

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR HALS-NASEN-OHREN-HEILKUNDE
PROF. DR. MED. CHRISTOPHER BOHR
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

BESTIMMUNG DES RELATIVEN SPRACHINFORMATIONSGEHALTS IN
EINZELNEN FREQUENZBÄNDERN FÜR DAS SPRACHMATERIAL DES GÖTTINGER
SATZTESTS

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Sonja Bauer

2020

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR HALS-NASEN-OHREN-HEILKUNDE
PROF. DR. MED. CHRISTOPHER BOHR
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

BESTIMMUNG DES RELATIVEN SPRACHINFORMATIONSGEHALTS IN
EINZELNEN FREQUENZBÄNDERN FÜR DAS SPRACHMATERIAL DES GÖTTINGER
SATZTESTS

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Sonja Bauer

2020

Dekan: Prof. Dr. Dirk Hellwig

1. Berichterstatter: PD Dr. biol. hom. Dipl.-Ing. Thomas Steffens

2. Berichterstatter: Prof. Dr. med. Berthold Langguth

Tag der mündlichen Prüfung: 19.04.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Einführung.....	1
1.2	Hören und Verstehen menschlicher Sprache.....	3
1.2.1	Psychoakustische Grundlagen.....	3
1.2.2	Akustische und linguistische Eigenschaften gesprochener Sprache.....	6
1.3	Drei - Stufenmodell der Sprachverarbeitung im auditorischen System von Steffens.....	8
1.4	Modelle zur Sprachverständlichkeit und zum Sprachverstehen.....	9
1.5	Sprachaudiometrische Tests zur quantitativen Bewertung von Sprachverständlichkeit und Sprachverstehen.....	10
1.6	Satztests im Unterschied zu isolierten Einzelworten.....	12
1.7	Quantitative Bewertung der mit Sprache übertragenen potenziell hörbaren Sprachinformation.....	13
1.8	Zielsetzung dieser Arbeit.....	16
2	Material und Methoden.....	17
2.1	Probanden.....	17
2.2	Testmaterial.....	17
2.3	Filterung und Präsentation des Sprachmaterials.....	20
2.4	Datenauswertung.....	22
2.4.1	Bestimmung der Diskriminationsfunktionen und der Transferfunktion zwischen AI und Sprachverstehen.....	22
2.4.1.1	Halving und Complementing.....	24
2.4.2	Entwicklung der Band Importance Function (BIF).....	28
2.4.3	Entwicklung der absoluten Transferfunktion.....	29
3	Ergebnis.....	31
3.1	Sprachverstehen.....	31

3.2	Diskriminationsfunktionen	33
3.3	Relative Transferfunktion.....	37
3.4	Band Importance Function (BIF)	40
3.5	20 Bänder gleicher Wichtigkeit.....	43
3.6	Absolute Transferfunktion.....	46
4	Diskussion.....	48
4.1	Diskussion der Methoden	48
4.1.1	Probanden.....	48
4.1.2	Sprachmaterial.....	49
4.1.3	Diskussion der Methode.....	52
4.2	Diskussion der Ergebnisse.....	54
4.2.1	Sprachverstehen	54
4.2.2	Absolute Transferfunktion	54
4.2.3	Band Importance Function	56
4.2.3.1	SNR-Abhängigkeit der BIF	57
5	Zusammenfassung.....	59
6	Ausblick.....	60
7	Literaturverzeichnis	62
8	Anhang.....	66
8.1	Testlisten Göttinger Satztest.....	66
8.2	Anzahl an Wörtern pro Satz im Göttinger Satztest	76
8.3	Anzahl der durchgeführten Messungen pro Testbedingung.....	76
8.4	SNR abhängige Diskriminationsfunktionen.....	79
8.5	Verwendete Geräte und Programme.....	83
9	Eidesstattliche Erklärung	84
10	Danksagung.....	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hörfläche des menschlichen Gehörs zwischen Ruhehörschwelle und Schmerzschwelle.	3
Abbildung 2: Frequenzabhängige Lautstärkewahrnehmung des menschlichen Ohres; Isophone der Pegel gleicher Lautstärke bezogen auf den Pegel eines 1 kHz Tones.	4
Abbildung 3: Akustische Terzpegelspektren und Schallpegelperzentile des GÖSA und des OINoise bei freifeldentzerrter Kopfhörerausgabe für einen Breitband-Leq von 65 dB SPL.	19
Abbildung 4: Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen für hoch- und tiefpassgefilterte Sprache für das Halfing-Verfahren.	26
Abbildung 5: Schema zum Complementing-Verfahren.	27
Abbildung 6: Vergleichende Darstellung der Diskriminationsfunktionen bei Hochpass- und Tiefpassfilterung.	33
Abbildung 7: Ausgewählte Darstellung einiger frequenzabhängiger Diskriminationsfunktionen.	35
Abbildung 8: Vergleichende Darstellung verschiedener sigmoid verlaufender Fitfunktionen zur Berechnung der relativen Transferfunktion.	37
Abbildung 9: Relative Transferfunktion für das Sprachmaterial des Göttinger Satztest mit der Fitfunktion nach Fletcher und Galt.	38
Abbildung 10: Inverse relative Transferfunktion zwischen Sprachverstehen und AI.	39
Abbildung 11: Kumulative Band Importance Function für den Göttinger Satztest je Terzbandmittenfrequenz, ermittelt aus dem SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.	41
Abbildung 12: Referenz-Band Importance Function für den Göttinger Satztest, ermittelt aus dem SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.	41
Abbildung 13: Kumulative Band Importance Function für den Göttinger Satztest je Terzbandmittenfrequenz, ermittelt aus dem SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.	44
Abbildung 14: RMS-Abweichung je Korrekturwert K.	46
Abbildung 15: Absolute Transferfunktion für den Göttinger Satztest für Normalhörende.	47
Abbildung 16: Absolute Transferfunktionen im Vergleich.	55
Abbildung 17: Ein Vergleich der normierten BIF in Abhängigkeit des SNR-Bereichs.	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sprechgeschwindigkeiten der traditionellen Satztests im Vergleich.	7
Tabelle 2: Filterbandbreiten zur Messung des Sprachverstehens für Breitband- und gefilterte Sprache.	20
Tabelle 3: Übersicht über verschiedene sigmoid verlaufende Fitfunktionen zur Berechnung der Transferfunktion.	24
Tabelle 4: Mittelwerte des Sprachverstehens in Prozent in Abhängigkeit der Frequenzbandfilterung und des SNR.	32
Tabelle 5: Frequenzgrenzwerte der Breitband-, Tiefpass- und Hochpassfilterung sowie zugehörige Funktionsparameter und Typ der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen.	34
Tabelle 6: Wertepaare des Sprachverstehens und des Artikulationsindex aus dem Halving- und Complementing-Verfahren zum Erstellen der Transferfunktion.	36
Tabelle 7: Regressionsquotienten verschiedener sigmoid verlaufender relativer Transferfunktionen im Vergleich.	37
Tabelle 8: Funktionsparameter der relativen Transferfunktion für die Fletcher-Galt-Funktion.	38
Tabelle 9: Funktionsparameter der inversen (Fletcher-Galt-)Transferfunktion.	39
Tabelle 10: Nicht kumulative und kumulative Bandwichtigkeit als AI-Anteile in Prozent je Terzband für den SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.	42
Tabelle 11: Funktionsparameter der kumulativen Band Importance Function.	43
Tabelle 12: 20 Frequenzbänder mit gleicher Wichtigkeit (jeweils 5 % AI).	45
Tabelle 13: Korrekturfaktor K und RMS-Abweichung.	46
Tabelle 14: Funktionsparameter der absoluten Transferfunktion.	47
Tabelle 15: Anzahl an Wörtern pro Testliste und Satz bei dem Göttinger Satztest.	76
Tabelle 16: Anzahl durchgeführter Messungen pro Testbedingung.	78

Abkürzungsverzeichnis

A_i	Hörbarkeitsfunktion
AI	Artikulationsindex
ANSI	American National Standards Institute
BIF (I_i)	Band Importance Function (Sprachinformationsverteilungsfunktion)
CST	Connected Speech Test
dB HL	Hörschwelle in Dezibel
dB SPL	Decibel Sound Pressure Level (Schalldruckpegel)
FIF	Frequency Importance Function (Sprachinformationsverteilungsfunktion)
GÖSA	Göttinger Satztest
HP	Hochpassfilterung
Hz	Herz (Einheit der Frequenz)
i	Anzahl der Frequenzbänder
kHz	Kiloherz (Einheit der Frequenz)
L_{eq}	energieäquival. Dauerschallpegel
L_{Seq}	energieäquival. Dauerschallpegel eines Sprachsignals
L_{Neq}	energieäquival. Dauerschallpegel eines stationären Rauschens
ms	Millisekunde (Zeitangabe)
NAM	Neighbourhood Activation Model
OINoise	sprechersimulierendes stationäres Rauschen
R	Regressionskoeffizient
SII	Speech Intelligibility Index
SNR	Signal-Noise-Ratio (dt.: Signal-Rausch-Verhältnis)
SRT	Sprachverstehensschwelle (SV oder SNR für 50 % Verstehen)
STI	Sprach-Übertragungsindex
SV	Sprachverstehen
TF	Transferfunktion
TP	Tiefpassfilterung
W_i	Gewichtsfunktion
Z	Frequenzbewertung

Hinweis: Indexfreie Pegelangaben in dB entsprechen dB SPL.

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die quantitative Bewertung von Sprachverstehen (SV) ist in vielen Bereichen von großer Bedeutung, zum Beispiel bei der Beurteilung der Sprachübertragungsqualität von Telefonverbindungen oder anderen elektro-akustischen Anlagen, bei der Beurteilung der Sprachverständlichkeit in der Raumakustik und nicht zuletzt bei der audiologischen Beurteilung der Hörfähigkeit. Die individuelle subjektive Messung mit sprachaudiometrischen Testverfahren ist allerdings in hohem Maße von subjektiven Faktoren der Testpersonen abhängig, wie dem individuellen Wortschatz und der Sprachbegabung, oder unterliegt relevanten Einflüssen der Konzentrationsfähigkeit. Sprachaudiometrische Messungen können zudem sehr zeitintensiv sein, insbesondere wenn die Auswirkung verschiedenster Störgeräusche auf das Sprachverstehen getestet werden soll. Eine mathematische Schätzung der Sprachverständlichkeit auf der Basis von Sprachübertragungs- und Perzeptionsmodellen hat in diesem Zusammenhang einen hohen Stellenwert, da sie unabhängig von der Variabilität dieser individuellen Faktoren ist und in erheblich kürzerer Zeit eine objektive quantitative Beurteilung liefern kann. Ein sehr wichtiges, bewährtes Modell für die quantitative Vorhersage von Sprachverstehen in Abhängigkeit der frequenzabhängigen Hörbarkeit der Sprachinformation ist das Speech Intelligibility Index (SII)-Verfahren (ANSI S3.5 1997) (Acoustical Society of America 1997). Von besonderem Interesse ist das SII-Verfahren in der Audiologie bei der Bewertung der Sprachübertragung mit Hörgeräten. Mit Hilfe des SII-Verfahrens kann in Abhängigkeit der Hörschwellen und der Art des Sprach- und Störgeräuschsignals eine Vorhersage der Sprachverständlichkeit für Einzelworte bis hin zur fließenden Sprache durchgeführt werden. Im SII-Verfahren sind bisher nur frequenzabhängige Sprachinformationsverteilungen für die englische Sprache enthalten. Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Bestimmung der Sprachinformationsverteilung des viel benutzten deutschsprachigen Göttinger Satztests (GÖSA).

