der Nutzen der richtungsabhängigen Verarbeitung ist, hängt maßgeblich von der räumlichen Trennung des Nutz- und Störsignals ab.

Der Erfolg einer Hörgeräteversorgung kann laut Hilfsmittel-Richtlinie des Spitzenverbandes Bund der Krankenkassen unter anderem mit dem Freiburger Einsilbertest (FET) überprüft werden. Dafür erfolgt ein Vergleich des Sprachverstehens der unversorgten und der versorgten Situation bei konstanter räumlicher Anordnung der Lautsprecher in Ruhe und im Störgeräusch. Bei der Überprüfung in Ruhe muss bei der Darbietung jeweils einer Liste ein Gewinn von mindestens 20 % und im Störgeräusch bei der Darbietung von jeweils zwei Listen ein Gewinn von mindestens 10 % Sprachverstehen nachgewiesen werden. Die Überprüfung soll bei einem Sprachschallpegel von 65 dB und einem Störgeräuschpegel von 60 dB im freien Schallfeld durchgeführt werden [1].

Die Anordnung der Lautsprecher, aus denen die jeweiligen Signale abgegeben werden, ist in der Hilfsmittel-Richtlinie nicht definiert. Sie verweist lediglich auf die Norm DIN EN ISO 8253-3, welche für Sprachtests im Störgeräusch die Darbietung des Sprachsignals von 0° und die gleichzeitige Darbietung des Störgeräuschs von $\pm 45^\circ$ empfiehlt [2]. Da dieser Messaufbau mit drei Lautsprechern und den standardmäßig zweikanaligen Audiometern nur schwer realisierbar ist, weichen die Aufbauten in der Praxis meistens von der Empfehlung der Norm ab. Bei einem Sprachsignal von 0° sind in der Praxis die gängigsten Richtungen des Störgeräuschs 0° , 90° oder 180° .

Dadurch, dass die räumliche Darbietung bei Sprachtests im Störgeräusch einen erheblichen Einfluss auf das Sprachverstehen hat, können die Ergebnisse des Freiburger Einsilbertests im Störgeräusch bei verschiedenen Lautsprecheranordnungen nicht direkt miteinander verglichen werden [3, 4]. Möchte man die erzielten Ergebnisse aber mit denen eines Normalhörenden vergleichen, gibt es bislang nur Bezugskurven für die frontale Darbietung von Nutz- und Störgeräusch (S_0N_0) [5]. Aus diesem Grund sollen in dieser Arbeit Bezugskurven für den Freiburger Einsilbertest jeweils bei Sprache von vorne und Störgeräusch aus den Richtungen 0° (S_0N_0), 45° (S_0N_{45}), 90° (S_0N_{90}), 180° (S_0N_{180}) und $\pm 45^\circ$ ($S_0N_{\pm 45}$) ermittelt werden.

2. Grundlagen

2.1 Richtungshören

Damit Sprache im Störgeräusch verstanden werden kann, wertet der Mensch verschiedene Parameter, wie zum Beispiel den Pegel, das Frequenzspektrum, die zeitliche Struktur, oder räumliche Parameter, wie die Richtung und den Abstand zu der jeweiligen Schallquelle, aus. Für die Nutzung räumlicher Parameter werden überwiegend binaurale Informationen ausgewertet, welche über den Vergleich zwischen dem Signal des rechten und linken Ohres erzeugt werden. Auf der horizontalen Kopfebene werden für das Bestimmen der Richtung der jeweiligen Signalquelle vorwiegend interaurale Laufzeit- und Pegeldifferenzen genutzt [6, S. 112].

Aufgrund des wirksamen Ohrabstands, welcher durchschnittlich 21,5 cm beträgt, ergibt sich abhängig vom Schalleinfallswinkel eine interaurale Laufzeitdifferenz (ITD) [7]. Sie entsteht dadurch, dass bei unterschiedlichen Einfallswinkeln der Schall an dem einen Ohr eher eintrifft als am anderen Ohr. Die interauralen Laufzeitdifferenzen werden vorwiegend für die Lokalisation von Signalen mit Frequenzen unterhalb von 1500 Hz genutzt [8]. Das Gehör ist in der Lage, Laufzeitdifferenzen von 10-30 μ s voneinander zu unterscheiden und dadurch die Richtung mit einer Genauigkeit von 3-5° zu bestimmen [9, S. 231]. In Abb. 1 ist zu sehen, dass die maximale ITD 0,63 ms beträgt und für einen Schalleinfall aus 90° entsteht, da hier die Wegdifferenz zwischen den Ohren am größten ist. Der Schall aus 0° sowie aus 180° trifft gleichzeitig bei beiden Ohren ein, weshalb die ITD 0 ms beträgt.

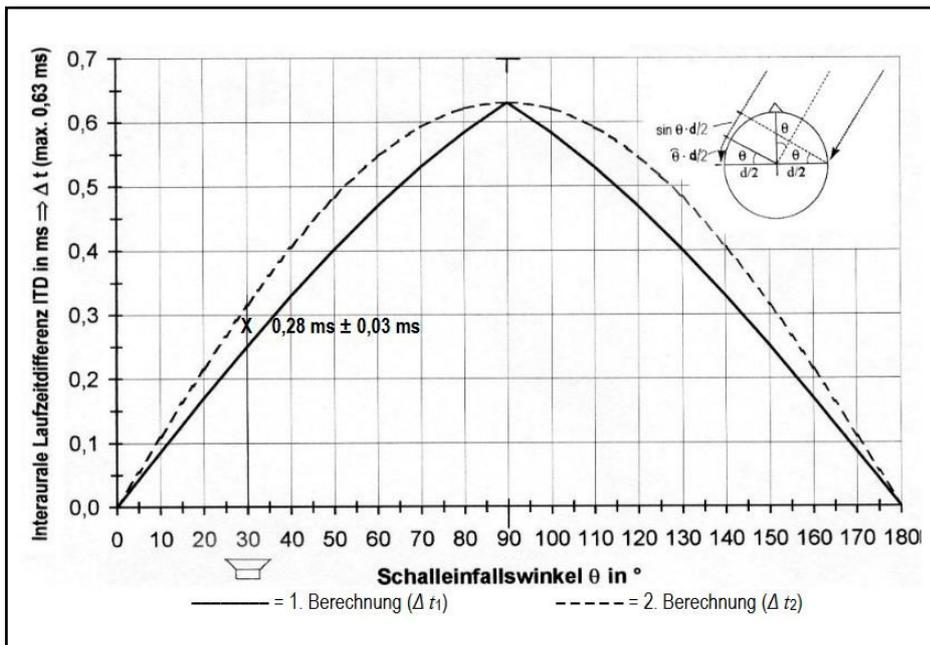


Abb. 1: Darstellung der interauralen Laufzeitdifferenzen in Abhängigkeit vom Winkel [10]

Zusätzlich zu den interauralen Laufzeitdifferenzen werden interaurale Pegeldifferenzen für die Bestimmung des Ortes eines Schallereignisses verwendet. Vom Menschen wahr-

nehmbare Pegelunterschiede entstehen für Frequenzen ab ungefähr 1500 Hz. Bei diesen Frequenzen ist die Wellenlänge kleiner als der Ohrabstand, und der Kopf stellt für den Schall ein Hindernis dar. Auf der gegenüberliegenden Seite des Kopfes entsteht dadurch ein „Schallschatten“, sodass der Schalldruckpegel hier geringer ist [8]. Die größte ILD tritt ebenfalls für einen Einfallswinkel von 90° auf (siehe Abb. 2).

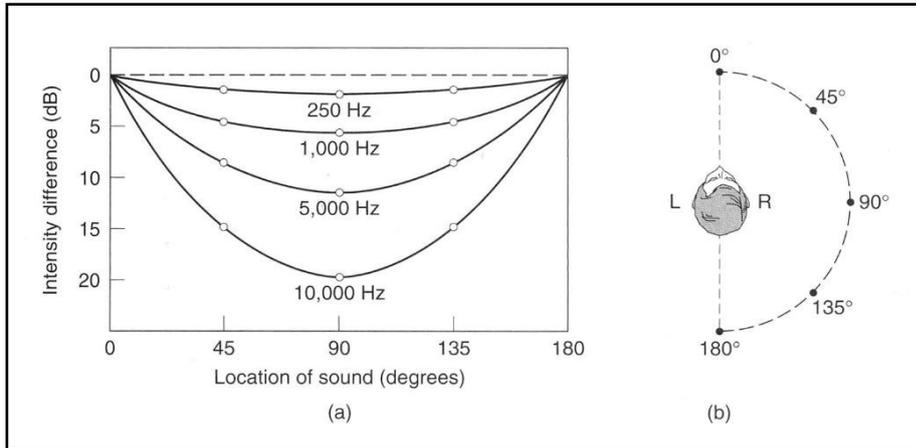


Abb. 2: Darstellung der interauralen Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Winkels und der Frequenz [11]

Die Richtungslokalisierung durch die gleichzeitige Auswertung von interauralen Laufzeit- und Pegeldifferenzen in den zwei genannten Frequenzbereichen wird als Duplex-Theorie bezeichnet und ist eine vereinfachte Erklärung der Lokalisation von Schallquellen [12].

Bei der Richtungsbestimmung in der Horizontalebene gibt es jedoch Einfallrichtungen, bei denen die ILD und ITD gleich sind und deshalb nicht für eine eindeutige Lokalisation der Schallquelle ausreichen (siehe Abb. 1 und Abb. 2). Bei den Einfallswinkeln 0° und 180° beträgt die ITD 0 ms und die ILD 0 dB, sodass es zur sogenannten Vorne-Hinten-Verwechslung kommen kann [6, S. 80]. Außerdem sind die ILD und die ITD bei denjenigen Schallquellen gleich, die auf der Oberfläche eines Kegels (*cone of confusion*) liegen (siehe Abb. 3) [12].

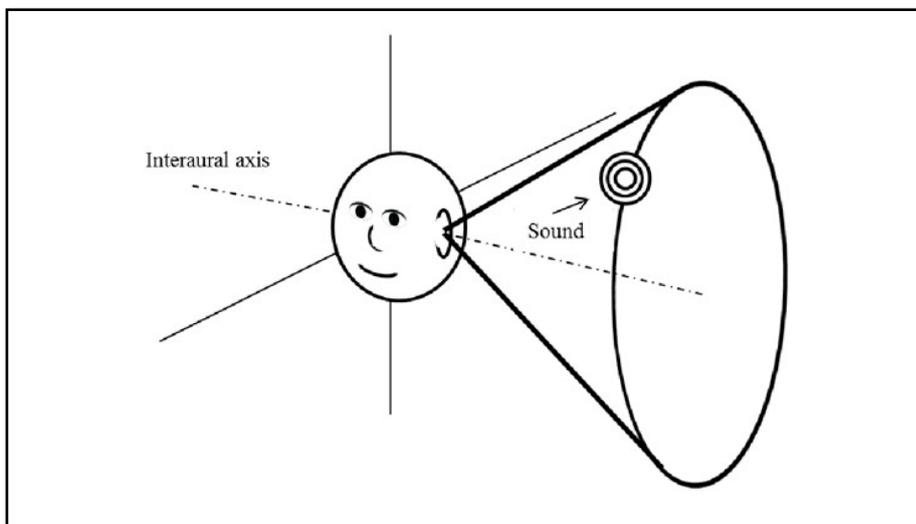


Abb. 3: Darstellung der Kegeloberfläche (cone of confusion), auf der die ITD und ILD gleich sind [13]

Für diese Schallquellen kann es sowohl zu Verwechslungen auf der oberen und unteren Halbebene als auch auf der vorderen und hinteren Halbebene kommen. Somit haben sowohl die ITD als auch die ILD hauptsächlich für die Richtungsbestimmung auf der linken und rechten Horizontalebene einen Nutzen [6, S. 112].

Ein Sonderfall tritt ein, wenn einer Person das gleiche Signal über zwei Lautsprecher im gleichen Abstand und im gleichen Winkel auf der rechten und linken Medianebene präsentiert wird. Durch diese Darbietung entstehen keine ITD und ILD, und die Person lokalisiert das Signal in der Mitte der beiden Lautsprecher. Dieses Phänomen wird als Summenlokalisierung bezeichnet [14].

Um entscheiden zu können, ob sich die Schallquelle vorne oder hinten sowie oberhalb oder unterhalb des Kopfes befindet, werden zusätzlich Kopfbewegungen und spektrale Verfärbungen des Signals durch die Reflexion, Beugung und Absorption an Kopf, Pinna und Torso ausgewertet, welche den Klang des ankommenden Schalls für verschiedene Einfallsrichtungen verändern. Hierbei werden vordergründig die spektralen Filterungen des ankommenden Schalls durch das Außenohr betrachtet, welche durch die Außenohrübertragungsfunktion (englisch: *head-related transfer function* (HRTF)) dargestellt werden können [6, S. 51]. In Abb. 4 ist zu sehen, dass die individuellen HRTFs für verschiedene Schalleinfallrichtungen die gleiche Grundform aufweisen. Ab 3 kHz treten aufgrund der Struktur des Außenohres Interferenzen auf, die abhängig von der Einfallsrichtung des Schalls unterschiedlich stark ausgeprägt sind [15].

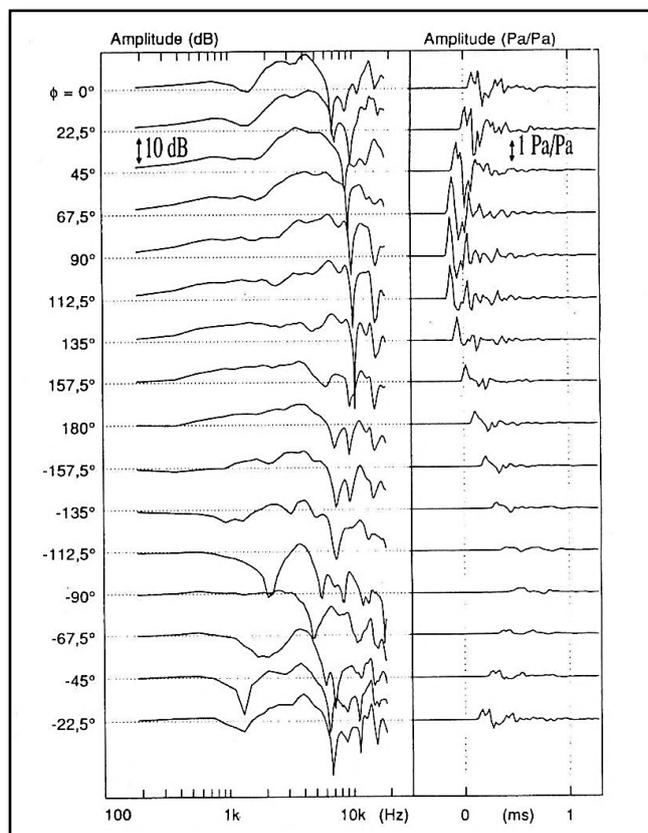


Abb. 4: Darstellung der Außenohrübertragungsfunktion (HRTF) und der kopfbezogenen Impulsantwort (HRIR) am linken Ohr einer Versuchsperson bei unterschiedlichen, horizontalen Schalleinfallswinkeln [16]

Durch Kopfbewegungen können zusätzlich die Bereiche der größten Empfindlichkeit des Gehörs genutzt und nicht eindeutige Richtungsinformationen so verändert werden, dass die Richtungslokalisierung vereinfacht wird [6, S. 145].

Anhand der beschriebenen Mechanismen, die das menschliche Gehör nutzt, um die Positionen verschiedener Signalquellen zu bestimmen, wird ersichtlich, dass die Auswertung binauraler Informationen grundlegend für das Richtungshören ist.

2.2 Sprachverstehen im Störgeräusch

Im Alltag tritt immer wieder die Situation auf, in der ein Sprecher aus einem Störgeräusch herausgehört und verstanden werden soll. Bei größeren Personengruppen ergibt sich ein entscheidender Anteil des Störgeräuschs aus der Überlagerung mehrerer Sprecher. Die Schwierigkeit in dieser Situation besteht darin, dass die Sprache aufgrund der ähnlichen spektralen Anteile durch das Störgeräusch maskiert wird. Menschen ohne Hörverlust können in diesen schwierigen Situationen trotzdem unter anderem durch binaurales und selektives Hören ein gutes Sprachverstehen erzielen, was als Cocktailparty-Effekt bezeichnet wird [8].

Wie stark Sprache von einem Störgeräusch maskiert wird, hängt zum einen vom Frequenzbereich und Schallpegel des jeweiligen Signals und zum anderen von der räumlichen Separation der Sprache vom Störgeräusch ab.

Besitzen Nutz- und Störsignal das gleiche Frequenzspektrum, findet eine stärkere Maskierung der Sprache statt, weil eine Unterscheidung im Frequenzbereich nur eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich ist und die Signale schwerer getrennt voneinander wahrgenommen werden können [17, 18]. Das Ausmaß der Maskierung hängt hierbei vom Sprachschallpegel und vom Störschallpegel ab [11]. Die Differenz dieser beiden Schallpegel wird als Signal-Rausch-Abstand bezeichnet (englisch: *signal-to-noise ratio* (SNR)) [2]. Je kleiner der SNR, desto größer ist der Störgeräuschpegel im Vergleich zum Sprachschallpegel und desto stärker wird die Sprache durch den Störschall maskiert. Liegen die Signale in unter-

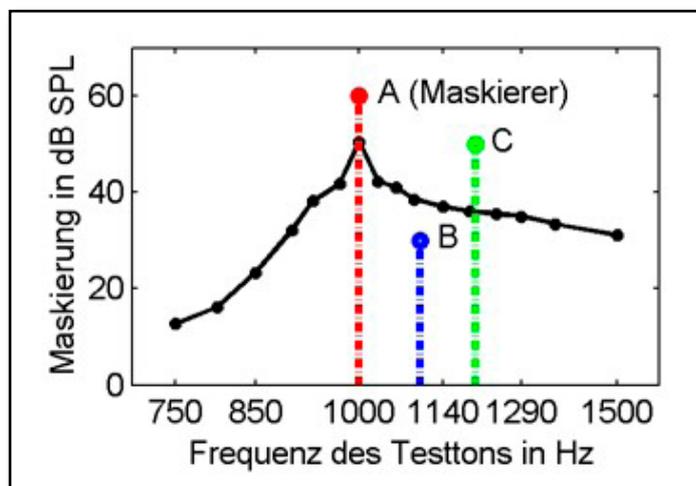


Abb. 5: Schematische Darstellung der spektralen Maskierung eines Tones „A“ auf andere Töne in einem Mithörschwellenmuster. Da Ton „B“ unterhalb der Mithörschwelle (schwarz) von Ton „A“ liegt, ist er nicht hörbar, während der darüber liegende Ton „C“ hörbar ist [17].

schiedlichen Frequenzbereichen, hängt die Maskierung sowohl vom SNR als auch vom spektralen Abstand der beiden Signale ab (siehe Abb. 5). Je weiter die Frequenzbereiche der beiden Signale auseinander liegen, desto besser können sie getrennt voneinander wahrgenommen werden und desto geringer ist das Ausmaß der Maskierung der Sprache durch das Störgeräusch [17].

Für das Sprachverstehen im Störgeräusch gilt zudem, dass die Verdeckung der Sprache durch das Störgeräusch geringer ist, je weiter dieses räumlich vom Nutzsignal entfernt ist. Aufgrund der räumlichen Trennung des Nutz- und des Störsignals verändern sich richtungsabhängig die interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen der jeweiligen Signale, was eine getrennte Verarbeitung der Signale durch das auditive System ermöglicht [19]. Dieser Effekt wird als Maskierungsreduktion durch räumliche Separation (englisch: *spatial release from masking* (SRM)) bezeichnet und erzeugt eine Verbesserung des Sprachverstehens. Demnach gilt, je größer die räumliche Trennung des Störsignals vom Nutzsignal ist, desto geringer kann der SNR gewählt werden, bei dem ein vergleichbares Sprachverstehen möglich ist. Dadurch, dass für die auditive Verarbeitung der räumlich getrennten Signale die binauralen Informationen des Richtungshörens genutzt werden, kann es hier ebenfalls zu einer Verwechslung auf der vorderen und hinteren horizontalen Halbebene kommen. Wenn das Sprachsignal aus 0° kommt und das Störgeräusch aus 180° , treffen beide Signale gleichzeitig an beiden Ohren ein und können nicht eindeutig voneinander getrennt werden. Befindet sich das Störgeräusch jedoch rechts oder links vom Hörer, entstehen für das Nutzsignal und das Störsignal verschiedene ITD und ILD, sodass die Signale getrennt wahrgenommen und verarbeitet werden können. Somit ergibt sich der größte Nutzen der räumlichen Trennung ca. bei $\pm 90^\circ$ und nicht für 180° (siehe Abb. 6) [20].

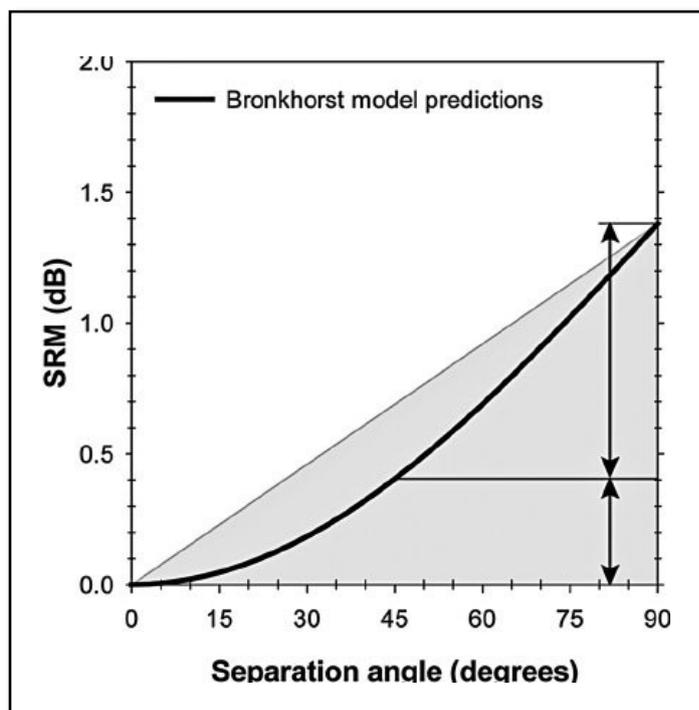


Abb. 6: Winkelabhängiger Effekt der räumlichen Trennung des Störgeräuschs vom Nutzsignal (SRM in dB), abgeleitet vom Bronkhorst-Modell [21]

Der Effekt der räumlichen Trennung des Störgeräuschs vom Nutzsignal wurde unter anderem innerhalb einer Studie untersucht, in der für verschiedene räumliche Klangeindrücke und verschiedene Einfallswinkel derjenige SNR bestimmt wurde, bei dem ein Sprachverstehen von 50 % erreicht wurde (siehe Abb. 7). Diese sogenannten Sprachverständlichkeitsschwellen (englisch: *speech reception threshold* (SRT)) wurden über einen Kopfhörer mithilfe des Oldenburger Satztestes und einem CCITT-Rauschen (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique) aus verschiedenen Richtungen mit normalhörenden Probanden ermittelt. Die Einfallswinkel und die Raumakustik wurden für die Darbietung über den Kopfhörer durch die Filterung mit einem Satz aus HRTFs simuliert [3].

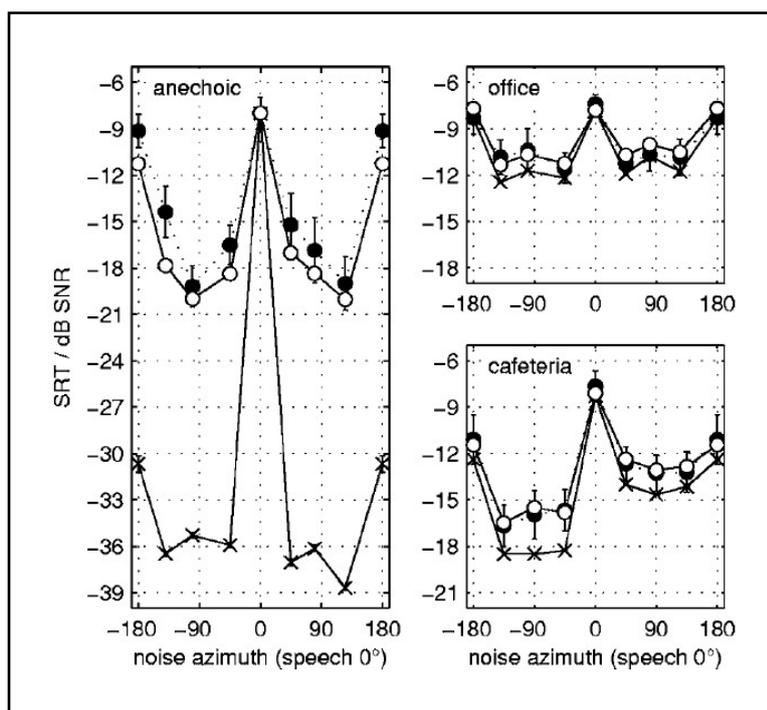


Abb. 7: SRTs für den Oldenburger Satztest im Störgeräusch aus verschiedenen Richtungen und mit unterschiedlicher Raumakustik [3]

Die Ergebnisse zeigen, dass der SNR für das Sprachsignal von 0° und das Rauschen von plus oder minus 90° am größten ist. Je näher die beiden Signale räumlich beieinander liegen, desto kleiner ist der SNR, bei dem ein Sprachverstehen von 50 % möglich ist. Außerdem verdeutlicht Abb. 7, dass sich die Sprachverständlichkeitsschwellen für 0° und 180° um maximal ± 2 dB SNR unterscheiden. Das bedeutet, dass die Verbesserung der Sprachverständlichkeitsschwelle durch die räumliche Trennung bei einem Störgeräusch aus 180° im Vergleich zur Darbietung des Störgeräuschs aus 0° gering ist.

Die Differenz der Sprachverständlichkeitsschwellen zweier binauraler Konditionen kann anhand der *binaural intelligibility level difference* (BILD) erfasst werden. Somit kann beispielsweise der Unterschied der SRT für die Richtung des Rauschens von 0° und 45° berechnet und mit dem BILD-Wert für die Richtung des Rauschens von 0° und 90° verglichen werden (siehe Tabelle 1) [6, S. 206].

Alter	θ	CCIT-Rauschen		
		MW	SD	Bild [dB]
20-29	0	-10,4	1,3	
	22,5	-14,0	1,7	-3,7
	45	-16,7	1,2	-6,3
	90	-19,0	1,6	-8,6

Tabelle 1: BILD-Werte für den OLSA von 0° und das CCITT-Rauschen von verschiedenen Winkeln θ [4]

Betrachtet man die BILD-Werte in Tabelle 1 wird deutlich, dass sich die Differenz zur Sprachverständlichkeitsschwelle der Darbietung S_0N_0 vergrößert, je weiter sich das CCITT-Rauschen räumlich vom Nutzsignal aus dem Lautsprecher bei 0° entfernt.

2.3 Freiburger Einsilbertest im Störgeräusch

Das Sprachverstehen im Störgeräusch bei verschiedenen SNR und verschiedenen Darbietungsrichtungen kann mit diversen Sprachverständlichkeitstests ermittelt werden. Ein Sprachtest, der in Deutschland weit verbreitet ist, ist der Freiburger Sprachverständlichkeitstest (FST). Beim FST handelt es sich um einen nach DIN 45626-1 genormten Test, welcher aus einem Einsilbertest (FET) und einem Mehrsilbertest (FMT) besteht und 1953 von Karl-Heinz Hahlbrock entwickelt wurde [22]. Im Jahr 1969 wurden in einem Hamburger Tonstudio 400 einsilbige Substantive für den Einsilbertest und 100 mehrsilbige Zahlwörter aufgenommen und anschließend nach dem Konzept von Hahlbrock zusammengestellt. Für den FET ergaben sich insgesamt 20 Testlisten mit jeweils 20 Wörtern, und für den Mehrsilbertest entstanden zehn Listen mit jeweils zehn Zahlen. Als Störgeräusch eignet sich für den Freiburger Einsilbertest das CCITT-Rauschen, welches ein sprachsimulierendes Rauschen ist. Die Aufnahmen der Wörter des Freiburger Einsilbertests und des CCITT-Rauschens können einer CD der Firma Siemens entnommen werden, auf der das Sprachmaterial und das Rauschen in einem festen Pegelbezug von -0 dB SNR enthalten sind. Die Pegel der Originalaufnahmen der Siemens-CD verstehen sich laut DIN 45626-1 als Maximalwerte einer Schallpegelmessung mit der impulshaften Zeitbewertung und einer Haltefunktion [23]. Der Pegelbezug 0 dB wurde entsprechend dieser Messung festgesetzt. Würde man den Pegel des gemittelten Dauerschalldruckpegels (L_{eq}) festlegen, würde sich der Pegelbezug zwischen den Wörtern und dem CCITT-Rauschen um ca. -6,5 dB verschieben. Da die verwendete Pegelmessung heute nicht mehr üblich ist, kann die Einstellung des absoluten Pegels mithilfe des CCITT-Rauschens auch anhand der Fast-Bewertung erfolgen. Entsprechend DIN 45626-1 ist hierbei im Vergleich zur ursprünglich verwendeten Impulsbewertung eine Differenz von -0,5 dB zu berücksichtigen (siehe auch [22]).

Die Norm DIN 45626-1 enthält zusätzlich zu den Pegelangaben des Testmaterials Bezugskurven für den FET und FMT in Ruhe, welche anhand von normalhörenden Versuchspersonen für das monaurale Hören im Freifeld erstellt wurden (siehe Abb. 8). Für das binau-

rale Hören verschieben sich die Bezugskurven laut DIN 45626-1 um 3 dB zu niedrigeren Pegeln [23].

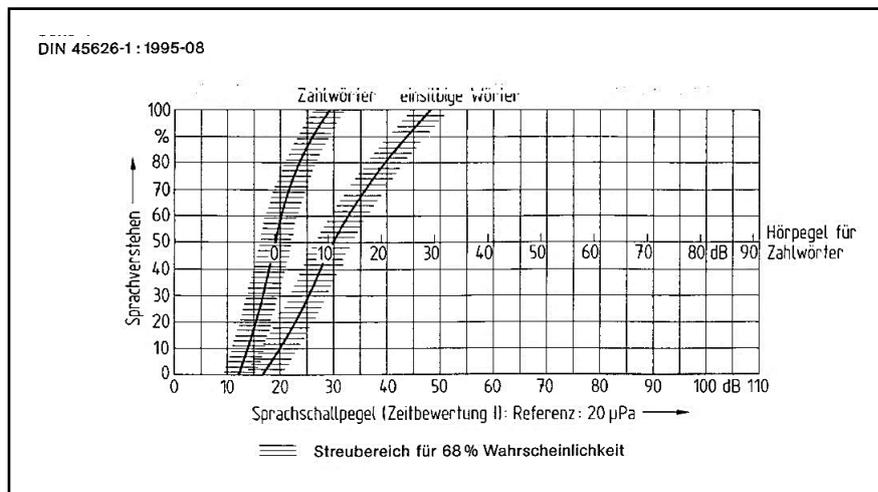


Abb. 8: Bezugskurven für den FET und FMT für das monaurale Hören, getestet an normalhörenden Personen [23]

2.4 Festlegungen für Sprachaudiometrie entsprechend DIN EN ISO 8253-3

Eine wichtige internationale Norm für Sprachtests ist die DIN EN ISO 8253-3, welche allgemeine Anforderungen und Vorgaben für die Erstellung von Sprachtests enthält. Darüber hinaus enthält die Norm Angaben über die Vorbereitung und Einweisung der Versuchspersonen, über die Art und Darbietung des Zusatzschalls bei einer Sprachaudiometrie sowie über die Bestimmung von Bezugskurven für einen Sprachtest.

Das Sprachverstehen im Störgeräusch soll laut Empfehlung dieser Norm so bestimmt werden, dass das Sprachsignal von einem Lautsprecher aus einer Richtung von 0° dargeboten wird und das Störsignal symmetrisch aus Lautsprechern von $\pm 45^\circ$ kommt. Hierbei wird für das Sprachsignal ein Schallpegel von 65 dB empfohlen, während der Schallpegel des Störgeräuschs variiert werden kann.

Für das Erstellen von Bezugskurven des Sprachverstehens gibt diese Norm vor, dass eine ausreichende Anzahl von männlichen und weiblichen Personen im Alter von 18 bis 25 Jahren mit dem entsprechenden Sprachverständlichkeitstest geprüft werden sollen. Die Hörschwelle der Studienteilnehmer soll bei den Frequenzen von 250 Hertz bis 8000 Hertz maximal 10 dB HL betragen. Das Hörvermögen darf bei maximal zwei Frequenzen bei 15 dB HL liegen [2].

2.5 Psychometrische Funktionen

Für die Darstellung der Bezugskurven des Freiburger Einsilbertests im Störgeräusch wird der Medianwert des Sprachverstehens als Funktion des SNR abgebildet [2]. Da es sich hierbei um den Zusammenhang zwischen der Stärke eines Reizes und der Wahrscheinlichkeit, den Reiz zu entdecken, handelt, ergibt sich für die Darstellung der Bezugskurve eine psychometrische Funktion. Je nach Art der Wahrscheinlichkeitsverteilungen kann

die psychometrische Funktion durch verschiedene mathematische Funktionen angenähert werden. Als Zielfunktion für die Erstellung der Bezugskurven wird häufig die logistische Funktion genutzt, welche durch die Gleichung

$$f_{sig}(c_\theta, c_\sigma, \Phi) = \frac{1}{1 + e^{\frac{-c_\sigma}{c_\theta}(\Phi - c_\theta)}} \quad (1)$$

beschrieben wird und eine s-förmige Kurve ergibt [24].

Die Wahrnehmungsschwelle c_θ beschreibt bei dieser Funktion die Reizintensität Φ , bei der eine Detektionswahrscheinlichkeit von 50 % erreicht wird. Die Steigung c_σ der Funktion an der Wahrnehmungsschwelle gibt Aufschluss über die Empfindlichkeit der Detektion eines Reizes in Bezug zur Änderung der Reizintensität. Je steiler die Kurve verläuft, desto kleiner ist die wahrnehmbare Reizänderung [24].

Für das Erstellen einer psychometrischen Funktion für den FET im Störgeräusch, welche auch als Diskriminationsfunktion bezeichnet wird, kann die Detektionswahrscheinlichkeit mit der Gleichung

$$p(SRT, s_{50}, SNR) = \frac{100\%}{1 + e^{0,04 \cdot s_{50}(SRT - SNR)}} \quad (2)$$

berechnet werden [2].

Als Wahrnehmungsschwelle wird hierbei derjenige SNR bezeichnet, bei dem ein Sprachverstehen von 50 % erreicht wird (SRT) (siehe Abb. 9). In diesem Punkt hat die psychometrische Funktion die maximale Steigung (s_{50}).