Satztests haben eine hohe ökologische Validität, weil sie wesentliche Aspekte der alltäglichen sprachlichen Kommunikation beinhalten. In der klinischen Sprachaudiometrie werden Satztests deshalb häufig angewendet, um die Auswirkung einer Hörstörung auf die audio-verbale Alltagskommunikation zu untersuchen (Steffens 2017). Da die Sätze des GÖSA der Alltagssprache entnommen sind und wegen der gleichmäßigen Schwierigkeitsverteilung der einzelnen Testlisten (Kollmeier und Wesselkamp 1997) spielt der Göttinger Satztest hierbei

eine bedeutende Rolle. Er wird sowohl in der klinischen Basisdiagnostik als auch insbesondere für die Untersuchung und Dokumentation der Sprachverständlichkeit mit Hörgeräten oder Cochlea Implantaten verwendet. Durch die große Anzahl von Testwörtern pro Messung (GÖSA: Testlisten mit jeweils zehn Sätzen, im Mittel fünf Wörter pro Satz) erreichen Satztests bei ähnlicher Messdauer wie Einzelworttests eine hohe Messgenauigkeit (Test-Retest Reliabilität), weil zufällige Fehler nur einen geringen Einfluss auf das Testergebnis bekommen (Steffens 2006; Thornton und Raffin 1978). Nachteilig ist hierbei allerdings, dass sich eine Versuchsperson einmal gut verstandene Sätze über lange Zeit merken und bei Wiederholung dieser Testsätze auch unter schwierigen Verständlichkeitsbedingungen aus dem Gedächtnis rezitieren kann. Deshalb können die Testsätze nicht beliebig wiederholt werden und die begrenzte Anzahl von Testlisten limitiert die Einsatzmöglichkeiten eines Satztests bei derselben Versuchsperson. Ferner besteht durch die Verwendung von Sätzen aus der Alltagskommunikation kein relevanter Lerneffekt, valide Testergebnisse können ohne vorherige Lernphase erhoben werden (Kollmeier et al. 2011).

Intention dieser Arbeit ist, dass mit Hilfe der in dieser Studie zu erhebenden frequenzabhängigen Werte der Sprachinformationsverteilung die Vorhersage des Sprachverstehens mit dem SII-Verfahren für deutschsprachige Alltagssätze, insbesondere für das Sprachmaterial des GÖSA, deutlich verbessert werden kann, da bisher lediglich die Sprachinformationsverteilung der englischen Sprache vorhanden ist. Falls relevante Unterschiede in der Sprachinformationsverteilung zwischen beiden Sprachen bestehen sollten, könnte dies zu Ungenauigkeiten in der Vorhersage von Testergebnissen führen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass unabhängig von der Sprache deutliche Unterschiede in den Eigenschaften der Stimmfrequenzen und Artikulationen verschiedener Testsprecher bestehen. Des Weiteren ergeben sich Probleme durch sprachenspezifische linguistische Unterschiede, wie zum Beispiel die unterschiedliche Häufigkeitsverteilung von ein- und mehrsilbigen Wörtern. So tritt in der deutschen Sprache der Zweisilber häufiger auf als der Einsilber (Lazarus et al. 2007, S. 35). Außerdem werden durch grammatikalische Regeln Buchstaben oder Satzteile anders gewichtet, so zum Beispiel das Plural-S der englischen Sprache, dessen Verständlichkeit stark von Hochtonhörverlusten abhängt. Darüber hinaus gibt es Hinweise in der Literatur, dass die testspezifischen Sprachinformationsverteilungen nicht mit denen aus der ANSI Norm zum SII identisch sind (Studebaker et al. 1987).

1.2 Hören und Verstehen menschlicher Sprache

1.2.1 Psychoakustische Grundlagen

Die Sprache wird vom auditorischen System des Menschen in einem sehr komplexen Vorgang vom Hören bis zum Verstehen verarbeitet.

Die Psychoakustik beschreibt die Zusammenhänge zwischen dem akustischen Reiz und dessen Wahrnehmung. Den Bereich, in dem der Mensch akustische Reize ohne Schmerzempfindung wahrnehmen kann, bezeichnet man als Hörfläche. Das menschliche Ohr ist in der Lage, Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz als Schall wahrzunehmen. Im tieffrequenten Bereich ist die Grenze durch den Übergang vom Hör- zum Vibrationsempfinden gekennzeichnet. Den geringsten Pegel, bei dem ein Ton wahrgenommen wird, nennt man absolute Hörschwelle (Böhme und Welzl-Müller 2005, S. 37). Diese ist frequenzabhängig und liegt beim Mensch im mittleren Frequenzbereich von 2 bis 5 kHz am niedrigsten (Mrowinski et al. 2017, S. 24). Oberhalb von 120 dB SPL liegt die Schmerzgrenze.

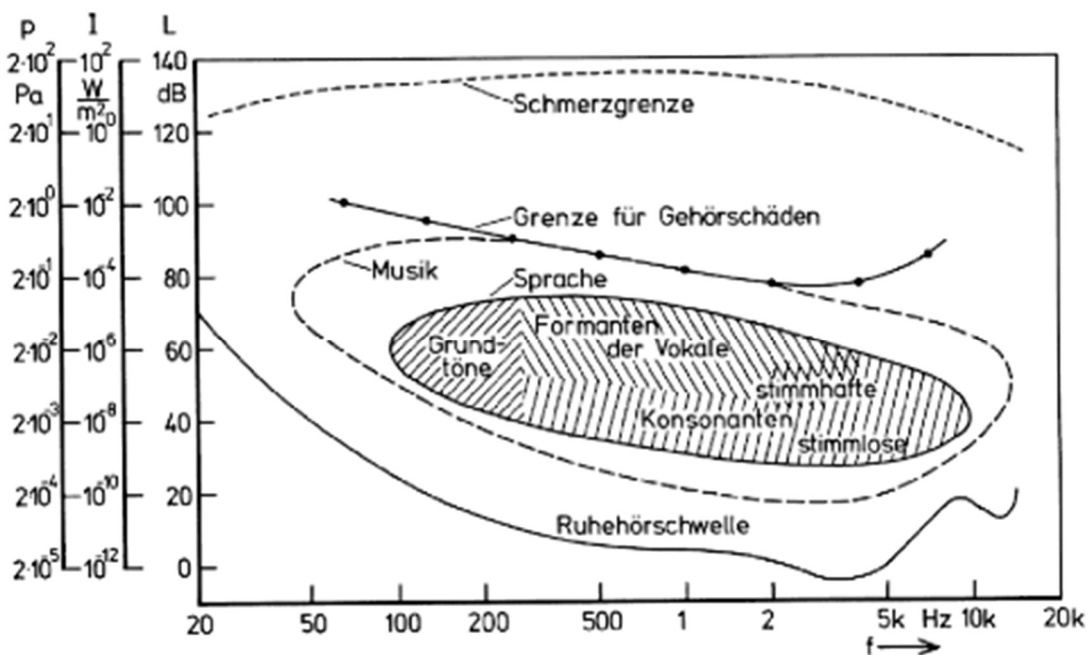


Abbildung 1: Hörfläche des menschlichen Gehörs zwischen Ruhehörschwelle und Schmerzschwelle (Lazarus et al. 2007, S. 19).

Ebenso ist die Wahrnehmung der Lautstärke frequenzabhängig. Welcher Schalldruckpegel oberhalb der absoluten Hörschwelle bei welchen Frequenzen als gleich laut empfunden wird, kann in den sogenannten Isophonen abgelesen werden. Diese sind in Abbildung 2 für verschiedene Schallpegel eines 1 kHz Tones dargestellt.

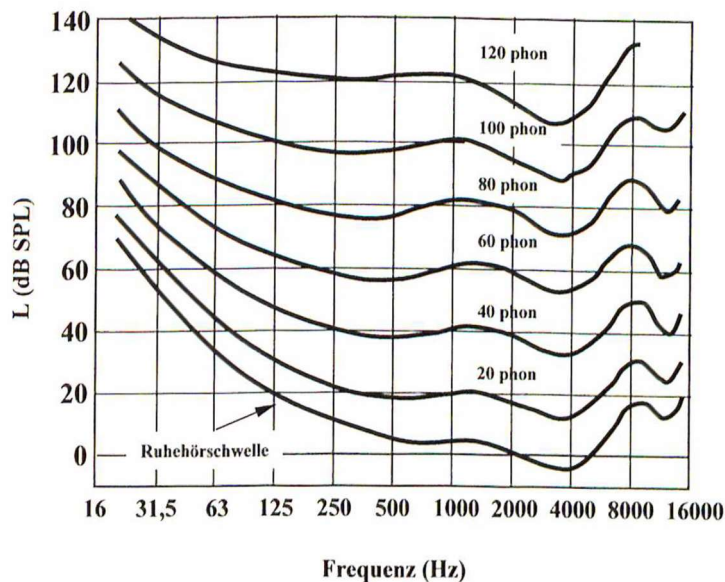


Abbildung 2: Frequenzabhängige Lautstärkewahrnehmung des menschlichen Ohres; Isophone der Pegel gleicher Lautstärke bezogen auf den Pegel eines 1 kHz Tones (Böhme und Welzl-Müller 2005, S. 37).

Für die Informationsübertragung mit Sprache sind jedoch zusätzlich zur Hörbarkeit auch das Identifikations- und Unterscheidungsvermögen entscheidend (Steffens 2017; Böhme und Welzl-Müller 2005, S. 39; Steffens und Marcrum 2018). Dazu muss das Gehör im Zeitverlauf der Schallsignale minimale Pausen, Pegel- und Frequenzänderungen identifizieren und unterscheiden können, welche charakteristische Details der mit dem Schallsignal übertragenen Information darstellen.

Das Frequenzauflösungsvermögen beschreibt den minimalen Frequenzabstand, den zwei gleichzeitig vorhandene Töne haben müssen, um getrennt voneinander wahrgenommen zu werden. Es ist pegelabhängig, da es wesentlich von der pegelabhängigen Wanderwellenbreite auf der Basilarmembran gebildet wird. Des Weiteren ist es frequenzabhängig. Unterhalb von 500 Hz beträgt es für normallaute Signale circa 100 Hz, darüber hat es eine konstante relative Bandbreite von annähernd einer Terz (Böhme und Welzl-Müller 2005, S. 40). Das Frequenzauflösungsvermögen ist Grundlage zur Identifizierung und Diskriminierung von

Vokalen, Umlauten und stimmhaften Konsonanten. Bei Innenohrschwerhörigkeiten und hohen Schallpegeln, wie sie zum Beispiel durch eine Hörgeräteverstärkung erzeugt werden, verbreitern sich die Wanderwellen erheblich und verschlechtern dadurch unmittelbar auch das Frequenzauflösungsvermögen (Steffens und Marcum 2018). Die Wahrnehmung von Tonhöhe, Klang oder auch Rauigkeit stellen weitere psychoakustische Leistungen im Frequenzbereich dar, die einen wesentlichen Beitrag zur Lauterkennung liefern.

Sprache ist weiterhin durch extrem schnelle Schallpegelveränderungen und kurze Pausen zwischen Silben oder Wörtern gekennzeichnet. Deren Identifizierung und Diskriminierung ist vom Zeitauflösungsvermögen abhängig. Das Zeitauflösungsvermögen wiederum ist von mechanischen Einschwingvorgängen auf der Basilarmembran, pegelabhängigen Refraktärzeiten der neuronalen Elemente von Hörnerv und zentraler Hörbahn und von den Verarbeitungszeiten im Hörkortex und allen nachfolgenden neuronalen Netzwerken der Wahrnehmung von akustischen Signalen abhängig (Moore 1989, 137 ff; Steffens und Marcum 2018).