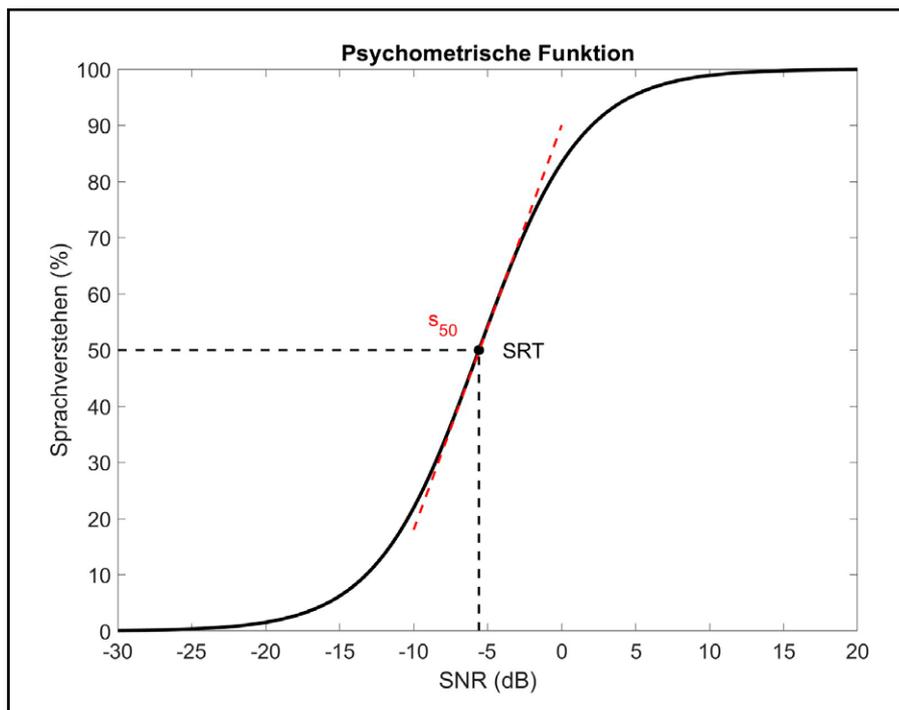


Abb. 9: Psychometrische Funktion mit Sprachverständlichkeitsschwelle $SRT = -5,6$ dB und Steigung $s_{50} = 7,2$ %/dB

Diese Funktion besitzt zwei Freiheitsgrade (SRT und s_{50}), sodass mindestens zwei Punkte gegeben sein müssen, um den Verlauf eindeutig bestimmen zu können. Häufig stehen mehr als zwei Messpunkte zur Verfügung, sodass nach der Methode der kleinsten Quadrate eine Ausgleichskurve, z. B. mit einem nichtlinearen Optimierungsverfahren, bestimmt werden kann. Darüber hinaus ist die Anfälligkeit bei der Bestimmung der Freiheitsgrade (SRT und s_{50}) abhängig von der Position der Messpunkte. Diese sollten beispielsweise nicht ausschließlich im Sättigungsbereich oder zu dicht beieinander liegen [25].

3. Materialien und Methoden

3.1 Materialien und Messaufbau

Der Versuch wurde in einem mit Sonex W-Lochblechverkleidung und Teppich ausgestatteten, reflexionsarmen Prüfraum des Deutschen Hörgeräte Instituts durchgeführt, welcher eine Grundfläche von 21,9 m² und ein Raumvolumen von 68,7 m³ hat. Die Signale wurden mit der RME Fireface 802-Soundkarte über sechs Genelec 8020A-Lautsprecher abgegeben. Die Entzerrung der Lautsprecher erfolgte zu Beginn jedes Testtags mit einem Mikrofon Typ 4190 von Brüel & Kjaer. Hierfür wurde das Referenzmikrofon in der Kopfmittle und auf Höhe der Ohren des Probanden platziert. Anschließend wurde nacheinander über jeden Lautsprecher ein rosa Rauschen abgegeben und in 1/6-Oktavbändern gefiltert. Für jedes Oktavband wurde die Abweichung des Mittenfrequenzpegels vom Sollwert bestimmt und interpoliert. Anschließend wurde für jeden Lautsprecher eine Impulsantwort berechnet und gespeichert, welche dann mit dem über den entsprechenden Lautsprecher abgegebenen Signal gefaltet wurde.

Die sechs Lautsprecher waren in einem Kreis mit einem Radius von einem Meter an den Positionen 0°, 45°, 90°, 180°, -90° und -45° angeordnet (siehe Abb. 10).

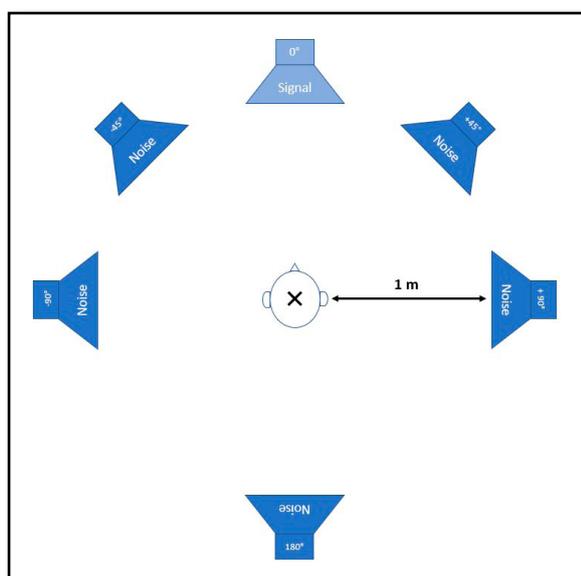


Abb. 10: Anordnung der Lautsprecher und Position des Probanden

Bei dem Versuchsaufbau saß der Proband im Zentrum des Lautsprecherkreises auf einem arretierten Stuhl, sodass sich die Position des Probanden während des Versuchs nicht geändert hat. Der Proband schaute während des gesamten Versuchs zum 0°-Lautsprecher, aus dem das Sprachsignal mit einem festen Pegel von 65 dB kam. Das kontinuierliche CCITT-Rauschen wurde gleichzeitig über den zuvor definierten Lautsprecher mit dem festgelegten Pegel abgegeben. Für den Versuch wurden die Aufnahmen des Freiburger Einsilbertests und das kontinuierliche CCITT-Rauschen der CD der Firma Siemens verwendet. Die Schallpegel für die einzelnen Wörter des FET sowie für das CCITT-Rauschen wurden wie in Kapitel 2.3 beschrieben angepasst.

Die Antworten der Probanden wurden während des Versuchs mit einer Übertragungsanlage an den Prüfer übertragen.

3.2 Methodik

3.2.1 Signaldarbietung

Für die Durchführung der Studie wurde über Matlab eine Benutzeroberfläche mit diversen Anzeigen und Bedienelementen programmiert, die während der Studie benötigt wurden (siehe Abb. 11).

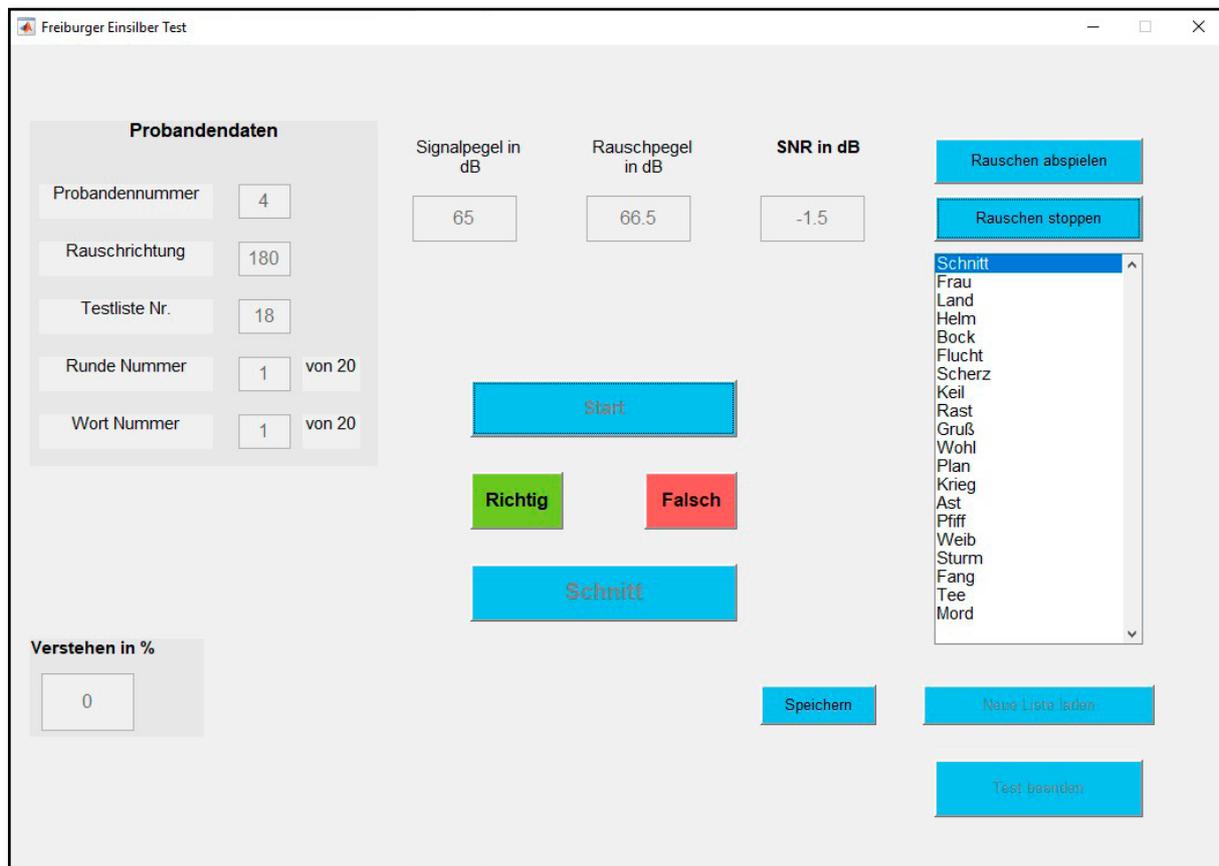


Abb. 11: Benutzeroberfläche für die Steuerung der Studie

Das Rauschen wurde während der gesamten Darbietung der Testliste kontinuierlich abgespielt und setzte vier Sekunden vor dem Abspielen des ersten Wortes ein. Innerhalb der Testlisten wurden die originalen Wortreihenfolgen verwendet, die von Karl-Heinz Hahlbrock zusammengestellt wurden. Nachdem jedes Wort der jeweiligen Testliste abgespielt wurde, änderten sich die Rauschrichtung und der SNR. Anschließend wurde die nächste Testliste mit einer neuen Rauschrichtung und einem neuen SNR wiedergegeben. Nach jeweils vier Testlisten fand eine Pause von fünf Minuten statt, um Ermüdungseffekten entgegenzuwirken. Nach diesem Verfahren werden bei jedem Probanden 20 Runden durchlaufen. Hierbei wurde bei jedem Probanden jede der 20 Testlisten in randomisierter Reihenfolge einmal geprüft. Entsprechend eines lateinischen Quadrates wurden die Listen über 20 Probanden so variiert, dass jede Liste einmal mit jeder Testkondition dargeboten wurde. Bei den Richtungen 45° und 90° wurde das Signal zudem abwechselnd von der linken und rechten Seite dargeboten. Die Ergebnisse beider Seiten wurden für jeden Winkel aufgrund der zu erwartenden Symmetrie zusammen ausgewertet. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass der Einfluss von gegenläufigen Asymmetrien des Messaufbaus durch eine Mittelung der beiden Seiten unterdrückt wird.

3.2.2 Testkonditionen

Die Studie wurde mit 40 Studienteilnehmern durchgeführt, die den Anforderungen der Norm DIN EN ISO 8253 für das Bestimmen von Bezugskurven entsprachen. Insgesamt nahmen an der Studie zehn männliche und 30 weibliche Probanden mit einem Durchschnittsalter von 21,45 Jahren teil. Bei jedem Probanden wurden zunächst eine Otoskopie und eine Luftleitungshörschwellenprüfung durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Probanden normalhörend sind (siehe Abb. 12). Die individuellen Tonaudiogramme können Anhang I entnommen werden.

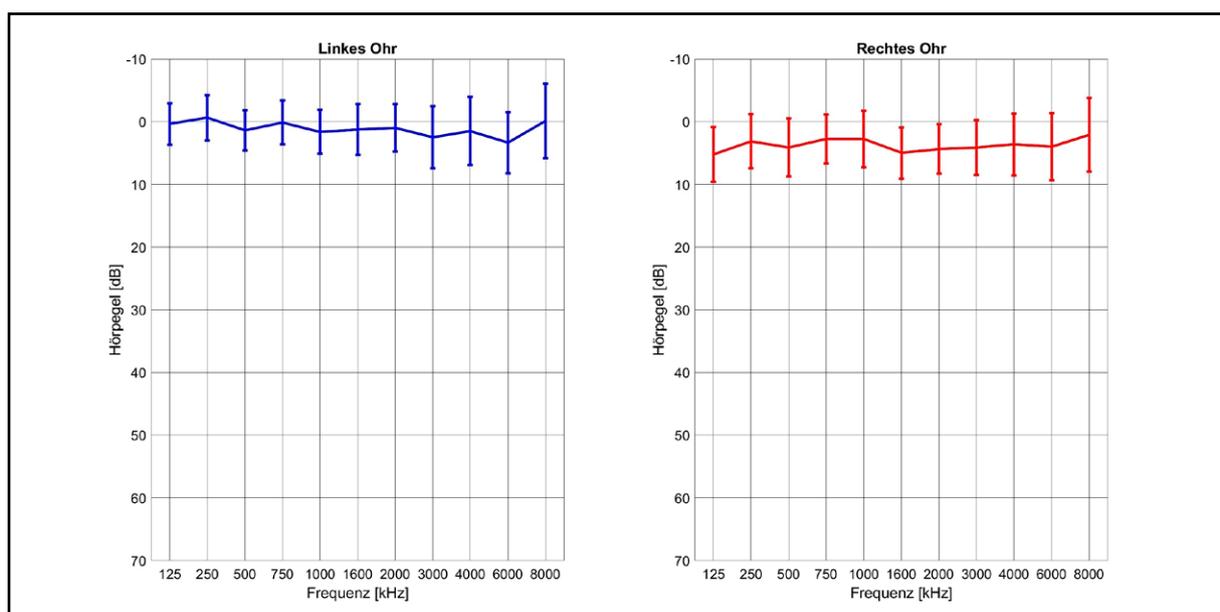


Abb. 12: Mittelwerte und Standardabweichungen der Tonaudiogramme der 40 Probanden

Anschließend wurde der Freiburger Sprachtest wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben durchgeführt. Aufgrund der in Kapitel 2.1 beschriebenen erwarteten Symmetrie zwischen den Bezugskurven auf der rechten und linken Medianebene des Probanden werden die Richtungen $+45^\circ$ und -45° sowie $+90^\circ$ und -90° für die Wahl der SNR zusammengefasst, sodass insgesamt fünf Rauschrichtungen bei dieser Studie betrachtet wurden (siehe Tabelle 2). Für jede Rauschrichtung sollte für jeweils vier festgelegte SNR das Sprachverstehen in Prozent ermittelt werden. Insgesamt ergaben sich so 20 Kombinationen aus Rauschrichtung und SNR. Jede der Kombinationen wurde ebenfalls in randomisierter Reihenfolge bei jedem Probanden einmal geprüft. Die Einweisung der Probanden kann Anhang I entnommen werden.

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, sollten die SNR so gewählt werden, dass sie den Verlauf der psychometrischen Funktion möglichst genau abbilden, ohne im Sättigungsbereich zu liegen. Um die Testkonditionen festzulegen, wurde deshalb für jede Rauschrichtung eine Abschätzung der Sprachverständlichkeitsschwelle vorgenommen. Hierfür wurde eine Studie herangezogen, in der der Nutzen der räumlichen Trennung (in dB SNR) in Bezug zum SRT für S_0N_0 ermittelt wurde (siehe Abb. 13) [3].

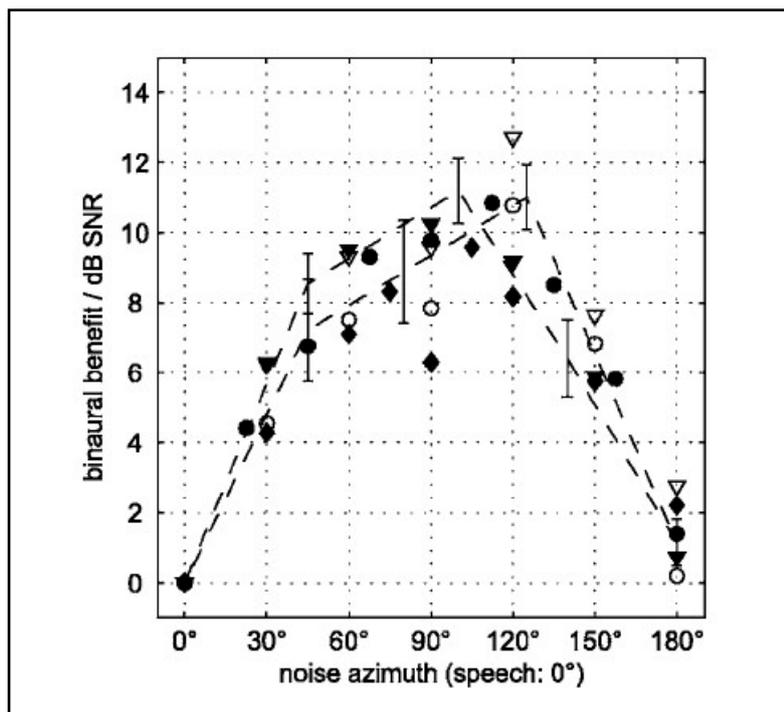


Abb. 13: Nutzen der räumlichen Trennung vom Störgeräusch in dB SNR in Bezug zum SRT für S_0N_0 für verschiedene Richtungen [3]

Als Bezugswert für den SRT des Freiburger Einsilbertests im Störgeräusch für die Situation S_0N_0 diente ein Wert von -2 dB [26]. Hieraus erfolgte eine erste Abschätzung der Sprachverständlichkeitsschwellen für die einzelnen Richtungen (siehe Tabelle 2). Ausgehend von den vermuteten Werten für den SRT, sollten für jede Richtung vier SNR-Werte im Abstand von $\pm 1,5$ dB und $\pm 4,5$ dB um den SRT bestimmt werden (siehe Tabelle 2). Diese Abstände wurden anhand einer Bezugskurve für den FET im Störgeräusch für die Darbietung S_0N_0

festgelegt [5]. Die Werte mit diesem Abstand um den SRT liegen gut verteilt im sensitiven Bereich der Diskriminationsfunktion.