Eine psychoakustische Quantifizierung des Zeitauflösungsvermögens für Pegelschwankungen lässt sich mit dem Gap-Detection-Test durchführen. Damit werden die kürzesten perzeptiven Lücken in einem Schallsignal (zum Beispiel weißes Rauschen oder auch Sinustöne) bei einem bestimmten Pegel gemessen. Für weißes Rauschen mit normallautem Pegel beträgt das Zeitauflösungsvermögen circa 2 bis 3 ms (Plomp 1964). Bei Innenohrschwerhörigkeiten und retrocochleären Störungen kann es auf das Vielfache seines Normalwertes verlängert sein (Irwin et al. 1981; Steffens und Marcum 2018).

Sind die psychoakustischen Grundgrößen die Basis zur Erkennung von informationstragenden Details eines akustischen Sprachsignals, braucht es zum Verstehen von Sprache jedoch mehr als die bloße Wahrnehmung von Schall. Die gehörten Reize müssen durch kognitive Prozesse in Information übersetzt, ausgewertet und gespeichert werden.

1.2.2 Akustische und linguistische Eigenschaften gesprochener Sprache

Die akustische, also gesprochene Sprache überträgt Information mit Hilfe von Klang-, Pegel- und Frequenzänderungen über die Zeit (Lazarus et al. 2007, S. 41). An erster Stelle der Sprachverarbeitung im auditorischen System steht die Hörbarkeit aller Sprachbestandteile, die wesentlich durch deren Schallpegel und dessen Differenz zur Hörschwelle oder zu Schallpegeln von Störgeräuschen (Signal-Rausch-Verhältnis) definiert ist (Steffens 2017). Der wichtigste Messwert zum Messen des Schallpegels der Sprache ist der breitbandig, mit Frequenzgewichtung „Z“ oder „C“ gemessene Effektivwert des zeitlich schwankenden akustischen Signals. Dieser entspricht dem Mittelungspegel über die Sprechzeit. Er ist von der Stimmkraft des Sprechers (Vocal Effort) und dem Abstand zur Sprachquelle abhängig. Da er Artikulationspausen mit einbezieht, ist sein Wert im Durchschnitt um 1 bis 2 dB niedriger als der Mittelungspegel eines einzelnen Wortes. Innerhalb eines gesprochenen Satzes ändert sich der Pegel der Sprache innerhalb eines Bandfilters um 30 bis 40 dB (Lazarus et al. 2007, S. 41). Diese Dynamik des Sprechpegels, also der Unterschied zwischen minimalem und maximalem Pegel, ist zum einen durch die stärkere Betonung bestimmter Laute oder Wörter in der Sprache bedingt, zum anderen sorgt die unterschiedliche Art der Artikulation in Kehlkopf, Mund und Rachenraum dafür, dass verschiedene Laute mit unterschiedlicher Intensität ausgesprochen werden. Vokale werden mit deutlich höherer Intensität gesprochen als Konsonanten (Lazarus et al. 2007, S. 26). So sind die Vokale 20 bis 25 dB lauter als die leisesten Konsonanten „f“, „p“, „d“ und „b“ (Lazarus et al. 2007, S. 47). Beim Hören von Sprache werden Vokale schon bei einem mittleren Pegel von 25 dB verstanden, Konsonanten benötigen dafür einen Schallpegel der Silben zwischen 30 und 60 dB. Die Konsonanten enthalten deutlich mehr Sprachinformation und sind deshalb zum Verstehen von Sprache wichtiger (Lazarus et al. 2007, S. 26–27). Konsonanten und Vokale werden in der geschriebenen deutschen Sprache in einem Verhältnis von etwa 61 % zu 39 % verwendet (Meier 1964).

Sprache umfasst einen Frequenzbereich von circa 100 Hz bis 10 kHz. Das Maximum der Schallintensität gesprochener Sprache liegt bei 300 bis 500 Hz. Eine Veränderung der Sprechweise hat auch eine Verschiebung des Sprachspektrums zur Folge. So verschiebt sich bei Anheben der Stimme (größerer Vocal Effort) durch die stärkere Spannung der Stimmlippen die maximale Schallintensität von niedrigeren zu höheren Frequenzbereichen (Lazarus et al. 2007, S. 51–52). Die Frequenzcharakteristik wird vor allem durch die einzelnen Sprachlaute (Phoneme) bestimmt. Zwischen einem Vokal oder einem Konsonant

variiert der Frequenzverlauf stark (Lazarus et al. 2007, S. 54). Männliche und weibliche Sprecher unterscheiden sich hauptsächlich in den tiefen Frequenzen. So liegt die mittlere Grundfrequenz der Stimme bei Männern bei circa 125 Hz, bei Frauen mit 250 Hz höher (Lazarus et al. 2007, S. 51–53).

Wichtige akustische Merkmale gesprochener Sprache sind auch die Sprechgeschwindigkeit sowie Sprechpausen. Beim Vorlesen eines englischen Textes hatten Vokale eine Länge von 60 bis 180 ms, Konsonanten dagegen von 50 bis 120 ms. Die typische Sprechgeschwindigkeit sowohl im Englischen als auch im Deutschen beträgt circa 200 Silben pro Minute, wobei 20 % der Gesamtsprechzeit als Pausen mit einberechnet waren. Mit Anstieg des Sprechpegels verlangsamt sich die Sprechgeschwindigkeit deutlich. Die Sprechgeschwindigkeit ist zwar phonetisch irrelevant, wirkt sich jedoch aufgrund der damit verbundenen Notwendigkeit zur schnelleren auditorischen Analyse und geringeren Zeit für Fehlerkorrekturen deutlich auf das Sprachverstehen aus (Lazarus et al. 2007, S. 58–59).

Innsbrucker	Marburger	HSM	Göttinger
sehr langsam	langsam	normal	sehr schnell
121 ± 18	124 ± 23	222 ± 40	279 ± 38
Silben/Min.	Silben/Min.	Silben/Min.	Silben/Min.

Tabelle 1: Sprechgeschwindigkeiten der traditionellen Satztests im Vergleich, Erwartungswert und Standardabweichung (Müller-Deile 2009, S. 84–85).

Die Verständlichkeitsschwelle für Sprache ist nicht allein vom Sprachpegel und der Sprachdynamik abhängig, sondern auch von der Art des Sprachmaterials, wie zum Beispiel sinnlose Silben, Wörter oder Sätze, sowie von dem Bekanntheitsgrad der Wörter und bei Sätzen von der Semantik und Grammatik. Wegen der ähnlichen Sprechweise in vielen europäischen Sprachen liegen die Verständlichkeitskurven der meisten sprachaudiometrischen Tests sehr ähnlich. Die Sprachverständlichkeitsschwellen von Einsilbern für die englische, französische, schwedische und deutsche Sprache liegen bei circa 30 bis 37 dB (Lazarus et al. 2007, S. 26).

1.3 Drei - Stufenmodell der Sprachverarbeitung im auditorischen System von Steffens

Die akustische, also gesprochene Sprache ist erst dann für den Hörer nützlich, wenn am Ende aller Verarbeitungsstufen im auditorischen System die mit der Sprache übertragene Information, die Sprachbotschaft, erfasst und verstanden wird. Zuvor müssen allerdings alle akustischen Einzelelemente, die Sprachinformation übertragen, wie Laute, Silben und Wörter, gehört, identifiziert und ggf. auch diskriminiert werden.

Die erste Stufe der Sprachverarbeitung im auditorischen System stellt deshalb die potenzielle Hörbarkeit der übertragenen Sprachinformation dar. Darunter ist im neurophysiologischen Sinn die korrekte und vollständige Umwandlung der sprachinformationsübertragenden Elemente in ein spezifisches Nervenerregungssignal zu verstehen. Deshalb ist die potenzielle Hörbarkeit für Sprache in Ruhe von der Hörschwelle und Selbst-Maskierungseffekten im Innenohr abhängig. Für Sprache im Störgeräusch kommen noch das physikalische Signal-Rausch-Verhältnis und die auf der Basilarmembran entstehenden mechanischen Maskierungseffekte durch die Wanderwellen des Störgeräusches auf die gleichzeitig vorhandenen Wanderwellen des Sprachsignals hinzu. Nur die akustische Sprachinformation, deren Schallpegel größer als die Hörschwelle ist und die nicht durch Selbst- und Störgeräuschmaskierung verdeckt ist, steht den neuronalen Prozessen der Sprachverarbeitung im auditorischen System zur Verfügung. Damit ist sie potenziell hörbar, die tatsächliche, psycho-akustische Hörbarkeit ist jedoch auch von den nachfolgenden Stufen der neuronalen Verarbeitung abhängig.

Die zweite Stufe der Sprachverarbeitung besteht aus der Verarbeitung und Auswertung der neuronalen Signale der potenziell hörbaren Sprachinformation. In dieser Stufe werden die einzelnen Sprachinformation übertragenden Elemente wie Laute, Silben und Wörter identifiziert und von ähnlichen Elementen diskriminiert. Aufbauend auf die Laut- und Silbenidentifizierung werden die Einzelwörter entweder neu gelernt oder aus dem individuellen Wortschatz durch den Vergleich der ankommenden Eigenschaftsmuster mit den gespeicherten Mustern eines Wortes verglichen und identifiziert. Alle Prozesse der zweiten Verarbeitungsstufe können als Sprachverständlichkeit bezeichnet werden.

Aus den Einzelwörtern wird nun in der dritten Verarbeitungsstufe die Sprachbotschaft ermittelt. Das Erfassen der Sprachbotschaft und das Verstehen deren Sinns werden als

Sprachverstehen bezeichnet. Durch das Sprachverstehen können effizient Fehler der ersten und zweiten Verarbeitungsstufe korrigiert werden. Beispielsweise kann ein perzipierter Satz „Am blauen Himmel scheint die Nonne“ durch Erfahrung und logische Überlegungen in die richtige Aussage „Am blauen Himmel scheint die Sonne“ korrigiert werden. Die Korrekturoptionen durch die Prozesse des Sprachverstehens spielen in der alltäglichen Sprachkommunikation und für die Testergebnisse von Satztestverfahren mit sinnvollen Sätzen eine entscheidende Rolle. Dies ist die Basis einer eigenständigen Gewichtung der übertragenen und potenziell hörbaren Sprachinformation in Satztestverfahren gegenüber Einzelwortverfahren (Steffens 2017).

1.4 Modelle zur Sprachverständlichkeit und zum Sprachverstehen

Als Modell für die Identifizierung von Einzelworten in der Stufe der Sprachverständlichkeit hat sich das Neighbourhood Activation Model (NAM) von Luce und Pisoni bewährt (Luce und Pisoni 1998). Sie beschäftigten sich mit der strukturellen Organisation von Klangmustern im Gedächtnis und deren Einfluss auf das Sprachverstehen und nahmen an, dass im geistigen Lexikon die Worte nach perzeptiver Ähnlichkeit in sogenannte „Nachbarschaften“ organisiert werden. Eine ähnliche Nachbarschaft wurde definiert als eine Sammlung von Wörtern, deren akustisch-phonetische Eigenschaften ähnlich zu denen eines im individuellen Lexikon bzw. Wortschatz abgespeicherten Wortes sind. Ein akustisches Eigenschaftsmuster, das durch die bottom-up Verarbeitung des auditorischen Systems in das Arbeitsgedächtnis gelangt, wird dort durch top-down Prozesse mit ähnlichen Eigenschaftsmustern schon gelernter und durch neuronale Verknüpfung abgespeicherter Wörter verglichen.