Darbietung	S_0N_0	S_0N_{45}	S_0N_{90}	S_0N_{180}	$S_0N_{\pm 45}$
Vermuteter SRT	-2 dB	-10 dB	-13 dB	-3 dB	-2 dB
Zu messende SNR	-3,5 dB	-8,5 dB	-11,5 dB	-1,5 dB	-3,5 dB
	-6,5 dB	-11,5 dB	-14,5 dB	-4,5 dB	-6,5 dB
	-0,5 dB	-5,5 dB	-8,5 dB	1,5 dB	-0,5 dB
	2,5 dB	-14,5 dB	-17,5 dB	-7,5 dB	2,5 dB

Tabelle 2: In der Vorstudie verwendete Darbietungen und die zugehörigen SNR

Bei der gleichzeitigen Darbietung aus $\pm 45^\circ$ entsteht für den Probanden der Eindruck, dass das Signal von 0° abgegeben wird (siehe Kapitel 2.1). Deshalb wurden für die Rauschrichtungen 0° und $\pm 45^\circ$ dieselben SNR gewählt. In der Praxis stehen in der Regel nur zweikanalige Audiometer zur Verfügung, sodass bei der Konstellation $S_0N_{\pm 45}$, das Störgeräusch über den gleichen Kanal wiedergegeben werden muss. Um bei dieser Darbietung der Praxis möglichst nahezukommen, wurde auch in dem verwendeten Versuchsaufbau das gleiche CCITT-Rauschen aus beiden Störgeräuschlautsprechern jeweils um 6 dB abgesenkt wiedergegeben, sodass nach der Überlagerung der angegebene SNR entsteht. Die festgelegten SNR-Werte wurden innerhalb einer Vorstudie mit zwölf Probanden überprüft. Die Ergebnisse für die Sprachverständlichkeitsschwellen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Darbietung	S_0N_0	S_0N_{45}	S_0N_{90}	S_0N_{180}	$S_0N_{\pm 45}$
Erwarteter SRT	-2 dB	-10 dB	-13 dB	-3 dB	-2 dB
Ermittelter SRT_med	-1,85 dB	-8,74 dB	-10,29 dB	-6,11 dB	-6,18 dB

Tabelle 3: Auflistung der erwarteten und in der Vorstudie ermittelten medianen SRT-Werte in dB

Aufgrund der Abweichungen der Ergebnisse von den vermuteten Werten wurden die SNR für die Hauptstudie angepasst. Die in der Hauptstudie verwendeten SNR-Werte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Darbietung	S_0N_0	S_0N_{45}	S_0N_{90}	S_0N_{180}	$S_0N_{\pm 45}$
Erwarteter SRT	-2 dB	-9 dB	-10 dB	-6 dB	-6 dB
Verwendete SNR	-6,5 dB	-13,5 dB	-14,5 dB	-10,5 dB	-10,5 dB
	-3,5 dB	-10,5 dB	-11,5 dB	-7,5 dB	-7,5 dB
	-0,5 dB	-7,5 dB	-8,5 dB	-4,5 dB	-4,5 dB
	2,5 dB	-4,5 dB	-5,5 dB	-1,5 dB	-1,5 dB

Tabelle 4: In der Hauptstudie verwendete SNR-Werte

4. Ergebnisse und Auswertung

4.1 Richtungsabhängige Bezugskurven

Um nachzuweisen, ob die gewählten Stimuli zu den in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Ergebnissen oberhalb und unterhalb der Sprachverständlichkeitsschwelle von 50 % geführt haben, wurde das Sprachverstehen in Prozent von allen Probanden für jede Richtung und jeden SNR als Boxplot dargestellt. Als Beispiel sei hier die Auswertung der Sprachverständlichkeit für den Einfallswinkel 0° des Störgeräuschs dargestellt (siehe Abb. 14).

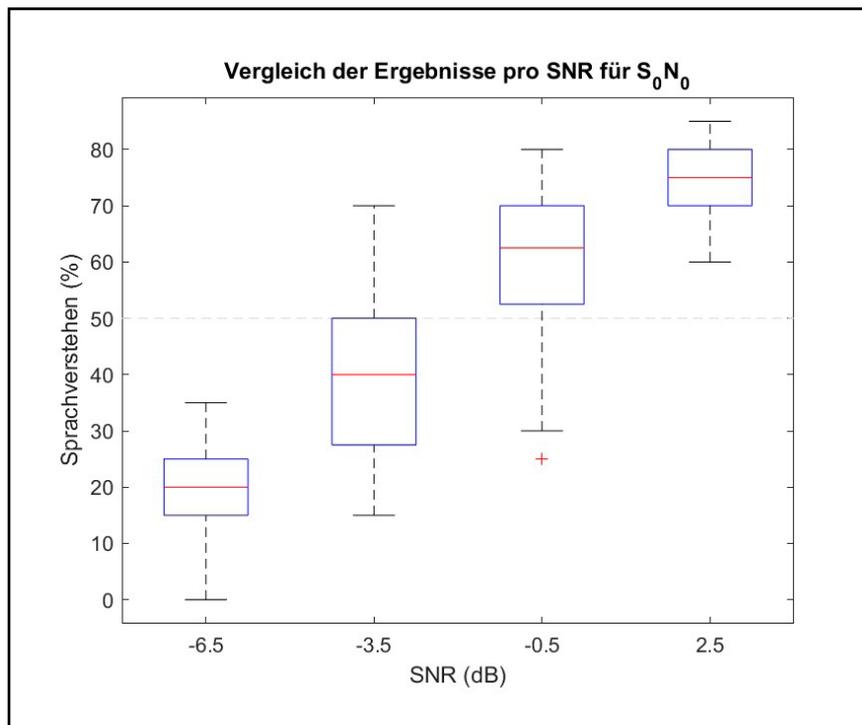


Abb. 14: Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_0 und die vier dargebotenen SNR

Das mediane Sprachverstehen für den SNR von -3,5 dB liegt bei 40 %, und das mediane Sprachverstehen für -0,5 dB SNR liegt bei 62,5 %, sodass der SRT in der Mitte liegt. Außerdem liegen die Mediane des Sprachverstehens für -6,5 dB SNR und 2,5 dB SNR nicht im Sättigungsbereich, sodass sichergestellt ist, dass der sensitive Bereich der psychometrischen Funktion bei der Rausrichtung 0° durch die gewählten Stimuli gut abgebildet wurde.

Bei den anderen dargebotenen Rausrichtungen konnte ebenfalls festgestellt werden, dass das mediane Sprachverstehen der Probanden bei den gewählten SNR gut verteilt um den SRT liegt. Die Abbildungen der anderen Rausrichtungen können Anhang II entnommen werden.

Anschließend wurde zunächst, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, eine individuelle psychometrische Funktion für jeden der 40 Probanden erstellt. Hierbei muss angemerkt werden, dass nur vier Listen des FET bei vier verschiedenen SNR für die Bestimmung der individu-

ellen Diskriminationsfunktion dargeboten wurden und sich dadurch eine große Streuung der individuellen Daten ergibt. Für jeden der vier dargebotenen SNR wurde das mediane Sprachverstehen in Prozent berechnet und wiederum eine psychometrische Funktion angenähert, welche als Bezugskurve für die jeweilige Richtung dient. Zunächst soll die ermittelte Bezugskurve für S_0N_0 näher betrachtet werden (siehe Abb. 15).

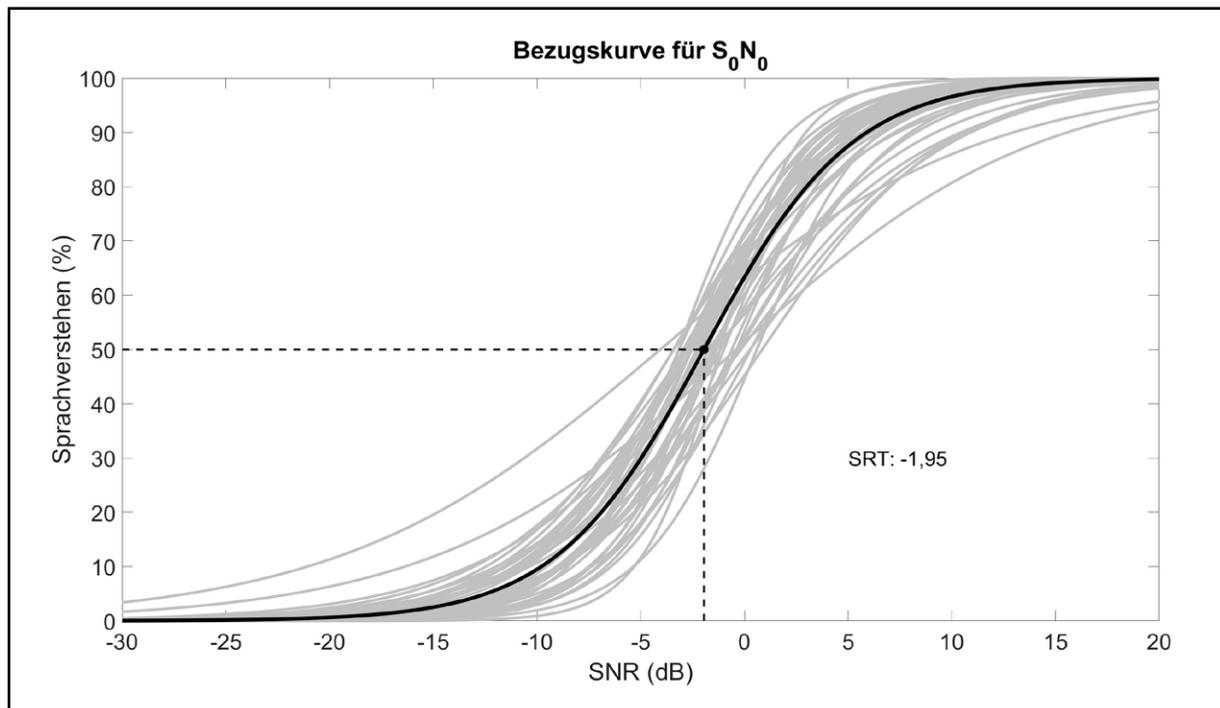


Abb. 15: Bezugskurve für S_0N_0 und individuelle psychometrische Funktionen

Aus der Bezugskurve für die Darbietung des CCITT-Rauschens von 0° ergibt sich ein SRT von -1,95 dB. Dieser Wert wird mit dem Literaturwert einer Studie von Memmeler et al. verglichen, bei der der SRT für den Freiburger Einsilbertest im CCITT-Rauschen für die Darbietung S_0N_0 innerhalb eines adaptiven Verfahrens bestimmt wurde. Memmeler et al. erreichten im Mittel einen SRT von -1,8 dB [26]. Dieser Wert unterscheidet sich um 0,15 dB von dem Wert dieser Studie. Der SRT-Wert der Bezugskurve für die Darbietung S_0N_0 von Winkler et al. unterscheidet sich mit einem Wert von -1,5 dB um 0,45 dB vom SRT der Bezugskurve dieser Studie [5]. Insgesamt zeigt der Vergleich mit diesen Studien für S_0N_0 eine gute Übereinstimmung, was die Validität der Daten bestätigt.

Als Nächstes sollen die Bezugskurven für die anderen Richtungen näher betrachtet werden (siehe Abb. 16 bis Abb. 19).