Beeinflusst wird die Identifizierungswahrscheinlichkeit der Worte hierbei von zwei Charakteristiken dieser Nachbarschaften. Erstens durch die Anzahl ähnlich klingender Worte und den Grad der Ähnlichkeit, genannt „Neighborhood Density“. Zweitens ist die Benutzungshäufigkeit dieser Worte in der Sprache entscheidend, die „Neighborhood Frequency“. Dies bedeutet, dass gut bekannte und häufig gehörte und verwendete Worte eine größere Speicherstärke, also stärkere neuronale Verknüpfung, im Wortschatz aufweisen als seltenere. Die Speicherstärke soll im Wortidentifikationsprozess dazu führen, dass ähnliche, nicht sicher unterscheidbare Klangmuster mit höherer Wahrscheinlichkeit zur Auswahl und Perzeption von häufiger verwendeten Wörtern führen. Fehlen zum Beispiel durch verbreiterte Wanderwellen einige akustische Details zur perzeptiven Unterscheidung der akustisch

ähnlichen Laute „i“ und „e“, kann in dieser Verarbeitungsstufe ohne Verwendung von Kontextinformation nicht sicher zwischen den artikulationsgleichen Wörtern „beten“ und „bieten“ unterschieden werden. Bei stark religiösen Menschen könnte eine häufigere Verwendung des Wortes „beten“ zu dessen Identifizierung führen, während bei Menschen, deren Leben sich stärker im wirtschaftlichen Kontext abspielt, eine häufigere Verwendung des Wortes „bieten“ dessen Auswahl bevorteilt.

Das NAM eignet sich wegen seines qualitativen und quantitativen Bezugs auf die identifizier- und unterscheidbaren Details der Sprachinformation sehr gut zur modellhaften Beschreibung der Stufe der Sprachverständlichkeit.

Ein weiteres anerkanntes Modell zur Beschreibung der Sprachinformationsverarbeitung der fließenden Sprache, das damit auch die Stufe des Sprachverstehens beinhaltet, ist das Ease of Language Understanding (ELU) Modell nach Rönning et al. (Rönning et al. 2013). Das ELU stellt eine Erweiterung der Modelle zur Einzelworterkennung wie das NAM dar, indem es zusätzlich zu den Prozessen der Einzelworterkennung auch die semantischen Informationen durch das Sprachverstehen, den Kontext von Sätzen und der gesamten Gesprächssituation mit fließender Sprache berücksichtigt.

1.5 Sprachaudiometrische Tests zur quantitativen Bewertung von Sprachverständlichkeit und Sprachverstehen

In den USA wurde schon früh mit der systematischen Konstruktion von sprachaudiometrischen Tests begonnen, um Probleme besonders in der Elektroakustik von Telefonen zu bearbeiten. Die Bell Telephone Labs entwickelten bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts einen Sprachtest mit sinnlosen Silben (Lazarus et al. 2007, S. 32). Im deutschen Sprachraum geht der erstmalige Einsatz von Sprache zum Erfassen einer Hörstörung sogar bis in das Jahr 1804 zurück (Feldmann 2004).

Sprachaudiometrische Tests finden in sehr unterschiedlichen Bereichen Anwendung, in erster Linie im Rahmen der audiologischen Diagnostik bei Schwerhörigkeiten und zur Anpassung und Überprüfung von Hörgeräten. Daneben werden sie aber auch genutzt, um die Sprachübertragungsqualität von Räumen wie Auditorien, Kongressräumen oder Theater zu

testen und die Qualität von Sprachübertragungssystemen, wie beispielsweise dem Telefon, zu prüfen (Lazarus et al. 2007, S. 30).

Die Sprachverständlichkeit als Leistung der zweiten Verarbeitungsstufe von Sprachsignalen im auditorischen System wird in der Regel mit Einzelworttests in Ruhe, also ohne Störgeräusche untersucht. Das Ergebnis ist in erster Linie von der Hörbarkeit der informationstragenden Sprachelemente (Laute, Silben, Wörter) und deren Identifizier- und Unterscheidbarkeit abhängig (Steffens 2017). Der im deutschen Sprachraum meistverwendete Einzelworttest ist der Freiburger Zahlen- und Einsilbertest (Hahlbrock 1953).

Will man das sprachliche Hörvermögen unter akustischen Alltagsbedingungen testen, eignen sich am besten Satztests im Störgeräusch. Sie repräsentieren die fließende Sprache der Alltagskommunikation, die nur selten in der Ruhe eines Hörprüfraums stattfindet, sondern typisch im Störgeräusch (Steffens 2017). In der diagnostisch orientierten klinischen Audiometrie werden sie zwar deutlich seltener verwendet als Einzelworttests, dafür eignen sie sich hervorragend zur Wirkungsüberprüfung von Hörhilfen unter sprachlich-akustischen Alltagsbedingungen.

Damit ein sprachaudiometrischer Test repräsentative Ergebnisse liefern kann, muss er sowohl von der Phonetik als auch von der grammatikalischen und semantischen Struktur den Bedingungen der damit repräsentierten Sprache entsprechen. So werden im Freiburger Einsilbertest die Konsonanten und Vokale in der deutschen Sprache als Einzellaute in der statistisch ermittelten typischen Häufigkeit im normalen Verhältnis der Schriftsprache von 61 % zu 39 % in ihrer Gesamtverteilung über alle 400 Testwörter verwendet. Dieses Verhältnis wurde auch für jede einzelne Testliste mit 20 Wörtern angestrebt, konnte allerdings zugunsten des Bekanntheitsgrades der Testwörter nicht vollständig realisiert werden (Meier 1964). Da der Bekanntheitsgrad eines jeden Wortes stark dessen Verständlichkeit beeinflusst, sollte bei der Zusammenstellung der Einzelwörter zu Testlisten auf eine ähnliche Verwendungshäufigkeit in der Umgangssprache für alle Testlisten geachtet werden. Bei Satztests sollte zusätzlich die grammatikalische und syntaktische Satzstruktur der typischen Redeweise der Alltagskommunikation angepasst werden.

Auch die stimmlichen und artikulatorischen Eigenschaften des Sprechers können großen Einfluss auf das Testergebnis haben. So kann zwischen männlichem und weiblichem Sprecher, starker oder weniger starker Artikulation und verschiedenen Sprechgeschwindigkeiten variiert werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Antwortmethoden zu gestalten. In der offenen Testform spricht die Versuchsperson das Gehörte ohne weitere Hilfestellung nach. In der geschlossenen Testform kann der Hörer aus einer Reihe von schriftlich vorgegebenen Antwortalternativen auswählen.

Aufgrund der großen Anzahl der testmethodischen Parameter bei der Konstruktion von Sprachtests ist ein Vergleich der Testergebnisse untereinander sehr schwierig und nur grob quantitativ durch Transferfunktionen möglich (Lazarus et al. 2007, S. 30–34).

1.6 Satztests im Unterschied zu isolierten Einzelworten

Die Wahrnehmungsleistung von Sprache hängt stark von der Art des dargebotenen Sprachmaterials ab. Die Psycholinguistik geht davon aus, dass bei der Sprachwahrnehmung neben phonetischen Informationen vor allem auch die grammatikalisch-inhaltliche Ebene entscheidend ist (Lazarus et al. 2007, S. 425–426). Bei Einbettung in Kontext werden Wörter signifikant besser verstanden. So sind sinnlose Silben durch Fehlen jeder Semantik und Kontext deutlich schlechter verständlich als Einsilber und diese wiederum schlechter als beispielsweise mehrsilbige Zahlen. Je mehr Worte im Kontext zueinander stehen und je geringer die mögliche Auswahl, desto höher ist die Chance, ein Wort richtig wahrzunehmen (Miller et al. 1951). Mit der Anzahl der präsentierten Kontextwörter sowie der Häufigkeit des Auftretens (Gebräuchlichkeit) eines Wortes wächst die durchschnittliche Verständlichkeit an (Stowe et al. 1963).

Bei Sätzen tragen zusätzlich grammatikalisch-syntaktische Strukturen zum Verstehen bei. Der Hörer hat bei Kenntnis der Regeln zur Abfolge bestimmter sprachlicher Reize bereits Hinweise auf die noch fehlende Sprachinformation und die möglichen Alternativen können eingeschränkt werden (Miller et al. 1960). Satztests haben dadurch eine höhere Redundanz an akustischer Sprachinformation als Einzelworttests, was das Verstehen auch bei schlechten akustischen Bedingungen deutlich erleichtert.

Die Nutzbarkeit von Kontext ist eine individuelle Fähigkeit der Testperson. Hierbei spielen der Wortschatz, der Grad der Beherrschung dieser Sprache und die kognitiv-sprachliche Leistungsfähigkeit der Testperson eine Rolle.

1.7 Quantitative Bewertung der mit Sprache übertragenen potenziell hörbaren Sprachinformation

Für das vollständige Erfassen einer akustischen Sprachbotschaft ist die potenzielle Hörbarkeit der gesamten zum Ohr des Hörers übertragenen Sprachinformation ideal. Gleichzeitig vorhandene Störgeräusche und verschlechterte Hörschwellen des Hörers können die potenziell hörbare Sprachinformation entweder gar nicht, gering, erheblich oder sogar vollständig maskieren und unhörbar machen.

Die quantitative Analyse der übertragenen und perzeptiv nutzbaren Sprachinformation geht auf French und Steinberg zurück, die in den Bell Telephone Laboratories in New York eine Methode zur Vorhersage der potenziellen Hörbarkeit von Sprachinformation, die über ein Telefonsystem übertragen wurde, entwickelten (French und Steinberg 1946). Sie unterteilten das Sprachspektrum in einzelne voneinander unabhängige Frequenzbänder und bewerteten dann für jedes Frequenzband dessen Beitrag zur gesamten Sprachinformation einerseits unter optimalen Hörbedingungen, mit vollständiger Hörbarkeit der gesamten Sprachdynamik ohne akustische Maskierung, andererseits mit Störgeräuschen zur Reduzierung der hörbaren Sprachdynamik. Daraus ermittelten sie sowohl den relativen Anteil der in jedem Frequenzband enthaltenen Sprachinformation als auch 20 Frequenzbänder mit unterschiedlicher Bandbreite, aber gleichem relativen Anteil an Sprachinformation (jeweils 5 % Sprachinformation pro Band). Die Summe aller relativen Anteile der in unterschiedlichen Frequenzbändern vorhandenen hörbaren Sprachinformation wurde als Artikulationsindex (AI) bezeichnet. Der AI ergibt sich aus der Summe der in Abhängigkeit des Signal-Noise-Ratio (SNR, entspricht Verhältnis von Signal zu Störgeräusch) und der Sprachpegeldynamik hörbaren, d. h. bei gleichzeitiger Anwesenheit von Störgeräuschen unmaskierten und oberhalb der Hörschwelle liegenden relativen Anteile der Sprachinformation (A_i) in jedem der i Frequenzbänder und einer Gewichtsfunktion (W_i), die die Wichtigkeit des jeweiligen Frequenzbandes beschreibt. W_i gibt dazu den maximalen relativen Anteil der Sprachinformation wieder, der im jeweiligen Frequenzband dem Hörer unter den optimalen akustischen Bedingungen ohne Maskierungen durch Störgeräusche zur Verfügung steht. Der AI addiert sich aus den hörbaren relativen Informationsanteilen aller i Frequenzbänder zu einem Gesamtwert zwischen 0 und 1.

$$AI = \sum W_i \cdot A_i \quad (1)$$

Ein AI von 0 bedeutet, dass keine Sprachinformation potentiell hörbar ist, zum Beispiel durch eine vollständige Maskierung des Sprachpegels durch Störgeräusch oder zu hoher Hörschwellen. Bei einem AI von 1 ist die gesamte Sprachinformation potentiell hörbar. Frequenzbänder mit einem hohen Anteil an Sprachinformation tragen viel zum Sprachverstehen bei und besitzen deshalb eine höhere Wichtigkeit W_i (Band Importance) als solche mit einem geringeren Sprachinformationsanteil. Die Abhängigkeit des Anteils W_i von der Mittenfrequenz des zugehörigen Frequenzbandes wird als Band Importance Function (BIF) oder auch Frequency Importance Function (FIF) bezeichnet.