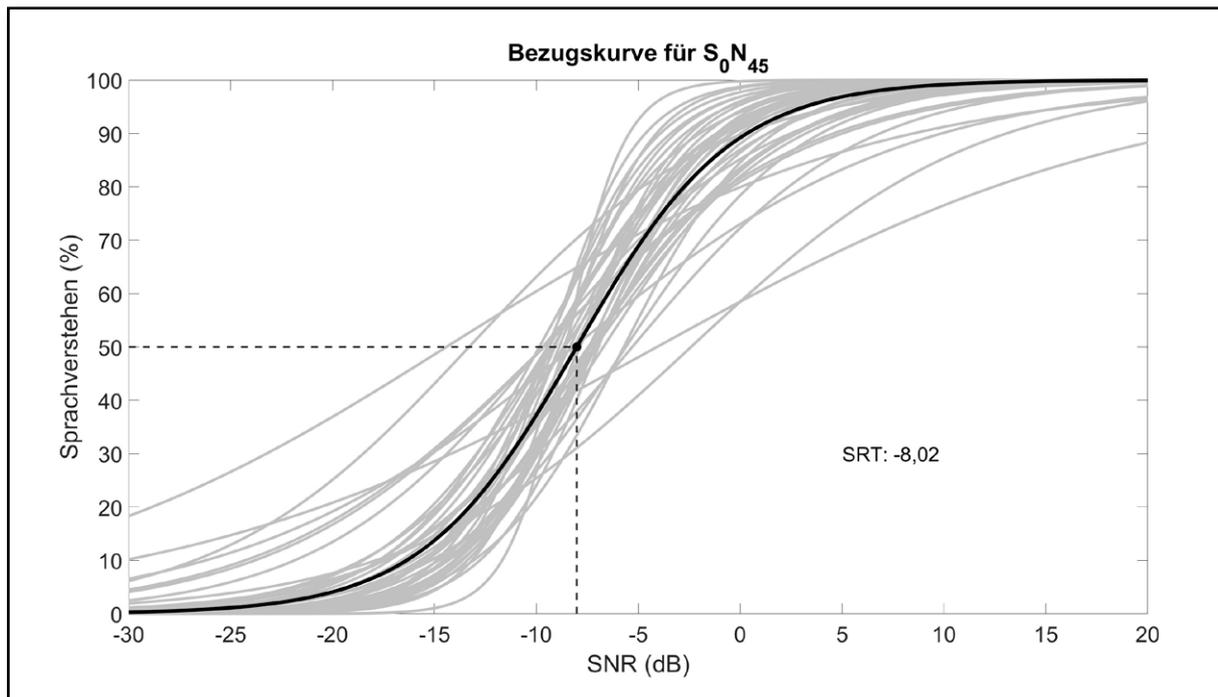


Abb. 16: Bezugskurve für S_0N_{45} und individuelle psychometrische Funktionen

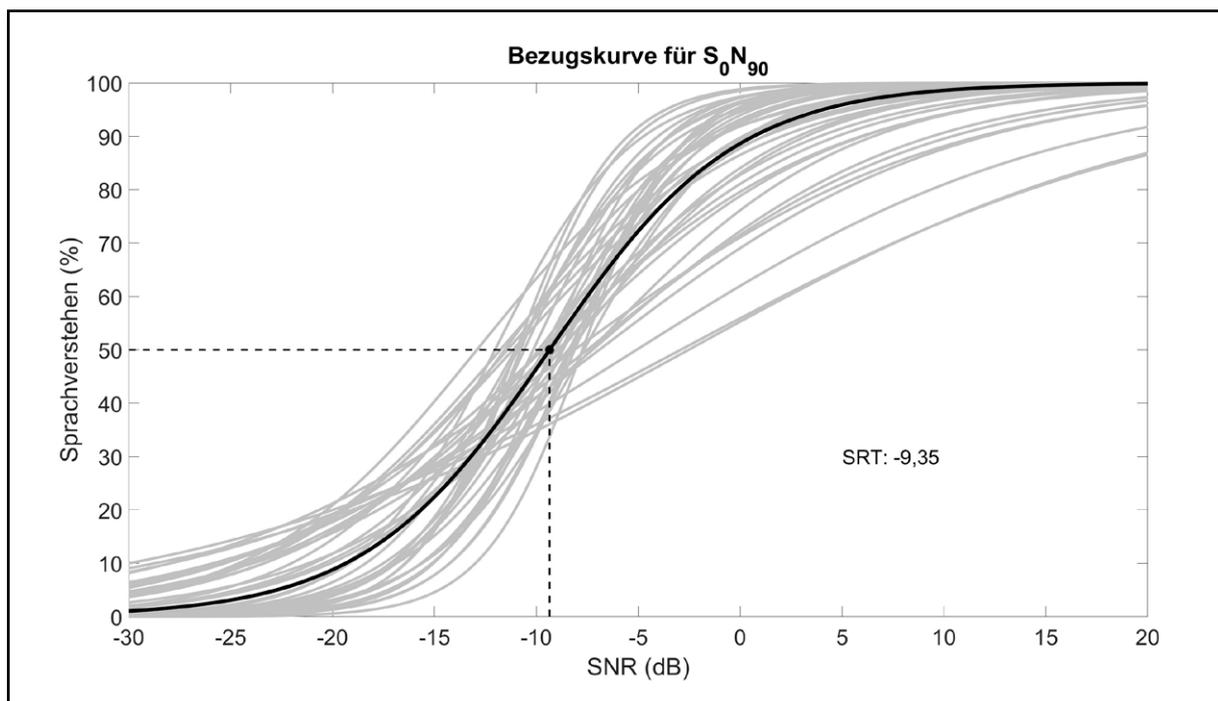


Abb. 17: Bezugskurve für S_0N_{90} und individuelle psychometrische Funktionen

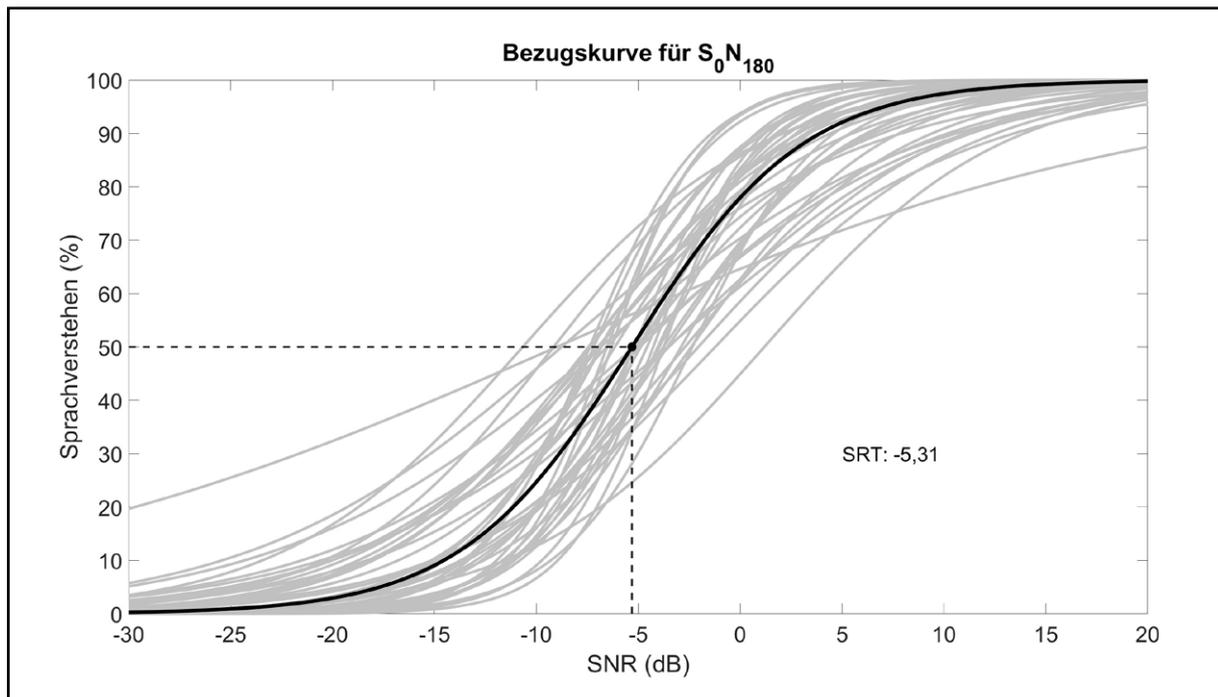


Abb. 18: Bezugskurve für S_0N_{180} und individuelle psychometrische Funktionen

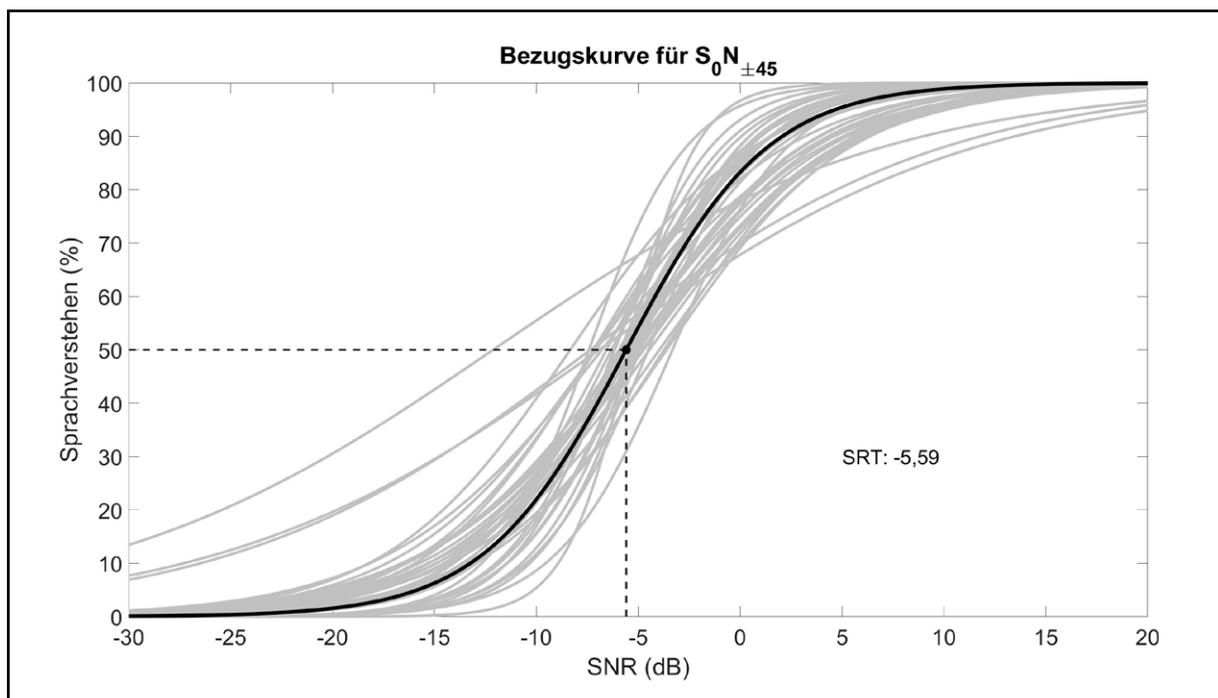


Abb. 19: Bezugskurve für $S_0N_{\pm 45}$ und individuelle psychometrische Funktionen

Zusätzlich zu den grafischen Darstellungen der richtungsabhängigen Bezugskurven wurde der SNR der jeweiligen Bezugskurve in Abhängigkeit des Sprachverstehens als Tabelle dargestellt. Die Tabellen können Anhang III entnommen werden.

Für einen Vergleich der Bezugskurven der einzelnen Rausrichtungen werden die ermittelten SRT und Steigungen betrachtet, welche Tabelle 5 entnommen werden können.

Darbietung	S_0N_0	S_0N_{45}	S_0N_{90}	S_0N_{180}	$S_0N_{\pm 45}$
SRT	-1,95 dB	-8,02 dB	-9,35 dB	-5,31 dB	-5,59 dB
S_{50}	7,00 %	6,58 %	5,49 %	5,94 %	7,18 %
BILD		-6,07 dB	-7,40 dB	-3,36 dB	-3,64 dB

Tabelle 5: SRT und Steigung s_{50} der Bezugskurven sowie Auflistung der Differenzen der jeweiligen SRT zum SRT für die Darbietung S_0N_0 (BILD)

Bei der Analyse der ermittelten SRT-Werte wird deutlich, dass die Sprachverständlichkeitsschwelle für die gleichzeitige Darbietung des Störgeräuschs und der Sprache aus dem 0° Lautsprecher mit einem Wert von -1,95 dB am größten ist und somit die stärkste Maskierung hervorruft. Je weiter sich das Störgeräusch räumlich vom Nutzsignal entfernt, desto kleiner ist der SRT und desto geringer ist die Maskierung der Sprache durch das Störgeräusch. Das wird auch bei der Betrachtung der BILD-Werte deutlich, welche die Differenzen zum SRT für S_0N_0 beschreiben (siehe Tabelle 5). Der BILD-Wert der Darbietung des Rauschens aus 45° beträgt -6,07 dB, wodurch er sich um 0,23 dB von dem Wert der Studie mit -6,3 dB unterscheidet (siehe Tabelle 1) [4]. Für die Rauschrichtung 90° ist die Differenz zu S_0N_0 mit einem Wert von -7,4 dB am größten, da es sich hierbei um die größte räumliche Trennung innerhalb des Sichtfeldes handelt und somit eine bessere getrennte auditive Verarbeitung der Signale möglich ist. Dieser Wert unterscheidet sich um 1,2 dB von dem Wert in Tabelle 1, welcher für S_0N_{90} -8,6 dB beträgt. Die Unterschiede zwischen den BILD-Werten in Tabelle 1 und den in dieser Studie ermittelten BILD-Werten lassen sich zum einen dadurch erklären, dass die Signale über den Kopfhörer angeboten wurden und somit keine spektrale Filterung durch das Außenohr stattfindet. Zum anderen handelt es sich bei der Darbietung über den Kopfhörer um simulierte Einfallswinkel der Signale (siehe Kapitel 2.1). Trotzdem sind die Unterschiede zwischen den Werten gering, sodass von einer Validität der Studie ausgegangen werden kann. Im Vergleich zu S_0N_{90} verbessert sich die Sprachverständlichkeitsschwelle bei der Darbietung S_0N_{180} aufgrund der räumlichen Trennung nicht weiter. Dennoch verbessert sich der SRT-Wert durch die Auswertung von spektralen Verfärbungen und die Abschattung der Ohrmuschel um 3,36 dB gegenüber der Darbietung S_0N_0 . Somit konnten die Effekte des Richtungshörens aus Kapitel 2.1 und des SRM aus Kapitel 2.2 bestätigt werden.

Aufgrund der in Kapitel 2.1 beschriebenen Summenlokalisierung wurde angenommen, dass die SRTs für die Darbietungen $S_0N_{\pm 45}$ und S_0N_0 gleich sind. Diese Vermutung konnte innerhalb der Studie nicht bestätigt werden. Die Darbietung des Rauschens aus $\pm 45^\circ$ bewirkt eine Verbesserung des SRT-Wertes um 3,64 dB gegenüber der Darbietung aus 0°. Die verbesserte Sprachverständlichkeitsschwelle gegenüber der Darbietung S_0N_0 kann damit erklärt werden, dass das Störgeräusch des jeweiligen Lautsprechers um 6 dB abgeschwächt wurde, sodass der entsprechende Summenpegel am Probandenplatz entstand (siehe Kapitel 3.2.2). Durch den geringeren Rauschpegel auf der rechten und linken Seite

ergibt sich für das jeweilige Ohr ein besserer SNR, welcher trotz der gleichen Wahrnehmungsrichtung ein besseres Sprachverstehen erzeugt.

Abb. 20 zeigt die Bezugskurven der fünf Rausrichtungen und verdeutlicht ebenfalls die Unterschiede der Sprachverständlichkeitsschwellen und der Steigungen bei verschiedenen Richtungen des Störgeräuschs. Da verschiedene Einfallswinkel des Störgeräuschs verschiedene Werte für das Sprachverstehen ergeben, kann das Sprachverstehen nur mit der Bezugskurve der gleichen Lautsprecheranordnung verglichen werden.

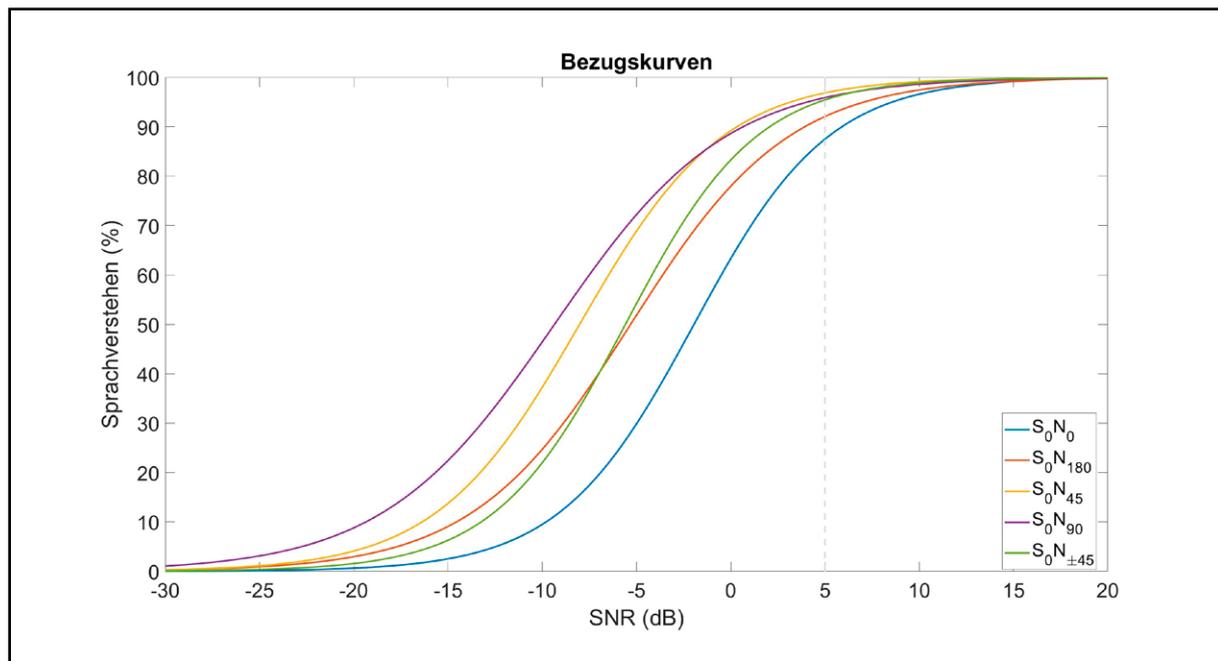


Abb. 20: Bezugskurven der fünf Darbietungen S_0N_0 , S_0N_{180} , S_0N_{45} , S_0N_{90} und $S_0N_{\pm 45}$

Wie in Kapitel 1 beschrieben, soll die Überprüfung des Erfolgs einer Hörgeräteversorgung laut Hilfsmittel-Richtlinie mit einer Vergleichsmessung bei einem SNR von 5 dB erfolgen. Die Bezugskurven ergeben für diesen SNR einen Unterschied der Steigungen und einen Unterschied des Sprachverstehens von bis zu 9,35 % aufgrund verschiedener Einfallswinkel des CCITT-Rauschens. Damit die Ergebnisse der Vergleichsmessung nachvollzogen werden können, ist es unerlässlich, die verwendete Lautsprecheranordnung anzugeben.

4.2 Auswertung der individuell ermittelten Daten

4.2.1 SRT und Steigung der Diskriminationsfunktion

In einem weiteren Schritt wurden die individuell ermittelten SRTs statistisch miteinander verglichen und ausgewertet. Hierfür wurde der SRT jedes Probanden für die jeweilige Richtung des CCITT-Rauschens in einem Boxplot dargestellt (siehe Abb. 21).

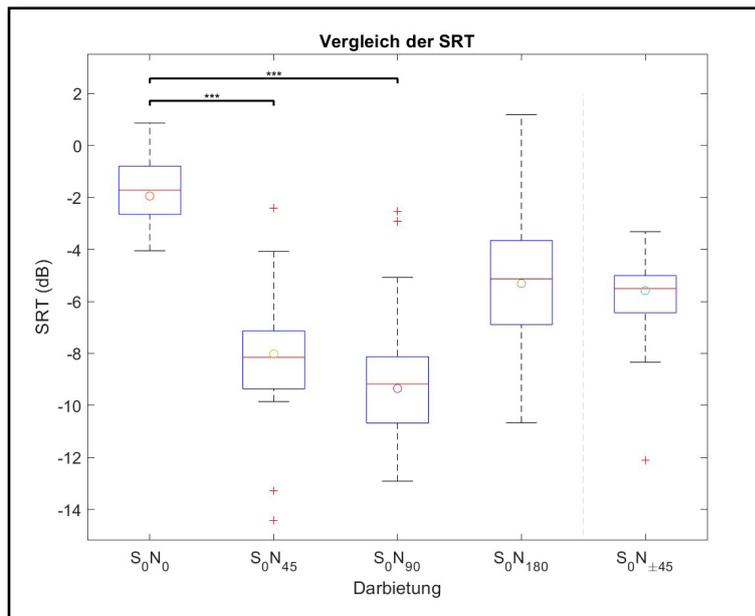


Abb. 21: Boxplots der SRT-Werte jedes Probanden für die fünf Darbietungen S_0N_0 , S_0N_{180} , S_0N_{45} , S_0N_{90} und $S_0N_{\pm 45}$. Die SRT der Bezugskurven sind für jede Rauschrichtung durch einen Kreis gekennzeichnet.

Mit dem Friedman-Test wurden die ermittelten SRT-Werte für die fünf Rauschrichtungen paarweise auf signifikante Unterschiede überprüft. Da hierdurch insgesamt zehn Paarvergleiche entstanden, wurde der kritische Wert mit dem Tukey-Kramer-post-hoc-Test angepasst. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha = 0,05$. Die statistische Berechnung ergab einen höchstsignifikanten Unterschied der Rauschrichtungen 45° und 90° zu S_0N_0 (siehe Tabelle 6).

Darbietung	S_0N_{45}	S_0N_{90}	S_0N_{180}	$S_0N_{\pm 45}$
S_0N_0	0,0009	$4,7424 \cdot 10^{-5}$	0,2807	0,1374
S_0N_{45}		0,9637	0,2980	0,5084
S_0N_{90}				0,1620
S_0N_{180}				0,9967

Tabelle 6: p -Werte des paarweisen Vergleichs der individuellen SRTs aller Darbietungen mit dem Friedman-Test. Die Felder mit höchstsignifikanten Unterschieden sind grau hinterlegt. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha = 0,05$. Der kritische Wert wurde mit dem Tukey-Kramer-post-hoc-Test angepasst.

Die beiden höchstsignifikanten Unterschiede können mit dem Effekt des SRM erklärt werden (siehe Kapitel 4.1).

Bei der Betrachtung der Boxplots in Abb. 21 fällt auf, dass die Streuung der individuellen SRT-Werte für S_0N_{180} größer ist als für die anderen Rauschrichtungen. Das könnte damit erklärt werden, dass sich der SNR im Gegensatz zur Schalldarbietung S_0N_0 bei Bewegung des Kopfes ändert. Sobald sich der Kopf weiter vorne befindet, ist der SNR größer, und das Sprachverstehen verbessert sich. Um das zu vermeiden, wurden die Probanden in der Einweisung gebeten, sich anzulehnen und den Kopf möglichst in dieser Position zu lassen, jedoch treten hierbei trotzdem Differenzen auf. Die Tatsache, dass die Streuungen der individuellen SRT geringer werden, je näher sich das Rauschen beim 0° Lautsprecher be-

findet, lässt ebenfalls darauf schließen, dass die Streuungen durch die individuellen Bewegungen des Kopfes hervorgerufen wurden. Die geringste Streuung ergibt sich für die Darbietung S_0N_0 . Das könnte damit zusammenhängen, dass hierbei der SNR am stabilsten gegenüber Kopfbewegungen ist.

Um die Sensitivitäten der Bezugskurven vergleichen zu können, wurden in einem weiteren Schritt die Steigungen der individuellen psychometrischen Funktionen der jeweiligen Richtungen in einem Boxplot dargestellt (siehe Abb. 22).

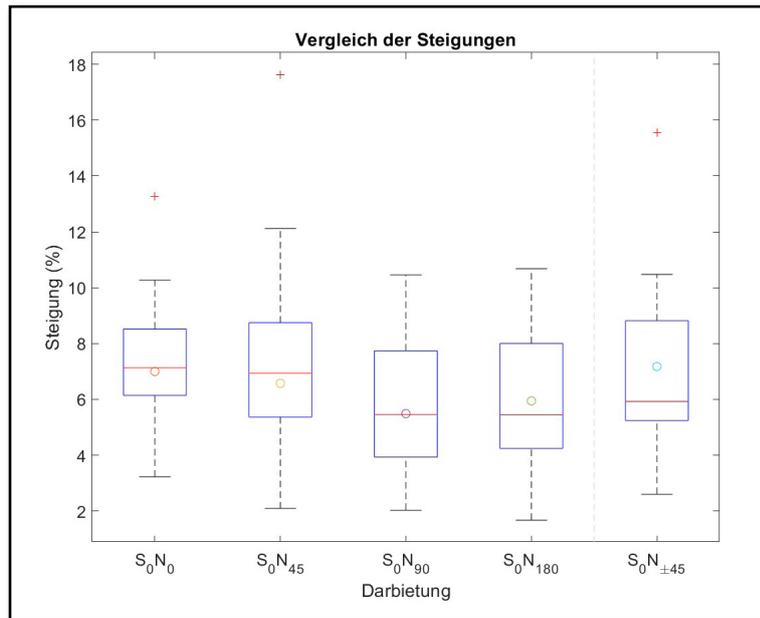


Abb. 22: Boxplots der Steigungen jedes Probanden für die fünf Darbietungen S_0N_0 , S_0N_{180} , S_0N_{45} , S_0N_{90} und $S_0N_{\pm 45}$. Die Steigungen der Bezugskurven sind für jede Rausrichtung durch einen Kreis gekennzeichnet.

Für die Steigungen wurde ebenfalls ein paarweiser Vergleich aller Richtungen anhand des Friedman-Tests durchgeführt. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha = 0,05$. Der kritische Wert wurde mit dem Tukey-Kramer-post-hoc-Test angepasst. Die Wahrscheinlichkeitswerte des Friedman-Tests können Tabelle 7 entnommen werden.

Darbietung	S_0N_{45}	S_0N_{90}	S_0N_{180}	$S_0N_{\pm 45}$
S_0N_0	0,9984	0,7882	0,7955	0,9896
S_0N_{45}		0,9896	0,9174	0,9218
S_0N_{90}			0,9999	0,9650
S_0N_{180}				0,9675

Tabelle 7: p -Werte des paarweisen Vergleichs der individuellen Steigungen aller Darbietungen mit dem Friedman-Test. Das Signifikanzniveau beträgt $\alpha = 0,05$. Der kritische Wert wurde mit dem Tukey-Kramer-post-hoc-Test angepasst.

Der statistische Vergleich der Steigungen ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Rausrichtungen. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da für jede Richtung die gleichen Signale und das gleiche Studiendesign verwendet wurden. Die Streuungen der Steigungen sind hauptsächlich auf die geringe Anzahl von nur vier

Testlisten pro Kondition zurückzuführen. Durch die große Streuung der Daten kann es vorkommen, dass Probanden bei einem größeren SNR-Wert ein schlechteres Sprachverstehen erzielen. Dies führt zu sehr flachen Diskriminationsfunktionen und könnte die große Streuung der individuell ermittelten Steigungen erklären.

4.2.2 Vergleich der Ergebnisse der männlichen und weiblichen Probanden

Da innerhalb der Studie eine ungleiche Anzahl von männlichen und weiblichen Probanden untersucht wurde, erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Probandengruppen. Hierfür wurden die Ergebnisse der männlichen und weiblichen Probanden jeweils in einem Boxplot dargestellt (siehe Abb. 23).

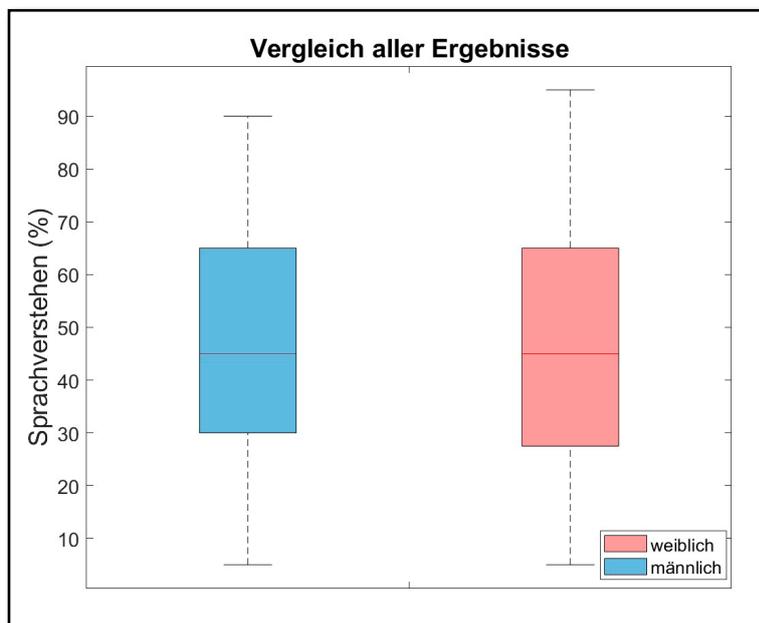


Abb. 23: Boxplots der gesamten Ergebnisse der männlichen und weiblichen Probanden

Für den statistischen Vergleich wurde der Mann-Whitney-U-Test für nicht normalverteilte, ungepaarte Stichproben durchgeführt. Es ergab sich mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0,9298$ und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ kein signifikanter Unterschied zwischen den gesamten Ergebnissen der männlichen und weiblichen Probanden.

Auch eine separate Betrachtung der einzelnen Darbietungen und der jeweiligen SNR ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Sprachverstehen der männlichen und der weiblichen Probanden (siehe Abb. 24 und Tabelle 8). Da diese statistische Auswertung vier Paarvergleiche ergibt, wurde das Signifikanzniveau nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ angepasst.

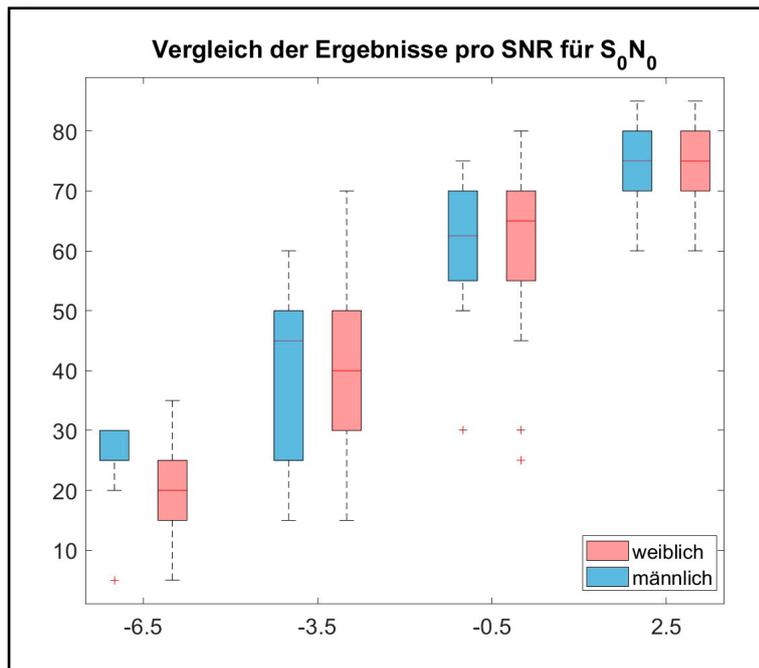


Abb. 24: Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung S_0N_0

H_0	$\mu_{m_{-6,5}} = \mu_{w_{-6,5}}$	$\mu_{m_{-3,5}} = \mu_{w_{-3,5}}$	$\mu_{m_{-0,5}} = \mu_{w_{-0,5}}$	$\mu_{m_{2,5}} = \mu_{w_{2,5}}$
p-Werte Mann-Whitney-U-Test	0,1120	0,9370	0,9120	0,5929

Tabelle 8: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_0 . Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ angepasst

Die Wahrscheinlichkeitswerte sowie die Grafiken für die anderen Richtungen sind in Anhang IV aufgeführt.

4.2.3 Untersuchung von Asymmetrien im Messaufbau

Die Ergebnisse der Rausrichtungen $+45^\circ$ und -45° sowie $+90^\circ$ und -90° wurden für das Erstellen der Bezugskurven zusammen ausgewertet. Um festzustellen, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen der jeweiligen Richtungen besteht, wurden zunächst alle Ergebnisse für das Sprachverstehen der Rausrichtungen $+45^\circ$ und -45° jeweils in einem Boxplot dargestellt (siehe Abb. 25).

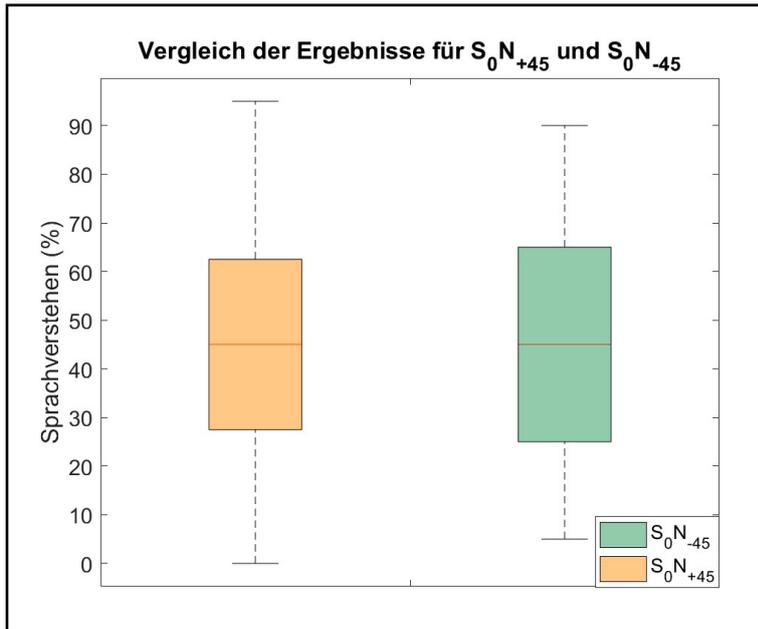


Abb. 25: Boxplots der gesamten Ergebnisse für S_0N_{+45} und S_0N_{-45}

Die Mittelwerte sind nach dem Mann-Whitney-U-Test bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0,7570$ gleich. Auch bei einer paarweisen Betrachtung der SNR ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen für $+45^\circ$ und -45° (siehe Abb. 26 und Tabelle 9).

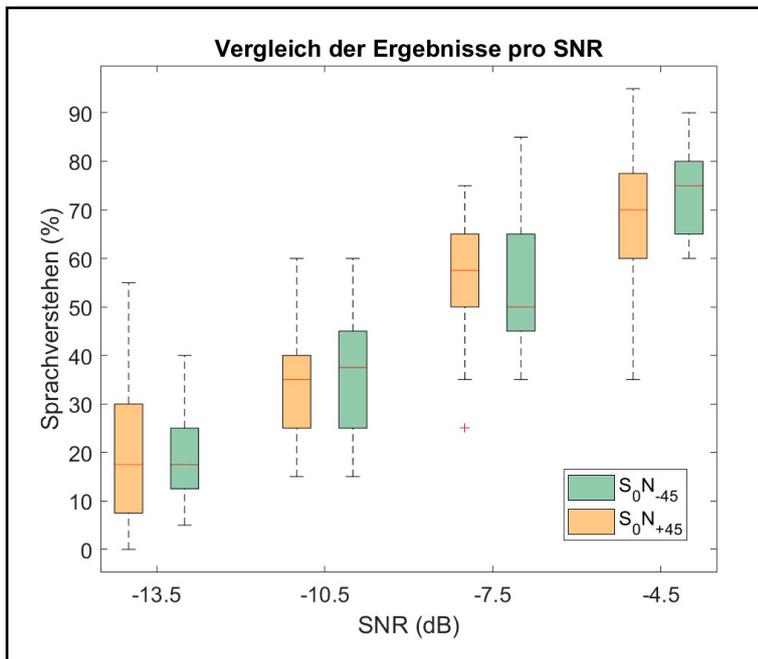


Abb. 26: Boxplots des Sprachverstehens in % für jeden SNR für S_0N_{+45} und S_0N_{-45}

Da die Stichproben normalverteilt sind, wurde der ungepaarte t-Test verwendet. Hierbei werden vier unabhängige Stichproben geprüft, weshalb das Signifikanzniveau nach der Bonferroni-Korrektur $\alpha=0,0125$ beträgt. Die Wahrscheinlichkeitswerte können Tabelle 9 entnommen werden.

H_0	$\mu_{-13,5_{-45^\circ}} = \mu_{-13,5_{-45^\circ}}$	$\mu_{-10,5_{-45^\circ}} = \mu_{-10,5_{-45^\circ}}$	$\mu_{-7,5_{-45^\circ}} = \mu_{-7,5_{-45^\circ}}$	$\mu_{-4,5_{-45^\circ}} = \mu_{-4,5_{-45^\circ}}$
p-Werte ungepaarter t-Test	0,5547	0,4062	0,8107	0,1063

Tabelle 9: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte für S_0N_{+45} und S_0N_{-45} mittels ungepaartem t-Test. Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ korrigiert.

Bei dem Vergleich der Richtungen $+90^\circ$ und -90° ergab sich mit dem ungepaarten t-Test für normalverteilte Stichproben mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ und einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0,8379$ ebenfalls kein signifikanter Unterschied (siehe Abb. 27).

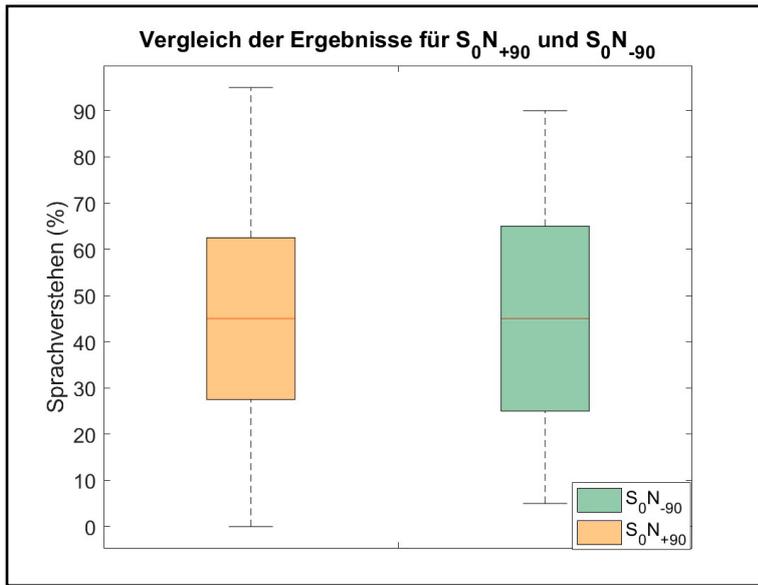


Abb. 27: Boxplots der gesamten Ergebnisse für S_0N_{+90} und S_0N_{-90}

Die separate Betrachtung der einzelnen SNR ergab mit dem ungepaarten t-Test und einem nach Bonferroni korrigierten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,125$ ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen $+90^\circ$ und -90° (siehe Abb. 28 und Tabelle 10).

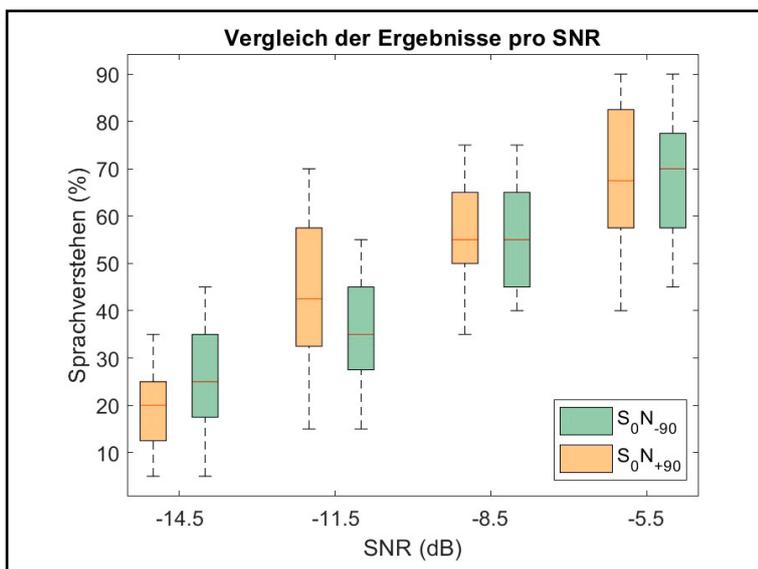


Abb. 28: Boxplots des Sprachverstehens in % für jeden SNR für S_0N_{+90} und S_0N_{-90}

H_0	$\mu_{-14,5\ 90^\circ} = \mu_{-14,5\ -90^\circ}$	$\mu_{-11,5\ 90^\circ} = \mu_{-11,5\ -90^\circ}$	$\mu_{-8,5\ 90^\circ} = \mu_{-8,5\ -90^\circ}$	$\mu_{-5,5\ 90^\circ} = \mu_{-5,5\ -90^\circ}$
p-Werte ungepaarter t-Test	0,0342	0,0629	0,9443	0,8681

Tabelle 10: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte für S_0N_{+90} und S_0N_{-90} mittels ungepaartem t-Test. Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ korrigiert.

Anhand der durchgeführten statistischen Tests konnten für die Rauschrichtungen $+45^\circ$ und -45° sowie für die Rauschrichtungen $+90^\circ$ und -90° keine gegenläufigen Asymmetrien durch den Messaufbau festgestellt werden.

5. Fazit

In dieser Arbeit wurden insgesamt fünf Bezugskurven für den Freiburger Einsilbertest im Störgeräusch aus verschiedenen Einfallrichtungen ermittelt, die einen Vergleich des Sprachverstehens bei derselben Rauschrichtung mit Normalhörenden ermöglichen. Für das Studiendesign wurden die in der Norm DIN EN ISO 8253-3 empfohlene Rauschrichtung $\pm 45^\circ$ und vier weitere Einfallswinkel des CCITT-Rauschens gewählt, die im Rahmen der Hörgeräteversorgung beim Freiburger Sprachtest üblicherweise verwendet werden, sodass für die gängigsten Lautsprecheranordnungen jeweils eine Bezugskurve zur Verfügung steht. Die Betrachtung der Bezugskurven bestätigte die Erwartung, dass der FET für verschiedene Einfallswinkel des Störgeräusches unterschiedliche Sprachverständlichkeitsschwellen ergibt und somit die Ergebnisse bei verschiedenen Lautsprecheranordnungen nicht direkt miteinander verglichen werden können.