Das SII-Verfahren, das 1997 als nationale amerikanische Norm ANSI S.3.5 festgelegt wurde (ANSI S3.5-1997 (R 2007)), ist eine Weiterentwicklung des AI, folgt allerdings weiterhin dem Ansatz der Additivität der Sprachinformationsanteile in verschiedenen Frequenzbändern. Wie beim AI wird das akustische Sprachsignal in einzelne Frequenzbänder unterteilt und deren spezifischer hörbarer Informationsgehalt ermittelt. Die Variation der Hörbarkeit wird im SII-Verfahren ebenfalls durch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), den energieäquivalenten Dauerschallpegel des Sprachsignals (L_{Seq}) und eines stationären Rauschens zur Simulation der Hörschwelle (L_{Neq}) definiert, jedoch wurde die Lage des L_{eq} innerhalb der Sprachdynamik gegenüber dem AI verändert:

$$AI: -18 \text{ dB} < L_{eq} < 12 \text{ dB} \quad (2)$$

$$SII: -15 \text{ dB} < L_{eq} < 15 \text{ dB} \quad (3)$$

Der Signal-Rausch-Abstand wurde im SII also für jedes Band auf einen Bereich von -15 dB bis +15 dB begrenzt. Im Vergleich dazu lag dieser beim AI zwischen -18 dB und +12 dB. Wird der SNR beim SII im jeweiligen Band größer als +15 dB, wird angenommen, dass dieses Band vollständig zur Verständlichkeit beiträgt, während bei einem SNR kleiner als -15 dB sämtliche Sprachinformation maskiert wird. Außerdem wurde im SII-Verfahren der Frequenzbereich auf 100 – 9000 Hz erweitert (Lazarus et al. 2007, S. 263).

Da Sprache aus mehreren gleichzeitig vorhandenen Schallfrequenzen besteht, tritt im Innenohr durch die pegelabhängige räumliche Ausbreitung der Wanderwellen auf der Basilarmembran eine gegenseitige Überlagerung und Maskierung (Selbstmaskierung) der einzelnen Sprachfrequenzen auf, die im SII, nicht aber im AI berücksichtigt sind. Durch die zusätzliche Berücksichtigung dieser pegelabhängigen Auf- und Abwärtsmaskierung, die dazu führt, dass nicht alle gleichzeitig akustisch vorhandenen Sprachfrequenzanteile hörbar sind,

berücksichtigt die Hörbarkeitsfunktion des SII neben der physikalischen Maskierung des Sprachsignals durch stationäre Störgeräusche (für fluktuierende Störgeräusche oder Nachhall ist der SII weniger geeignet) auch die physiologische Maskierung durch die Innenohrmechanik der Wanderwellen eines gesunden Innenohres:

$$SII = \sum I_i \cdot A_i \quad (4)$$

Hierbei ist I_i wieder die Band Importance Function und A_i die Hörbarkeitsfunktion (Band Audibility Function), die den Anteil der hörbaren, also in Relation zum SNR und Auf- bzw. Abwärtsmaskierungen unmaskierten Sprachpegeldynamik in Abhängigkeit der Frequenzbandmittenfrequenz beinhaltet. Das SII-Verfahren enthält die Berechnungen für vier verschiedene Aufteilungen der Frequenzbänder: in 20 Bänder mit jeweils gleichem AI (5 % pro Band), in 21 psychoakustische Frequenzgruppen, in 18 Terzbänder und in 6 Oktavbänder (Acoustical Society of America 1997).

Die BIF und damit das SII-Verfahren sind direkt vom Sprachfrequenzspektrum und dem Sprachpegel eines Sprechers abhängig. Im SII-Verfahren werden für unterschiedliche Sprachpegel durch unterschiedlich großen Stimmaufwand (Vocal Effort) standardisierte mittlere Sprachspektren angegeben, die einen durchschnittlichen männlichen Sprecher repräsentieren. Prinzipiell kann aber auch das Sprachspektrum eines beliebigen einzelnen Sprechers in die Berechnung einfließen, wenn damit die sprecherspezifischen BIF ermittelt wurden. Hiermit ergibt sich die Möglichkeit einer Vorhersage von Sprachtestergebnissen aus den akustischen Hörbedingungen, wenn die sprecherspezifischen BIF genau aus diesem Sprachmaterial ermittelt werden. Bisher wurden die im SII-Verfahren benötigten Daten zur frequenzbandspezifischen Sprachinformationsverteilung allerdings nur für englisches Sprachmaterial ermittelt. Für die deutschsprachigen Sprachtests fehlen entsprechende Angaben.

Sprachverstehen ist ein kognitiver Vorgang, wogegen AI oder SII den Anteil der übertragenen und potenziell hörbaren Sprachinformation in Bezug auf die akustisch ausgesendete Gesamtsprachinformation als Eingangssignal für die neuronale Signalverarbeitung wiedergeben. Über eine Transferfunktion von quantitativen Sprachinformationsanteilen zu Sprachverständlichkeit kann jeder Anteil einer bestimmten empirisch ermittelten subjektiven Sprachverständlichkeit zugeordnet werden. Für den SII wird mit der Berücksichtigung der Normalhörschwelle und der normalen Innenohrmechanik zudem prinzipiell ein Normalgehör vorausgesetzt. Mit empirisch zu ermittelnden Transferfunktionen zwischen SII und der

subjektiven Sprachverständlichkeit des der Berechnung zugrunde liegenden Sprachmaterials kann aus einem SII-Wert die damit zu erwartende mittlere Sprachverständlichkeit vorhergesagt werden. Dies gilt sowohl für Normalhörende als auch prinzipiell für Patienten mit Hörstörungen, wenn spezifische Korrekturfaktoren für bestimmte Klassen und Ausprägungen von Hörstörungen verwendet werden. Es ist zu beachten, dass sowohl der AI als auch der SII für stationäres Rauschen entwickelt wurden und die davon abweichenden Maskierungswirkungen von fluktuierenden Störgeräuschen und Nachhall in den ursprünglichen Verfahren nicht berücksichtigt werden.

1.8 Zielsetzung dieser Arbeit

Bis heute kann eine Vorhersage des Sprachverstehens auf der Basis des SII für deutschsprachige sprachaudiometrische Tests nur näherungsweise mit den Band Importance Functions (BIF) eines männlichen Sprechers der englischen Sprache erfolgen. Es ist anzunehmen, dass die Frequenzverteilung der Sprachinformation des individuellen Sprechers eines sprachaudiometrischen Tests in der deutschen Sprache durch Abweichungen im Informationsgehalt in unterschiedlichen Frequenzbändern von den Vorgaben aus der englischen Sprache abweicht. Um mit Hilfe des SII-Verfahrens Vorhersagen der spezifischen Testergebnisse deutschsprachiger Sprachtests treffen zu können, muss für den individuellen Testsprecher und das testspezifische Sprachmaterial eine eigene BIF bestimmt werden. In dieser Arbeit soll für den Göttinger Satztest die Band Importance Function und die Transferfunktion zur Vorhersage von Testergebnissen für Normalhörende ermittelt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Probanden

Getestet wurden 71 Studenten im Alter von 18 bis 27 Jahren, die aus dem Umfeld der Universität Regensburg ausgewählt wurden und sich freiwillig für den Test zur Verfügung stellten. Die Testpersonen mussten über folgende Voraussetzungen verfügen: Deutsch als Muttersprache, ein Mindestalter von 18 Jahren und eine normale Hörschwelle (≤ 15 dB HL) im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8000 Hz; sie durften außerdem keine Artikulationsstörung aufweisen. Während die ersten beiden Merkmale durch Befragung der Testpersonen festgestellt wurden, wurde zur Festlegung des Merkmals „Normalhörend“ eine тонаudiometrische Hörschwellenmessung über Luftleitung mit einem Kopfhörer im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8000 Hz durchgeführt. Grundsätzlich wurde für die Messung das rechte Ohr festgelegt. Waren die Hörschwellen des rechten Ohres oberhalb des Grenzwertes, wurde das linke Ohr getestet und für den Sprachverstehenstest herangezogen, soweit dieses normalhörend war. Das war bei vier Versuchspersonen der Fall.

Die Testpersonen erhielten im Vorfeld eine kurze Beschreibung der Aufgabenstellung. Die Teilnehmer hatten alle keine vorherige Erfahrung mit dem Testmaterial des Göttinger Satztests und dem Testablauf. Die Versuchspersonen erhielten jeweils eine Teilnahmeentschädigung von zehn Euro pro Stunde.

2.2 Testmaterial

Zielgemäß wurde als Testmaterial der Göttinger Satztest (GÖSA) verwendet (Kollmeier und Wesselkamp 1997). Der GÖSA besteht aus 20 Testlisten mit je zehn Sätzen. Bei den Sätzen handelt es sich um kurze, vollständige und sinnvolle Sätze, die die sprachliche Alltagssituation gut widerspiegeln, jedoch in keinem inhaltlichen Zusammenhang stehen. Er behandelt beispielsweise Themen aus dem Bereich Bahn, Haus, Essen und Alltagshandlungen. Als Beispiel soll die erste Testliste aufgeführt werden:

1. Stehend klatschten sie Beifall.
2. Das Haus hat keinen Garten.
3. Jetzt wird das Fundament gelegt.
4. Übermorgen fahren wir fort.

5. Die Belastung war zu hoch.
6. Er gewinnt sechs Spiele nacheinander.
7. Ein kleiner Junge war der Sieger.
8. Trotzdem wurde keiner satt.
9. Ich freue mich schon auf das Essen.
10. Wir hören den plätschernden Bach.

Jeder Satz besteht aus drei bis sieben Wörtern (Median fünf Wörter) und dauert zwischen 1,5 und 2,2 Sekunden. Sowohl innerhalb einer Testliste als auch zwischen den Testlisten wurden die Sätze bezüglich der Anzahl der Wörter und Silben in jeder Testliste und der ungefähren phonetischen Äquivalenz der Testlisten homogenisiert (Kollmeier und Wesselkamp, 1997). Die angestrebte Häufigkeitsverteilung der Laute wurde wie bei Hahlbrock der statistischen Verteilung der jeweiligen Laute in der deutschen Sprache nach Meier entnommen. Zusätzlich wurden in Bezug auf die mittlere Gesamtverständlichkeit schwerer oder leichter verständliche Sätze im Pegel angepasst, um annähernd gleiche Satz- und Listenverständlichkeit zu erhalten. Die resultierenden Testlisten erzielten eine gute Übereinstimmung ihrer mittleren Diskriminationsfunktionen ohne signifikante Unterschiede. Die Steilheit der Diskriminationsfunktion für Normalhörende von 11 %/dB bei Messungen in Ruhe ist wesentlich höher als bei Einzelworttests wie zum Beispiel dem Freiburger Einsilber mit 5 %/dB, bei Messungen im stationären Störgeräusch erreicht sie 19 %/dB (Kollmeier et al. 2011).

Gesprochen wurde der Test von einem männlichen ungeschulten Sprecher mit normaler umgangssprachlicher Artikulation. Für Schwerhörige gilt der Göttinger Satztest mit seiner schnellen Sprechweise (im Mittel 279 ± 38 Silben pro Minute) als schwieriger Satztest (Müller-Deile 2009).

Als Störschall besitzt der GÖSA ein sprechersimulierendes stationäres Rauschen (OINoise), das aus der vielfachen asynchronen Überlagerung der Sprecherstimme besteht und dessen Langzeitspektrum das des Satzmaterials annähert und somit die Sprache sehr gut maskiert (Kollmeier und Wesselkamp 1997). Das Störgeräusch begann und endete jeweils circa eine halbe Sekunde vor bzw. nach dem Satz.

In Abbildung 3 sind der Frequenzverlauf des L_{eq} des akustischen Terzspektrums des GÖSA und des sprechersimulierenden OINoise als freifeldentzerrtes Kopfhörersignal (Sennheiser HDA200) mit einem Breitband- L_{eq} von 65 dB SPL zusammen mit den Perzentilen der

Schallpegelverteilung dargestellt. Die Messung erfolgte mit der Zeitkonstante „fast“ und Frequenzbewertung „Z“ am Bruel&Kjaer 4153 – Ohrsimulatorcuppler. Die Messung des Terzpegelspektrums und des L_{eq} des GÖSA erfolgte als Mittelwert aller Testsätze. Dazu wurden alle 200 Sätze mit einer Pause von 125 ms (mittlere Silbenlänge) aneinandergehängt.

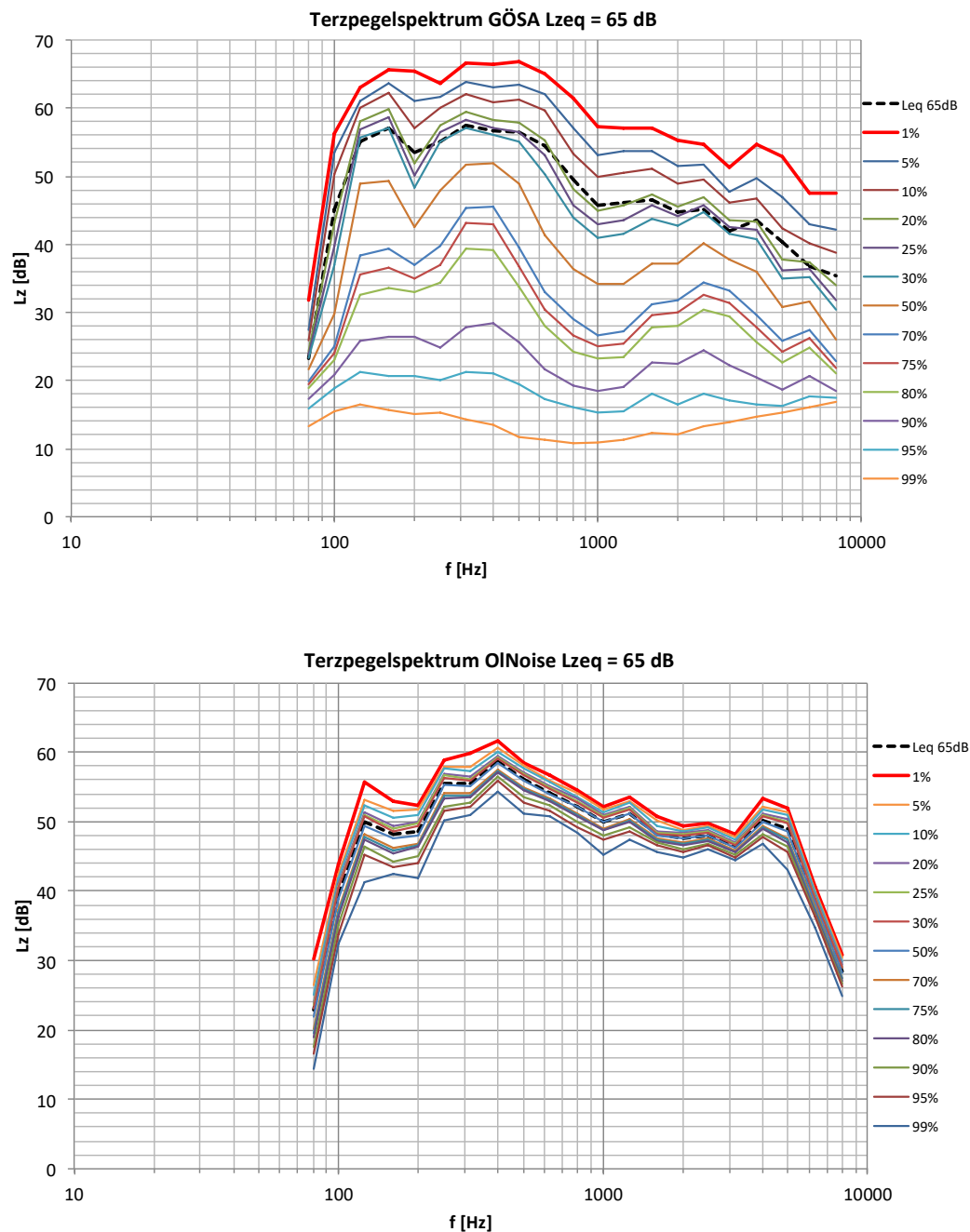


Abbildung 3: Akustische Terzpegelspektren und Schallpegelpercentile des GÖSA (oben) und des OINoise (unten) bei freifeldentzerrter Kopfhörerausgabe für einen Breitband- L_{eq} von 65 dB SPL.

2.3 Filterung und Präsentation des Sprachmaterials

Um den Beitrag einzelner Frequenzbänder zur Verständlichkeit des Sprachmaterials des Göttinger Satztests nach der Methode von Frech und Steinberg zu ermitteln, wurden alle Testlisten mit Hilfe des FFT-Filters des Programms Adobe Audition (Version 3) mit verschiedenen Hoch- und Tiefpassfiltern in 16 unterschiedlich breite, überlappende Frequenzbänder gefiltert (Tab. 2).

Breitband	88-9000 Hz
Tiefpassfilterung	88-142 Hz
	88-225 Hz
	88-355 Hz
	88-560 Hz
	88-900 Hz
	88-1420 Hz
	88-2250 Hz
	88-3550 Hz
	Hochpassfilterung
560-9000 Hz	
900-9000 Hz	
1420-9000 Hz	
2250-9000 Hz	
3550-9000 Hz	
5600-9000 Hz	

Tabelle 2: Filterbandbreiten zur Messung des Sprachverstehens für Breitband- und gefilterte Sprache.

Die sukzessive Bandbreitenzunahme wurde auf zwei Terzen festgelegt, wodurch einerseits die Anzahl der zu messenden Präsentationsbedingungen begrenzt, andererseits jedoch eine akzeptable Genauigkeit in der nachfolgenden Analyse der frequenzabhängigen Sprachinformationsverteilung erreicht wird. Die maximale Bandbreite von 88 Hz bis 9000 Hz der Breitbandpräsentation entspricht dem vollen Frequenzbereich der menschlichen Sprache (Lazarus et al. 2007). Als Fensterfunktion für eine möglichst effektive Filterung wurde ein Kaiser-Fenster mit 180 dB Dämpfung des ersten spektralen Nebenmaximums gewählt. Damit ergab sich eine Steilheit des FFT-Filters von 2300 dB/Oktave und eine mittlere Dämpfung von 110 dB im Sperrbereich. Geht man bei der Sprache von einer akustischen Pegeldynamik von 40 bis 50 dB aus, garantiert dies eine vollständige Unterdrückung aller Sprachsignale außerhalb des Durchlassbereichs des FFT-Filters.

Neben der Aufteilung des Sprachmaterials in Frequenzbänder wurde das Sprachsignal außerdem mit unterschiedlich lautem Störgeräusch überdeckt. Das SNR wurde von -13 dB bis 45 dB in mindestens 1 dB-Schritten variiert, damit das Sprachverstehen im jeweiligen Frequenzband zwischen 0 % und dem relativen Maximalwert variiert werden konnte. Durch Variation einerseits der Frequenzbandbreite und andererseits des Störgeräuschpegels ergab sich eine Vielzahl an verschiedenen Testbedingungen. Für jede dieser Kombinationen aus SNR und Filterbandbreite wurde mit einer Testliste von zehn Sätzen das prozentuale Sprachverstehen auf der Basis richtig wiedergegebener Wörter ermittelt. Durch die begrenzte Anzahl der Testlisten konnte jede Testperson maximal 20 verschiedene Testbedingungen absolvieren. Die Untersuchungsbedingungen und die Zuordnung der Testlisten wurden für jede Versuchsperson vor Beginn des Tests zufällig ausgewählt. Die resultierende Zufallstabelle wurde durch die Versuchsleiterin bei Bedarf so korrigiert, dass für jede Versuchsperson jede Testliste nur einmal angewendet und dass mindestens eine sehr leichte Bedingung zu Beginn absolviert wurde. Nach Möglichkeit sollte jede Versuchsperson insgesamt eine ausgewogene Mischung an leichten und schweren Testbedingungen absolvieren und gleichzeitig am Ende der Studie über alle Versuchspersonen hinweg insgesamt jede Testbedingung gleichhäufig angewendet worden sein. Dies wurde durch eine Vielzahl an Pivot-Tabellen in Excel erreicht.

Die Ausgabe des Sprach- und Rauschsignals erfolgte monaural über ein Audiometer (Astera, GN-Otometrics) mit freifeldentzerrtem Kopfhörer (Sennheiser HDA200). Der Sprachpegel L_{Seq} betrug konstant 65 dB SPL, für das gewünschte SNR wurde der Störgeräuschpegel entsprechend variiert. Die Messungen fanden in einem schallgedämpften Audiometrierraum der Universitäts-HNO-Klinik Regensburg statt.

Zuerst wurden die Hörschwellen zur Festlegung des zu verwendenden Ohres bestimmt. Danach bekamen die Testpersonen eine kurze Einweisung in den Test. Ihre Aufgabe war es, nach jedem vorgespielten Satz alles Verstandene zu wiederholen, auch wenn nur einzelne Worte verstanden worden waren. Der GÖSA weist unter guten Verständlichkeitsbedingungen zwar keinen relevanten Lerneffekt auf, dennoch wurde die erste Testliste immer in einer leichten und noch sehr gut verständlichen Bedingung vorgespielt, meistens mit breitbandiger Sprache und einem SNR von 0 oder 1 dB. Dadurch konnten sich die Testpersonen gleichzeitig in Vorbereitung auf die schwerverständlichen Testdurchgänge auf die Art der Sätze, den Sprecher und das Rauschen einstellen und es war gewährleistet, dass sie die Aufgabenstellung richtig verstanden hatten. Je nach Konzentrationsvermögen der

Versuchsperson wurde bei Bedarf eine kurze Pause zwischen den Untersuchungsbedingungen eingelegt. Die gesamte Untersuchungszeit betrug circa eine Stunde.

2.4 Datenauswertung

Zunächst wurde das Sprachverstehen der absolvierten Testlisten in Abhängigkeit des SNR und der jeweiligen Filterbedingung ausgewertet. Für jeden einzelnen Satz wurden wortweise die korrekt verstandenen Wörter ausgezählt und dann der Prozentsatz zu den je Liste maximal zu verstehenden Worten ermittelt. Für jede mögliche Testbedingung als Kombination von Filterbandbreite und Störgeräuschpegel ergab sich durch wiederholte Messungen schließlich ein prozentuales Sprachverstehen aufgrund des Anteils der Sprachinformation, welcher unter den gegebenen Bedingungen durchschnittlich noch zu hören war.

Danach wurden die Testergebnisse mit Hilfe des Grubbs-Tests auf Ausreißerwerte untersucht und bereinigt. Der Grubbs-Test geht von einer Normalverteilung der Testergebnisse aus und bestimmt die Lage eines Testwertes relativ zu den Parametern der Normalverteilung mit Hilfe eines Z-Wertes:

$$Z = \frac{|mean - value|}{SD}$$

Ist der Wert Z größer als der kritische Wert, basierend auf einem Signifikanzniveau von 5 %, so kann dieser Wert als ein signifikanter Ausreißer angesehen werden. Der Grubbs-Test wurde mit Hilfe der QuickCalcs Outlier Calculator GraphPad Software durchgeführt. Die 15 ermittelten Ausreißer wurden aus der weiteren Auswertung herausgenommen.