Der SRT-Wert für die Darbietung S_0N_0 ist am größten und verringert sich, je weiter sich das Störgeräusch räumlich vom Sprachsignal entfernt. Die beste Sprachverständlichkeitsschwelle ergibt sich für die Darbietung S_0N_{90} . Diese Ergebnisse können mit dem Spatial Release from Masking erklärt werden. Die in der Norm angegebene Rauschrichtung von $\pm 45^\circ$ erzeugt durch die Summenlokalisierung zwar eine Wahrnehmung des Rauschens aus 0° , jedoch entsteht im Vergleich zur Darbietung S_0N_0 eine Verbesserung der Sprachverständlichkeitsschwelle um 3,64 dB, sodass für diese Lautsprecheranordnung nur der Vergleich mit der entsprechenden Bezugskurve für $S_0N_{\pm 45}$ sinnvoll ist. Die Ergebnisse der rechten und linken Medianebene ergaben keine signifikanten Unterschiede, sodass für die Richtungen plus und minus 45° und plus und minus 90° jeweils eine Bezugskurve für den Vergleich mit Normalhörenden ausreicht. Außerdem besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen der männlichen und weiblichen Probanden.

Ein Vergleich der Ergebnisse des FET im CCITT-Rauschen mit Normalhörenden ist aufgrund der Unterschiede nur mit der Bezugskurve der gleichen Lautsprecheranordnung sinnvoll.

Bei der relativen Vergleichsmessung, welche laut Hilfsmittel-Richtlinie für die Hörgeräte-evaluation mit dem FET im Störgeräusch bei einem SNR von 5 dB durchgeführt werden soll, sollte aufgrund der Unterschiede beim Sprachverstehen die Lautsprecheranordnung angegeben werden, bei der die Ergebnisse ermittelt wurden.

6. Anhang I

6.1 Einweisung der Probanden

„Mit diesem Test soll dein Sprachverstehen im Störgeräusch aus verschiedenen Richtungen bestimmt werden. Hierfür werden dir aus dem Lautsprecher vor dir kurze einsilbige Wörter wie *Haus* oder *Baum* vorgespielt. Die sprichst du, so gut es geht, nach. Hierbei darfst du auch raten. Gleichzeitig kommt aus einem der anderen Lautsprecher ein Rauschen, welches das Sprachverstehen erschweren soll. Nach jeweils 20 Wörtern wechseln die Richtung und die Lautstärke vom Rauschen. Die Lautstärke der Wörter bleibt gleich. Nach viermal 20 Wörtern machen wir eine kurze Pause, damit keine Ermüdungseffekte auftreten können, und insgesamt gibt es 20 mal 20 Wörter. Bitte lehne dich an der Stuhllehne an und versuche, deine Sitz- und Kopfposition während des Tests nicht zu verändern. Hast du noch Fragen?“

6.2 Individuelle Tonaudiogramme

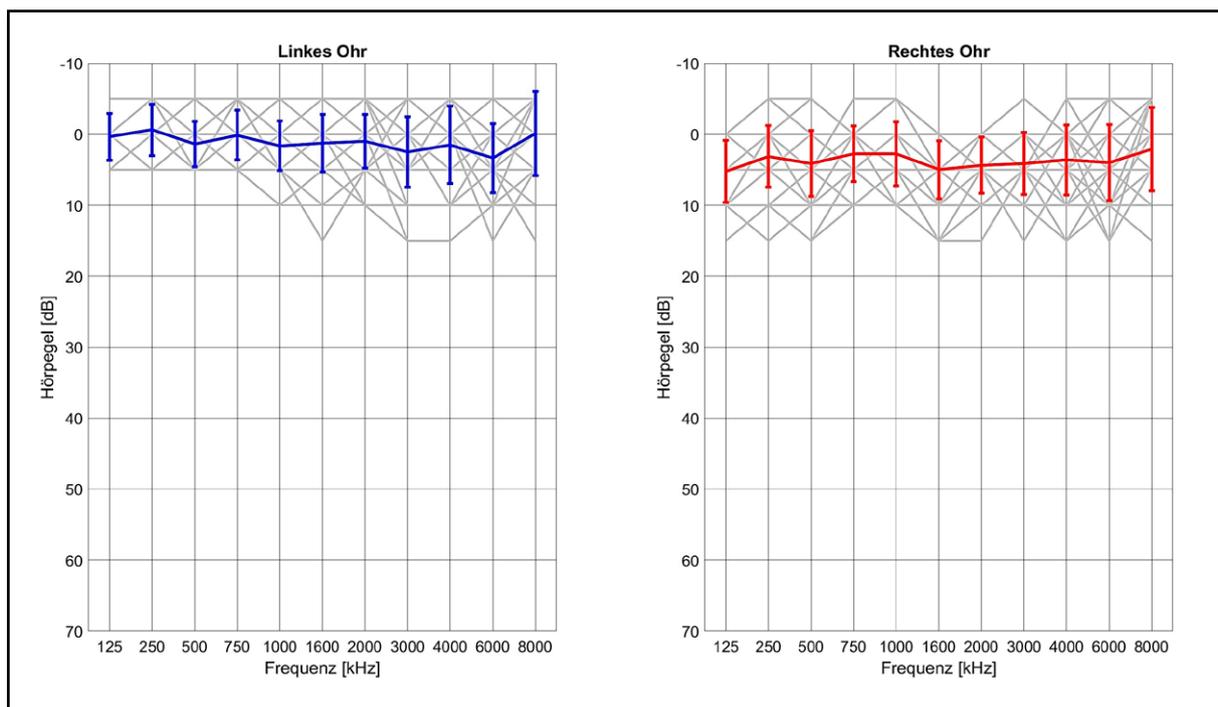


Abb. 29: Darstellung der individuellen und gemittelten Tonaudiogramme der 40 Probanden

7. Anhang II

7.1 Darstellung der Ergebnisse für jede Darbietung als Boxplot

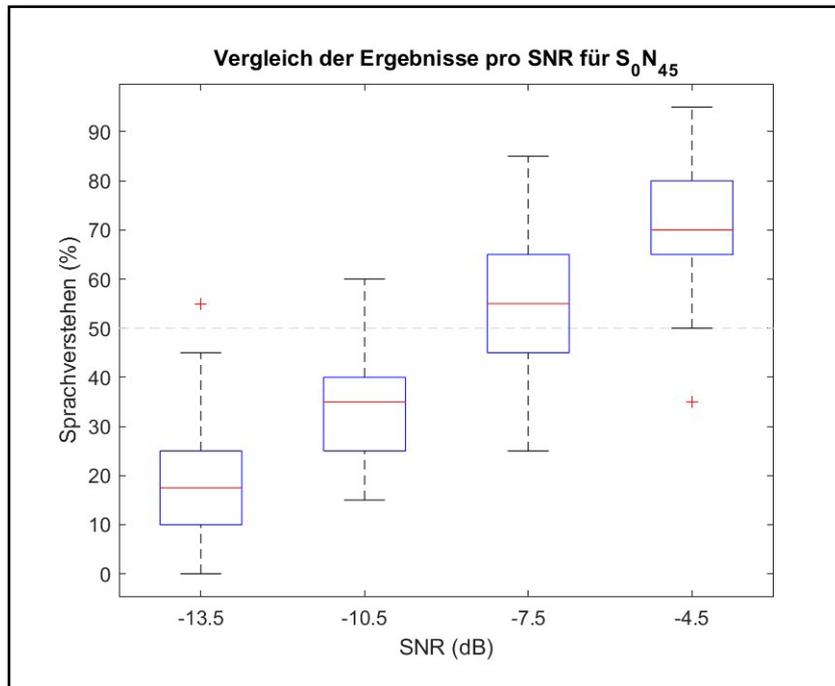


Abb. 30: Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_{45} und die vier dargebotenen SNR

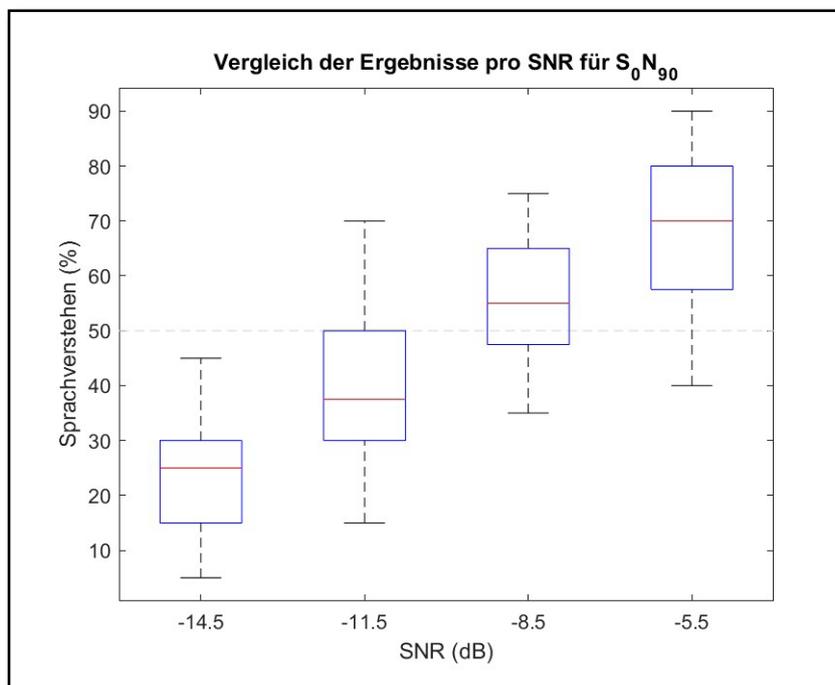


Abb. 31: Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_{90} und die vier dargebotenen SNR

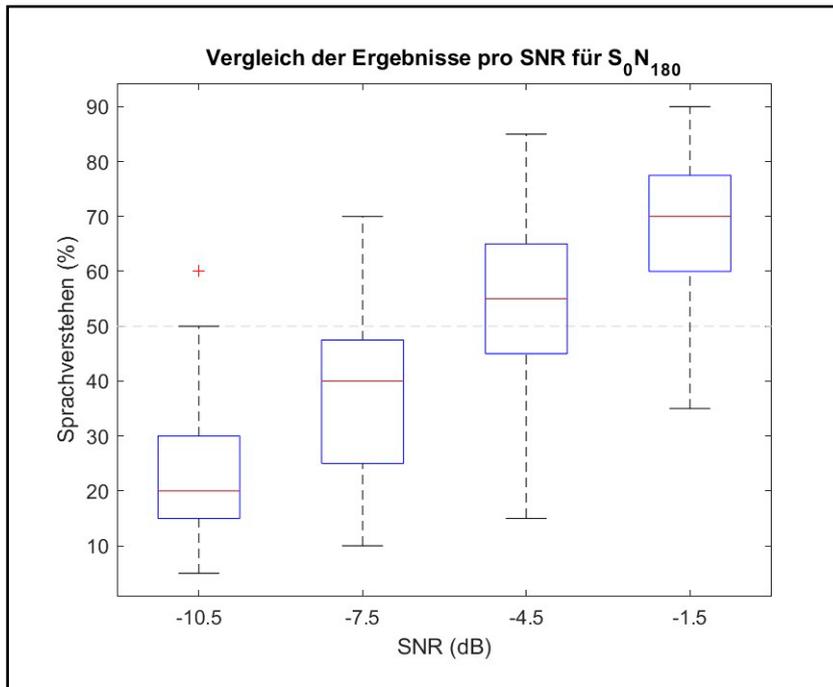


Abb. 32: Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_{180} und die vier dargebotenen SNR

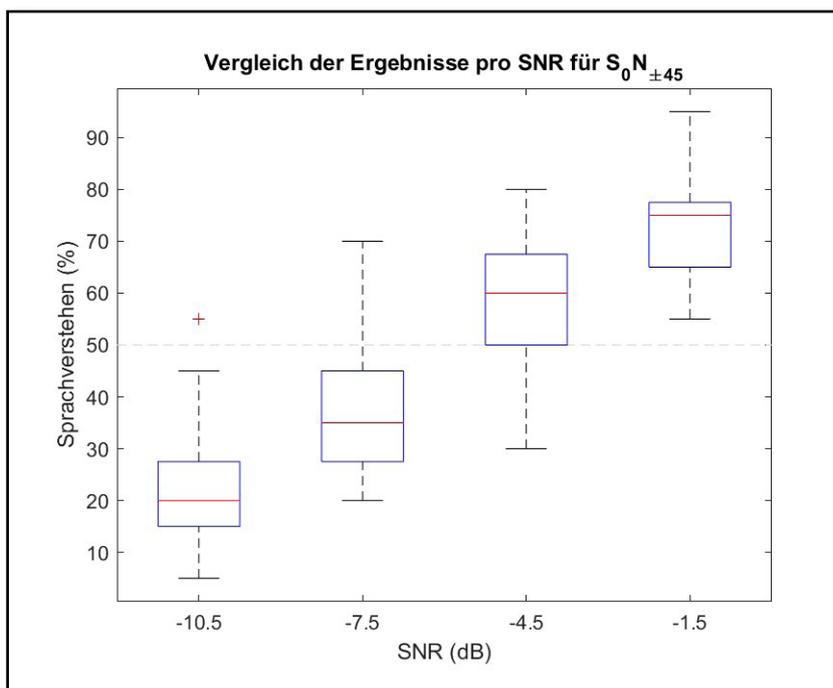


Abb. 33: Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für $S_0N_{\pm 45}$ und die vier dargebotenen SNR

8. Anhang III

8.1 Tabellarische Darstellung der Bezugskurven

S_0N_0	
SV	SNR
30 %	-5,0 dB
40 %	-3,4 dB
50 %	-1,9 dB
60 %	-0,5 dB
70 %	1,1 dB
80 %	3,0 dB
90 %	5,9 dB

Tabelle 11: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_0

S_0N_{180}	
SV	SNR
30 %	-8,9 dB
40 %	-7,0 dB
50 %	-5,3 dB
60 %	-3,6 dB
70 %	-1,7 dB
80 %	0,5 dB
90 %	3,9 dB

Tabelle 12: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_{180}

S_0N_{45}	
SV	SNR
30 %	-11,2 dB
40 %	-9,6 dB
50 %	-8,0 dB
60 %	-6,5 dB
70 %	-4,8 dB
80 %	-2,7 dB
90 %	0,3 dB

Tabelle 13: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_{45}

S_0N_{90}	
SV	SNR
30 %	-13,2 dB
40 %	-11,2 dB
50 %	-9,3 dB
60 %	-7,5 dB
70 %	-5,5 dB
80 %	-3,0 dB
90 %	0,7 dB

Tabelle 14: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_{90}

$S_0N_{\pm 45}$	
SV	SNR
30 %	-8,5 dB
40 %	-7,0 dB
50 %	-5,6 dB
60 %	-4,2 dB
70 %	-2,6 dB
80 %	-0,8 dB
90 %	2,1 dB

Tabelle 15: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für $S_0N_{\pm 45}$

9. Anhang IV

9.1 Vergleich der männlichen und weiblichen Probanden

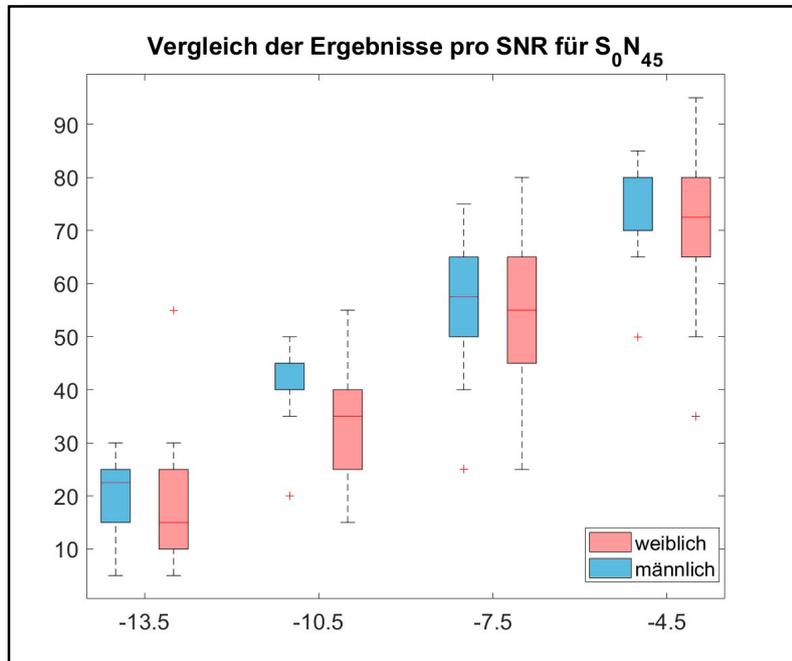


Abb. 34: Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung $S_0 N_{45}$

H_0	$\mu_{m_{-13,5}} = \mu_{w_{-13,5}}$	$\mu_{m_{-10,5}} = \mu_{w_{-10,5}}$	$\mu_{m_{-7,5}} = \mu_{w_{-7,5}}$	$\mu_{m_{-4,5}} = \mu_{w_{-4,5}}$
p-Werte Mann-Whitney-U-Test	0,3256	0,0819	0,7652	0,7121

Tabelle 16: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für $S_0 N_{45}$. Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ angepasst.