2.4.1 Bestimmung der Diskriminationsfunktionen und der Transferfunktion zwischen AI und Sprachverstehen

Die frequenzabhängige Sprachinformationsverteilung wurde nach der Methode von French und Steinberg ermittelt (French und Steinberg 1946). Diese basiert auf der Idee, eine (absolute) Transferfunktion zu entwickeln, mit der einem Artikulationsindex ein bestimmtes prozentuales Sprachverstehen zugeordnet werden kann. Hierfür wurde zunächst für jede Filterbandbreite die Diskriminationsfunktion der Sprachverständlichkeit (SV) in

Abhängigkeit vom SNR ermittelt. Als Modellfunktion der Sprachverständlichkeit wurde entweder eine logistische Funktion (Wagener et al. 1999) oder eine Wachstumsfunktion nach Gompertz (Gompertz 1825; Winsor 1932) verwendet, je nach Höhe des Regressionskoeffizienten und der visuellen Beurteilung der Lage der Fitfunktion zu den Datenpunkten.

$$\text{Logistische Funktion} \quad SV(SNR) = \frac{a}{1 + e^{-\frac{SNR - SRT}{b}}} \quad (5)$$

$$\text{Gompertz – Funktion} \quad SV(SNR) = ae^{-e^{-\frac{SNR - SNR_0}{b}}} \quad (6)$$

Dabei bestimmt der Funktionsparameter a die maximale Sprachverständlichkeit, SRT die Sprachverständlichkeitsschwelle (SNR für 50 % Verständlichkeit) und gleichzeitig den Wendepunkt der logistischen Funktion, und SNR_0 den Wendepunkt der Gompertz-Funktion bei einer Verständlichkeit von 36,8 %. Der Parameter b beeinflusst den Anstieg der Funktion. Die Steigung m erreicht am Wendepunkt beider Funktionen ihr Maximum. Zusammen mit der maximalen Verständlichkeit a und dem Steilheitsparameter b gilt:

$$\text{Logistische Funktion} \quad m_{SRT} = \frac{a}{4b} \quad (7)$$

$$\text{Gompertz – Funktion} \quad m_{SNR_0} = \frac{a}{eb} \quad (8)$$

Die Anpassung der Funktionsparameter wurde mit Hilfe des Programms SigmaPlot13.0 durchgeführt.

Für die Transferfunktion, in welcher das SV in Abhängigkeit des AI aufgetragen ist, kommen ebenfalls verschiedene sigmoid verlaufende Funktionsgraphen in Frage. Für eine vergleichende Darstellung verschiedener Transferfunktionen siehe Tabelle 3 sowie Abbildung 8, zum Vergleich der Regressionskoeffizienten R siehe Tabelle 7 (Kapitel 3.3). Bei ähnlichen Werten von R wurde sich in der vorliegenden Studie zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Transferfunktionen in der Literatur für die Funktion nach Fletcher und Galt (Fletcher und Galt 1950; Studebaker und Sherbecoe 1991) entschieden:

$$\text{Fletcher – Galt} \quad SV(AI) = (1 - 10^{-\frac{AI}{Q}})^N \quad (9)$$

Q und N sind Parameter zur Anpassung der Funktion.

	Fletcher-Galt	Sigmoid	Gompertz	Weibull
Regressions- funktion	$(1 - 10^{-\frac{AI}{Q}})^N$	$\frac{a}{1 + e^{-\frac{SNR-SRT}{b}}}$	$ae^{-e^{-\frac{SNR-SNR_0}{b}}}$	$ae^{-\left(\frac{SNR-SNR_0+b\ln(2)^{\frac{1}{c}}}{b}\right)^c}$

Tabelle 3: Übersicht über verschiedene sigmoid verlaufende Fitfunktionen zur Berechnung der Transferfunktion.

Für die umgekehrte Ermittlung des AI aus dem Sprachverstehen werden inverse Transferfunktionen benötigt, die sich durch Umstellen der Transferfunktionen nach AI ergeben. Für die inverse Fletcher-Galt-Funktion ergibt sich dann:

$$\text{Inverse Fletcher-Galt-Funktion} \quad AI(SV) = -Q \log\left(1 - SV^{\frac{1}{N}}\right) \quad (10)$$

Die genaue Methode zur Herleitung der relativen Transferfunktion aus den Diskriminationsfunktionen soll nun im nachfolgenden Abschnitt erläutert werden.

2.4.1.1 Halving und Complementing

Die von French und Steinberg benutzte graphische Methode zur Herleitung der relativen Transferfunktion verfährt nach dem Prinzip des „Halving“ und „Complementing“ (French und Steinberg 1946).

Die Grundannahme bei der Entwicklung des AI ist, dass das Sprachspektrum in Frequenzbänder geteilt werden kann, deren Sprachinformationsgehalt sich addiert. Zweitens wird angenommen, dass die gesamte Sprachinformationsmenge in dem über alle Sprachfrequenzen reichenden breitbandigen Sprachspektrum bei einem bestimmten SNR bei dem Kreuzungspunkt zweier komplementärer Filterfunktionen (Hoch- und Tiefpassfilterung), die jeweils an den unteren (beim Hochpass) und oberen Grenzfrequenzen des Sprachspektrums (beim Tiefpass) mit ihrer maximalen Bandbreite beginnen und in der Gegenrichtung sukzessive immer schmalbandiger werden, in zwei gleichwertige Hälften geteilt wird. Im Folgenden soll die daraus abgeleitete Technik der Ermittlung des Sprachverstehens bei einem bestimmten AI durch das Halbierungsverfahren genauer erläutert werden.

Zunächst beginnt man mit den SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen (Tab. 5 und Abb. 6) und bestimmt anhand der Diskriminationsfunktionen das maximale Sprachverstehen für jede Filterbedingung. Die SNRs wurden vorher bei der Messung des Sprachverstehens so variiert, dass die Diskriminationsfunktionen ihr Maximum auch erreichen. Mit den Maximalwerten und zugehörigen Filtergrenzfrequenzen werden in einem zweiten Schritt die am besten passende logistische oder Gompertz-Funktion als Diskriminationsfunktion in Abhängigkeit der Filtergrenzfrequenzen getrennt für Hochpass- und Tiefpassfilterung berechnet und grafisch aufgetragen (SV_{TP} oder SV_{HP}). Das maximale Sprachverstehen an den Endwerten der Grenzfrequenzen entspricht dem der Breitbandfilterung ohne wirksame Störgeräuschmaskierung. Diesem maximal möglichen Sprachverstehen für einen bestimmten Sprecher und ein bestimmtes Wortmaterial kann die vollständige Sprachinformationsmenge, also ein AI von 1 zugeordnet werden. Beim Schnittpunkt der komplementären Graphen für Hoch- und Tiefpassfilterung liegt in dem darüber liegenden Frequenzband exakt so viel Sprachinformation wie in dem darunter. Der Höhe des Sprachverstehens an diesem Punkt kann also ein AI von 0,5 zugeordnet werden (Abb. 4).

Für das so ermittelte Sprachverstehen bei $AI = 0,5$ wird nun aus der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktion der Breitbandbedingung das dafür notwendige SNR ($AI = 0,5$) ermittelt und die damit resultierenden Sprachverstehenswerte für alle Filtergrenzfrequenzen bestimmt, um mit diesen Wertepaaren neue grenzfrequenzabhängige Diskriminationsfunktionen für die Hoch- und Tiefpassfilterung und dem zugrundeliegenden SNR zu berechnen. Beide neuen Diskriminationsfunktionen basieren jetzt auf einem Gesamtanteil der ursprünglichen Sprachinformation von 50 % und haben maximal das Sprachverstehen des vorherigen Kreuzungspunktes. Der neue Kreuzungspunkt halbiert nun wiederum den zugrundeliegenden Sprachinformationsanteil und markiert das Sprachverstehen für einen AI von 0,25. Dasselbe Verfahren kann noch weitere Male wiederholt werden. Der nächste Kreuzungspunkt stellt dann den AI von 0,125 dar usw. Eine schematische Darstellung des Verfahrens liefert Abbildung 4.

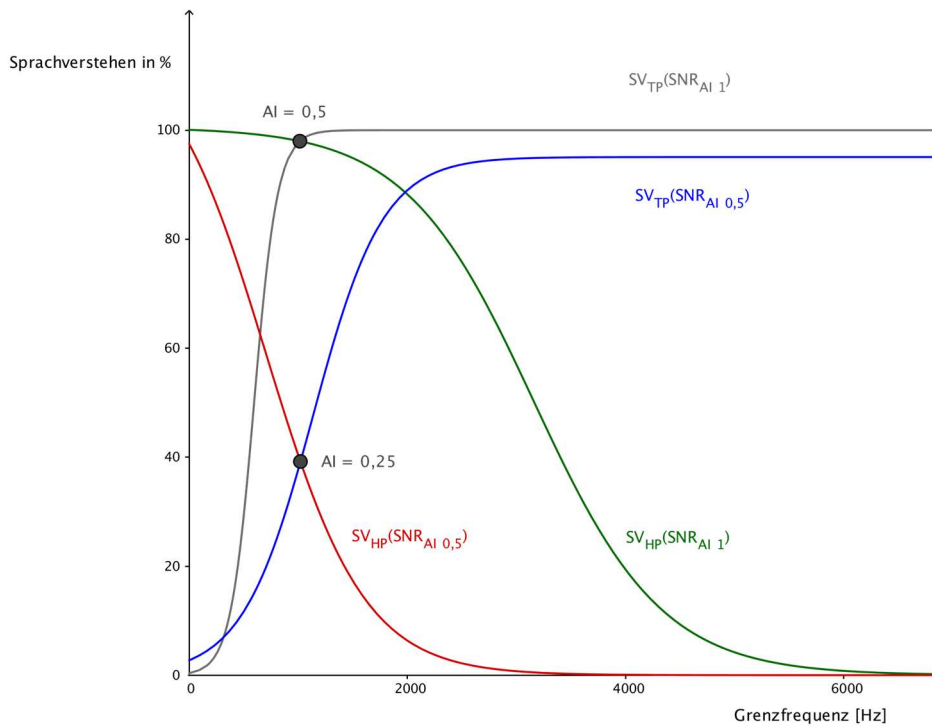


Abbildung 4: Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen für hoch- und tiefpassgefilterte Sprache (SV_{TP} oder SV_{HP}) für das Halfing-Verfahren. $SV_{TP}(SNR_{AI\ 1})$: grau, $SV_{HP}(SNR_{AI\ 1})$: grün, $SV_{TP}(SNR_{AI\ 0,5})$: blau, $SV_{HP}(SNR_{AI\ 0,5})$: rot).

Um weitere Wertepaare für die Transferfunktion von AI zu SV zu ermitteln, wendet man die Technik des „Complementing“ an. Diese basiert auf der Annahme, dass akustische Information in komplementären Frequenzbändern additiv ist.