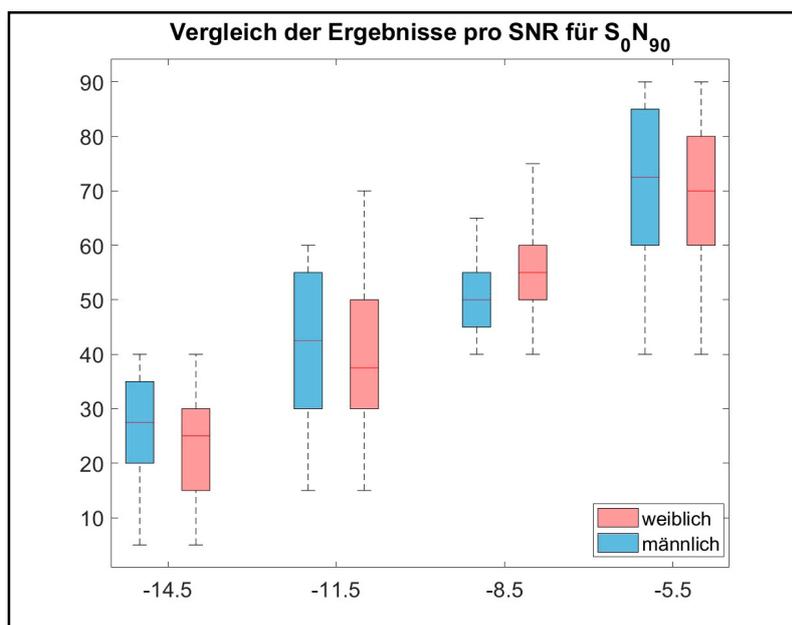


Abb. 35: Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung $S_0 N_{90}$

H_0	$\mu_{m_{-14,5}} = \mu_{w_{-14,5}}$	$\mu_{m_{-11,5}} = \mu_{w_{-11,5}}$	$\mu_{m_{-8,5}} = \mu_{w_{-8,5}}$	$\mu_{m_{-5,5}} = \mu_{w_{-5,5}}$
p-Werte Mann-Whitney-U-Test	0,3103	0,7775	0,2968	0,7409

Tabelle 17: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_{90} . Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ angepasst.

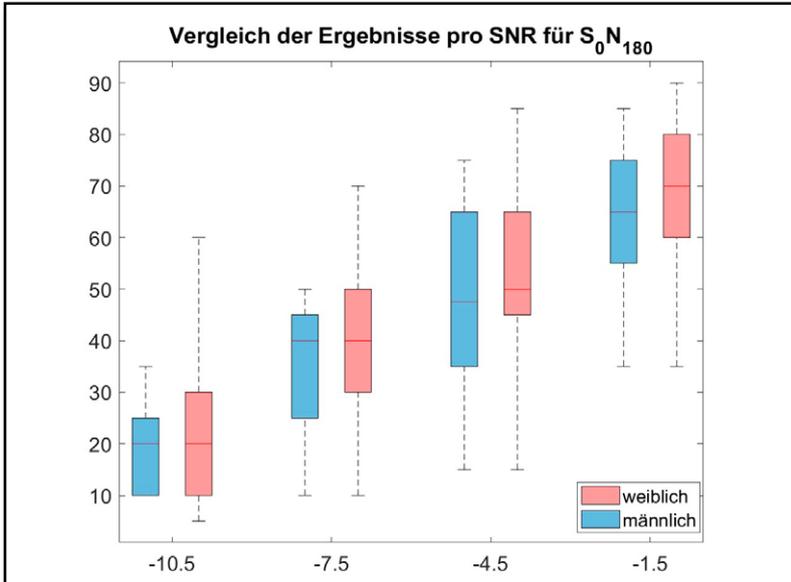


Abb. 36: Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung S_0N_{180}

H_0	$\mu_{m_{-10,5}} = \mu_{w_{-10,5}}$	$\mu_{m_{-7,5}} = \mu_{w_{-7,5}}$	$\mu_{m_{-4,5}} = \mu_{w_{-4,5}}$	$\mu_{m_{-1,5}} = \mu_{w_{-1,5}}$
p-Werte Mann-Whitney-U-Test	0,7031	0,7413	0,5815	0,3224

Tabelle 18: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_{180} . Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ angepasst.

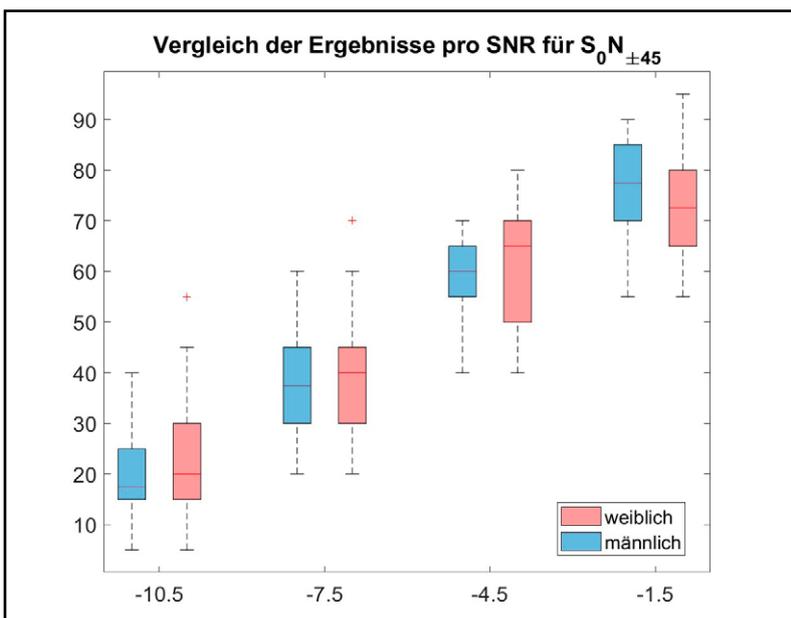


Abb. 37: Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung $S_0N_{\pm 45}$

H_0	$\mu_{m_{-10,5}} = \mu_{w_{-10,5}}$	$\mu_{m_{-7,5}} = \mu_{w_{-7,5}}$	$\mu_{m_{-4,5}} = \mu_{w_{-4,5}}$	$\mu_{m_{-1,5}} = \mu_{w_{-1,5}}$
p-Werte Mann-Whitney- U-Test	0,6803	0,7407	0,5350	0,2007

Tabelle 19: p-Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für $S_0N_{\pm 4,5}$. Das Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf $\alpha = 0,0125$ angepasst.

10. Verzeichnisse

10.1 Abkürzungsverzeichnis

BILD	Binaural Intelligibility Level Difference
CCITT	Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique
FET	Freiburger Einsilbertest
FMT	Freiburger Mehrsilbertest
FST	Freiburger Sprachverständlichkeitstest
HRIR	Head-Related Impulse Response (kopfbezogene Impulsantwort)
HRTF	Head-Related Transfer Function (Außenohrübertragungsfunktion)
ILD	Interaural Level Difference (interaurale Pegeldifferenz)
ITD	Interaural Time Difference (interaurale Laufzeitdifferenz)
RMS	Root Mean Square
s_{50}	Steigung im SRT
SNR	Signal-to-Noise Ratio (Signal-Rausch-Abstand)
SRM	Spatial Release from Masking (Räumliche Demaskierung)
SRT	Speech Reception Threshold (Sprachverständlichkeitsschwelle): SNR-Wert für ein Sprachverstehen von 50 %

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Darstellung der interauralen Laufzeitdifferenzen in Abhängigkeit vom Winkel [10]	2
Abb. 2:	Darstellung der interauralen Pegeldifferenz in Abhängigkeit des Winkels und der Frequenz [11]	3
Abb. 3:	Darstellung der Kegeloberfläche (<i>cone of confusion</i>), auf der die ITD und ILD gleich sind [13]	3
Abb. 4:	Darstellung der Außenohrübertragungsfunktion (HRTF) und der kopfbezogenen Impulsantwort (HRIR) am linken Ohr einer Versuchsperson bei unterschiedlichen, horizontalen Schalleinfallswinkeln [16]	4
Abb. 5:	Schematische Darstellung der spektralen Maskierung eines Tones „A“ auf andere Töne in einem Mithörschwellenmuster [17]	5
Abb. 6:	Winkelabhängiger Effekt der räumlichen Trennung des Störgeräuschs vom Nutzsignal (SRM in dB), abgeleitet vom Bronkhorst-Modell [21]	6
Abb. 7:	SRTs für den Oldenburger Satztest im Störgeräusch aus verschiedenen Richtungen und mit unterschiedlicher Raumakustik [3]	7
Abb. 8:	Bezugskurven für den FET und FMT für das monaurale Hören, getestet an normalhörenden Personen [23]	9
Abb. 9:	Psychometrische Funktion mit Sprachverständlichkeitsschwelle $SRT = -5,6$ dB und Steigung $s_{50} = 7,2$ %/dB	10
Abb. 10:	Anordnung der Lautsprecher und Position des Probanden	11
Abb. 11:	Benutzeroberfläche für die Steuerung der Studie	12
Abb. 12:	Mittelwerte und Standardabweichungen der Tonaudiogramme der 40 Probanden	13
Abb. 13:	Nutzen der räumlichen Trennung vom Störgeräusch in dB SNR in Bezug zum SRT für S_0N_0 für verschiedene Richtungen [3]	14
Abb. 14:	Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_0 und die vier dargebotenen SNR	16
Abb. 15:	Bezugskurve für S_0N_0 und individuelle psychometrische Funktionen	17
Abb. 16:	Bezugskurve für S_0N_{45} und individuelle psychometrische Funktionen	18
Abb. 17:	Bezugskurve für S_0N_{90} und individuelle psychometrische Funktionen	18
Abb. 18:	Bezugskurve für S_0N_{180} und individuelle psychometrische Funktionen	19
Abb. 19:	Bezugskurve für $S_0N_{\pm 45}$ und individuelle psychometrische Funktionen	19
Abb. 20:	Bezugskurven der fünf Darbietungen S_0N_0 , S_0N_{180} , S_0N_{45} , S_0N_{90} und $S_0N_{\pm 45}$	21
Abb. 21:	Boxplots der SRT-Werte jedes Probanden für die fünf Darbietungen S_0N_0 , S_0N_{180} , S_0N_{45} , S_0N_{90} und $S_0N_{\pm 45}$	22
Abb. 22:	Boxplots der Steigungen jedes Probanden für die fünf Darbietungen S_0N_0 , S_0N_{180} , S_0N_{45} , S_0N_{90} und $S_0N_{\pm 45}$	23

Abb. 23:	Boxplots der gesamten Ergebnisse der männlichen und weiblichen Probanden	24
Abb. 24:	Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung S_0N_0	25
Abb. 25:	Boxplots der gesamten Ergebnisse für S_0N_{+45} und S_0N_{-45}	26
Abb. 26:	Boxplots des Sprachverstehens in % für jeden SNR für S_0N_{+45} und S_0N_{-45}	26
Abb. 27:	Boxplots der gesamten Ergebnisse für S_0N_{+90} und S_0N_{-90}	27
Abb. 28:	Boxplots des Sprachverstehens in % für jeden SNR für S_0N_{+90} und S_0N_{-90}	27
Abb. 29:	Darstellung der individuellen und gemittelten Tonaudiogramme der 40 Probanden	30
Abb. 30:	Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_{45} und die vier dargebotenen SNR	31
Abb. 31:	Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_{90} und die vier dargebotenen SNR	31
Abb. 32:	Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für S_0N_{180} und die vier dargebotenen SNR	32
Abb. 33:	Darstellung des Sprachverstehens in % aller Probanden als Boxplot für $S_0N_{\pm 45}$ und die vier dargebotenen SNR	32
Abb. 34:	Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung S_0N_{45}	35
Abb. 35:	Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung S_0N_{90}	35
Abb. 36:	Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung S_0N_{180}	36
Abb. 37:	Boxplots der männlichen und weiblichen Probanden für jeden SNR der Darbietung $S_0N_{\pm 45}$	36

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: BILD-Werte für den OLSA von 0° und das CCITT-Rauschen von v verschiedenen Winkeln θ [4]	8
Tabelle 2: In der Vorstudie verwendete Darbietungen und die zugehörigen SNR	15
Tabelle 3: Auflistung der erwarteten und in der Vorstudie ermittelten medianen SRT-Werte in dB	15
Tabelle 4: In der Hauptstudie verwendete SNR-Werte	15
Tabelle 5: SRT und Steigung s_{50} der Bezugskurven sowie Auflistung der Differenzen der jeweiligen SRT zum SRT für die Darbietung S_0N_0 (BILD)	20
Tabelle 6: p -Werte des paarweisen Vergleichs der individuellen SRTs aller Darbietungen mit dem Friedman-Test	22
Tabelle 7: p -Werte des paarweisen Vergleichs der individuellen Steigungen aller Darbietungen mit dem Friedman-Test	23
Tabelle 8: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_0	25
Tabelle 9: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte für S_0N_{+45} und S_0N_{-45} mittels ungepaartem t-Test	27
Tabelle 10: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte für S_0N_{+90} und S_0N_{-90} mittels ungepaartem t-Test	28
Tabelle 11: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_0	33
Tabelle 12: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_{180}	33
Tabelle 13: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_{45}	33
Tabelle 14: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für S_0N_{90}	34
Tabelle 15: Tabellarische Darstellung der Bezugskurve für $S_0N_{\pm 45}$	34
Tabelle 16: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_{45}	35
Tabelle 17: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_{90}	36
Tabelle 18: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für S_0N_{180}	36
Tabelle 19: p -Werte des paarweisen Vergleichs der Sprachverständlichkeitswerte mittels Mann-Whitney-U-Test für $S_0N_{\pm 45}$	37

10.4 Literaturverzeichnis

- [1] *Hilfsmittel-Richtlinie des Gemeinsamen Bundesausschusses über die Verordnung von Hilfsmitteln in der vertragsärztlichen Versorgung*, Bundesanzeiger BAnz AT 10.04.2012 B2, 2018.
- [2] Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN ISO 8253-3:2012 Akustik - Audiometrische Prüfverfahren - Teil 3: Sprachaudiometrie*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [3] R. Beutelmann und T. Brand, „Prediction of speech intelligibility in spatial noise and reverberation for normal-hearing and hearing-impaired listeners“, *Acoustical Society of America*, Bd. 120, Nr. 1, 2006.
- [4] R. Papke, *Sprachverstehen im Störgeräusch und Lokalisationsfähigkeit Normalhörender in Abhängigkeit vom Lebensalter*, Würzburg: Julius-Maximilians-Universität, 2013.
- [5] A. Winkler, I. Holube und H. Husstedt, *Der Freiburger Einsilbertest im Störgeräusch*, im Druck.
- [6] J. Blauert, *Räumliches Hören*, Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1974.
- [7] E. Sengpiel, *Laufzeitdifferenz und Phasenverschiebung*, Berlin: Universität der Künste Berlin, 2002.
- [8] J. Hellbrück, *Hören - Physiologie, Psychologie und Pathologie*, Göttingen: Hogrefe-Verlag, 1993, S. 137-138.
- [9] R. Kramme, *Medizintechnik: Verfahren-Systeme-Informationsverarbeitung*, 5 Hrsg., Tübingen-Neustadt: Springer-Verlag, 2017.
- [10] E. Sengpiel, *Laufzeitdifferenzen beim natürlichen Hören - Interaurale Laufzeitdifferenz in Abhängigkeit vom Schalleinfallswinkel bei Sprache und Musik*, Berlin: Universität der Künste Berlin, 2003.
- [11] T. Schmidt, *Allgemeine Psychologie: Auditive Wahrnehmung*, Gießen: Universität Gießen, 2008.
- [12] A. Zimmermann, *Eigenschaften des Richtungshörens beim Menschen*, Ulm: Universität Ulm, 2004.
- [13] J. A. Huguet, „Binaural hearing effects of mapping microphone array’s responses to a listener’s head-related transfer functions“, *Semantic Scholar*, 2011. [Online]. Verfügbar: <https://www.semanticscholar.org/paper/Binaural-Hearing-Effects-of-Mapping-Microphone-to-a-Huguet/a4724de2d29c998e33e92f96eaf53e615ce3fb00>. [Zugriff am 12. August 2019].
- [14] A. Gernemann, „Stereophonie“ [Online]. Verfügbar: <http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/umdruck/stereo.pdf>. [Zugriff am 25. Juli 2019].
- [15] T. Fedtke, *Kunstkopftechnik - Eine Bestandsaufnahme. Eine Mitteilung aus dem Normenausschusses [sic] „Psychoakustische Messtechnik“*, *Acta Acustica*, 2007.
- [16] J. Schröder, „Technik-WIKI: HRTF-Head Related Transfer Function“, 29. März 2018. [Online]. Verfügbar: <https://www.lowbeats.de/technik-wiki-hrtf-head-related-transfer-function/>. [Zugriff am 14. August 2019].
- [17] B. Seeber, „Psychoakustische Maskierung“, 3 Februar 2006. [Online]. Verfügbar: www.bseeber.de/itg_page/maskierung.html. [Zugriff am 8. April 2019].

- [18] „Maskierungseffekte,“ 2003. [Online]. Verfügbar: http://www.netaudio.de/psychoakustik/Daten/kritische_Bandbreiten/maskierungseffekte.htm. [Zugriff am 23. April 2019].
- [19] R. Y. Litovsky, *Spatial release from masking*, Madison Wisconsin: University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [20] G. Regenbrecht, *Die Bedeutung der räumlichen Separation von Schallquellen in der akustischen Suche*, Düsseldorf: Universitäts- und Landesbibliothek der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2012, S. 12.
- [21] „National Center for Biotechnology Information“, September 2011. [Online]. Verfügbar: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3188967/>. [Zugriff am 9. April 2019].
- [22] A. Winkler und I. Holube, „Der Freiburger Einsilbertest und die Norm DIN EN ISO 8253-3: Technische Analyse“, *Zeitschrift für Audiologie (Audiological Acoustics)*, Nr. 55, 2016.
- [23] Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN 45626:1976-08 Tonträger mit Sprache für Gehörprüfung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1995.
- [24] C. Hatzfeld und R. Werthschützky, „Simulation und Auswahl von psychometrischen Verfahren zur Ermittlung von Kennwerten menschlicher Wahrnehmung“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 81, Nr. 4, 2014.
- [25] B. Trautwein, „Adaptive psychophysical procedures“, *Vision Research*, Bd. 17, Nr. 35, September 1995.
- [26] T. Memmeler, R. Schönweiler, B. Wollenberg und J. Löhler, „Die adaptive Messung des Freiburger Einsilbertests im Störschall: Entwicklung einer Messmethode und Vergleich der Ergebnisse mit dem Oldenburger Satztest“, *HNO*, Januar 2018.