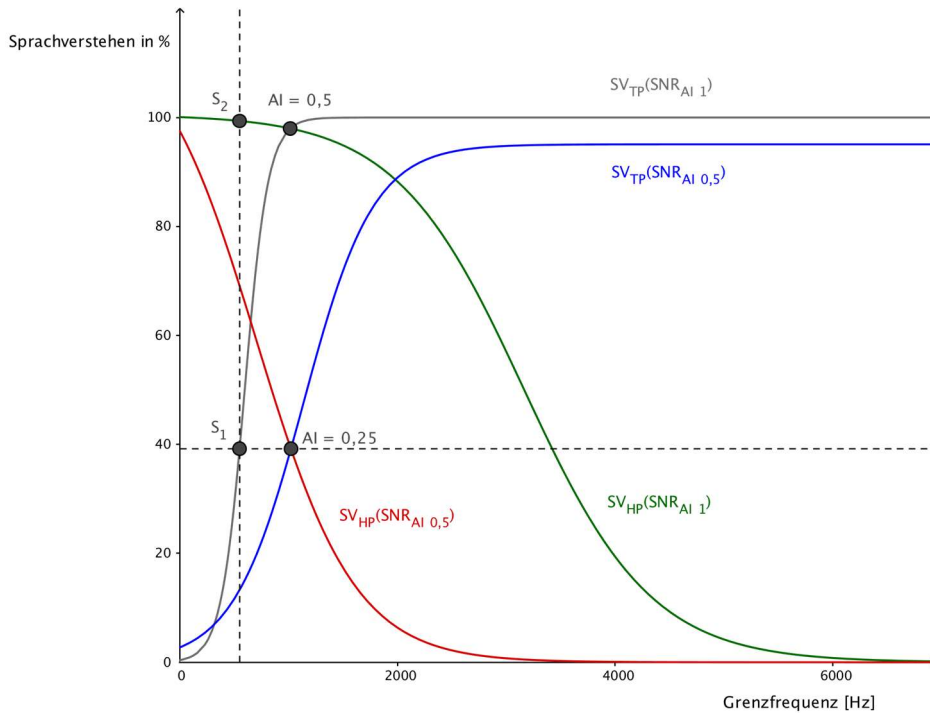


Abbildung 5: Schema zum Complementing-Verfahren (exakte Erläuterung siehe Text). Kuvenfarben wie in Abb. 4.

Die Summe des Sprachverstehens aus einem beliebigen Punkt S_1 auf der Kurve des Sprachverstehens der tiefpassgefilterten Sprache und eines komplementären Punktes S_2 bei derselben Grenzfrequenz auf der Kurve der hochpassgefilterten Sprache ergibt einen größeren Wert als das Sprachverstehen bei gleichzeitigem Abspielen aller Frequenzen (Breitbandbedingung). Sprachverstehen ist demnach kein additiver Index (French und Steinberg 1946). Die relative Menge der Sprachinformation in allen unterschiedlichen Frequenzbändern ist dagegen additiv und ergibt bei Summation über die gesamte Bandbreite aller Sprachfrequenzen als Artikulationsindex die Summe 1 (100 %). Einem Sprachverstehen ist immer eindeutig ein AI zugeordnet. Bei der Frequenz für Hoch- oder Tiefpassfilterung auf Höhe eines bekannten AI, beispielsweise am Punkt S_1 in Abbildung 5 für tiefpassgefilterte Sprache (graue Kurve) in Höhe des Sprachverstehens für $AI = 0,25$, kann dem Wert des Sprachverstehens auf der komplementären Hochpassfilterungsfunktion (Punkt S_2 , grüne Kurve) demnach ein AI von 0,75 zugeordnet werden. Nach diesem Komplementierungsverfahren ergeben sich ausreichend viele Wertepaare, um zusammen mit den Wertepaaren aus dem Halbierungsverfahren die Transferfunktion aufzustellen. Zusätzlich ist definiert, dass ein AI von 0 ein Sprachverstehen von 0 % und ein AI von 1 das für das

jeweilige Sprachmaterial maximale Sprachverstehen, bis zu einem Grenzwert von 100 %, zur Folge hat. An die ermittelten Wertepaare kann nun die Transferfunktion nach Gleichung 9 zwischen AI und dem Sprachverstehen (SV) angepasst werden.

2.4.2 Entwicklung der Band Importance Function (BIF)

Die BIF stellt den relativen Sprachinformationsanteil in einem Frequenzband und damit seine relative Wichtigkeit als Beitrag zum Sprachverstehen dar. Sie gibt den Zusammenhang zwischen AI und den Mittenfrequenzen von Frequenzbändern wieder, in die das akustische Sprachspektrum unterteilt wird oder die bei der Sprachübertragung verwendet werden.

Die Bestimmung der BIF gliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst werden für die verwendeten SNR frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen erstellt, in welchen das Sprachverstehen gegen die Grenzfrequenz der Bandfilterung aufgetragen ist. Über die Umkehrfunktion der Transferfunktion werden aus den Werten des Sprachverstehens nun die AI-Werte in Abhängigkeit der Grenzfrequenzen der verwendeten Frequenzbänder für jedes SNR berechnet. Im nächsten Schritt wird für jedes SNR die Summe der AI-Werte ermittelt und damit eine Normierung der AI-Werte für jedes SNR durchgeführt. Die normierten AI-Werte, die für jedes SNR die Summe 1 ergeben, werden dann für jede Grenzfrequenz über alle SNR gemittelt. Aus diesen Mittelwerten entstehen die grenzfrequenzabhängigen AI-Funktionen, aus denen im abschließenden Schritt die BIF für Frequenzbänder mit beliebiger Bandbreite ermittelt werden können. Dazu wird der Betrag der AI-Differenz zwischen der oberen und unteren Frequenzband-Grenzfrequenz gegen die Bandmittenfrequenz als BIF aufgetragen.

Aus der BIF kann nun die Wichtigkeit beliebiger Frequenzbänder abgelesen werden. Zum Vergleich mit den Angaben der BIF aus dem SII-Verfahren und der Literatur wird einerseits die BIF für Terzfrequenzbänder ermittelt. Andererseits werden auch die Grenzfrequenzen bzw. Bandbreiten der 20 Bänder gleicher Wichtigkeit, die jeweils 5 % zum Sprachverstehen beitragen, berechnet. Die Terzfrequenzbänder mit den Mittenfrequenzen von 100 – 8000 Hz werden nach DIN EN ISO 266:1997-08 Akustik-Normfrequenzen definiert (DIN EN ISO 266:1997-08).

2.4.3 Entwicklung der absoluten Transferfunktion

Zuletzt muss zwischen einer relativen und absoluten Transferfunktion (TF) unterschieden werden. Für die Berechnung der relativen TF wird das zur Messung verwendete SNR ohne Bezug zum Sprachverstehen verwendet. Einem AI von 1 kann damit bei vollständiger Hörbarkeit der gesamten Sprachinformation nur eine relative Verständlichkeit von 100 % zugeordnet werden. Mit der Entwicklung einer absoluten Transferfunktion ist die Vorhersage der tatsächlichen absoluten Verständlichkeit möglich. Dies ist insofern wichtig, da nicht jedes Sprachmaterial selbst bei vollständiger Hörbarkeit eine Verständlichkeit von 100 % besitzt. Zudem ist die Gesamtheit der hörbaren Sprachinformation sowohl von dem effektiv wirksamen Frequenzbereich der Sprache als auch von der effektiven Maskierung des Pegelbereichs mit Störgeräuschen abhängig. Gesprochene Sprache unterliegt sehr starken Pegelschwankungen. Erst wenn auch die Sprachspitzenpegel vollständig effektiv maskiert sind, wird keine Sprachinformation mehr übertragen. Für die Berechnung der absoluten Transferfunktion ist also die effektive perzeptuelle Maskierung und damit das SNR, bei dem die Verständlichkeit 0 % beträgt, entscheidend. Erst mit der absoluten Transferfunktion können die AI-Werte und die Verständlichkeitswerte in Beziehung gesetzt werden, um reale Testergebnisse vorhersagen zu können (DePaolis 1992, S. 52).

Die relative TF basiert auf dem SNR der Messung, die absolute TF dagegen auf der tatsächlichen perzeptiven Maskierung der Sprachsignale in Relation zur Sprachdynamik. Dazu wird zu den verwendeten SNR ein Korrekturfaktor ermittelt, der die Höhe des notwendigen Rauschpegels so an die Sprachdynamik anpasst, dass für ein effektives SNR von 0 dB nicht nur der mittlere Sprachpegel, sondern sogar die Sprachpegelspitzen gerade perzeptiv maskiert werden. Zur Unterscheidung von dem zur Messung verwendeten SNR, dessen Pegel sich auf die Pegelmittelwerte von Sprache und Störgeräusch beziehen, wird das korrigierte SNR als Differenz der Sprachpegelspitzenwerte (Speech Peaks) zum Rauschpegel (N) mit der Bezeichnung SP/N (effective-speech-peak-to-noise-ratio) angegeben:

$$SP/N = SNR + K. \quad (11)$$

Bei einem SP/N von 0 dB wird die Sprache gerade so stark maskiert, dass eine Verständlichkeit von 0 % entsteht.

Der AI eines Breitbandergebnisses ist dann nur vom SP/N abhängig und ergibt sich aus dem Anteil der Sprachdynamik, die durch das SP/N maskiert wird. Für die Sprachdynamik wird der Standardwert von 30 dB verwendet. Damit kann aus jedem SP/N der Breitbandmessung ein AI berechnet werden:

$$AI = (SP/N) / \text{Sprachdynamik bzw. } (SNR + K) / 30. \quad (12)$$

Für die absolute TF wird der Korrekturwert K durch ein iteratives Verfahren so ermittelt, dass die neuen AI Werte nach Gleichung 12 die kleinste quadratische Abweichung von denen der inversen relativen TF aufweisen, die den AI in Abhängigkeit der Sprachverständlichkeit beschreibt. Es werden zur Fehlerminimierung allerdings lediglich die Messwerte für ein Sprachverstehen zwischen 5 % und 95 % eingeschlossen (Sherbecoe und Studebaker 1990; Sherbecoe und Studebaker 2002; Studebaker und Sherbecoe 1991). Für K wird zunächst ein Schätzwert eingesetzt und die Differenz der damit resultierenden AI-Werte zu den AI-Werten der inversen relativen TF berechnet. Schließlich wird für das gegebene K der mittlere quadratische Fehler (RMS) aus allen Differenzen zwischen den AI aus der direkten Berechnung und aus der Berechnung mit der inversen Fitfunktion errechnet. Derjenige K Wert mit dem kleinsten RMS wird schließlich für die Berechnung der absoluten Transferfunktion verwendet (Studebaker und Sherbecoe 1991, S. 433; DePaolis 1992).

3 Ergebnis

3.1 Sprachverstehen

Tabelle 4 stellt das durchschnittlich erreichte Sprachverstehen für jede dargebotene Hörbedingung in Prozent dar. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass das Sprachverstehen für jede Filterbedingung umso besser wurde, je größer der SNR wurde, also je lauter das Sprachsignal im Vergleich zum Störgeräusch war. Andererseits steigerte sich das Sprachverstehen für jedes SNR deutlich, wenn die Grenzfrequenz der Hochpässe verringert und die der Tiefpässe erhöht und damit die jeweilige Bandbreite der präsentierten Sprachsignale erhöht wurde. Generell wurde das höchste Sprachverstehen in der Breitbandbedingung erreicht, während in den schmalsten Hoch- und Tiefpassfilterungen am wenigsten zu verstehen war. Unterhalb der Grenzfrequenz von 355 Hz war bei der tiefpassgefilterten Sprache nahezu keine Sprachinformation mehr enthalten. Hier liegt zum größten Teil nur noch die Grundfrequenz der Stimme, die keine Sprachinformation überträgt. Ab einem SNR von -13 dB konnte aufgrund der Schwierigkeit der Bedingungen in allen Frequenzbändern kein Sprachinhalt mehr verstanden werden.

3.2 Diskriminationsfunktionen

Nach der Methode von French und Steinberg wurden aus den Daten zunächst die SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen geplottet, welche die Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit des SNR darstellen. Die Plots der einzelnen Graphen sind im Anhang aufgelistet (Anhang 8.4). Die Diskriminationsfunktionen sind getrennt für die Tiefpass- und die Hochpassfilterung in Abbildung 6 dargestellt, die Parameter der Diskriminationsfunktionen in Tabelle 5.

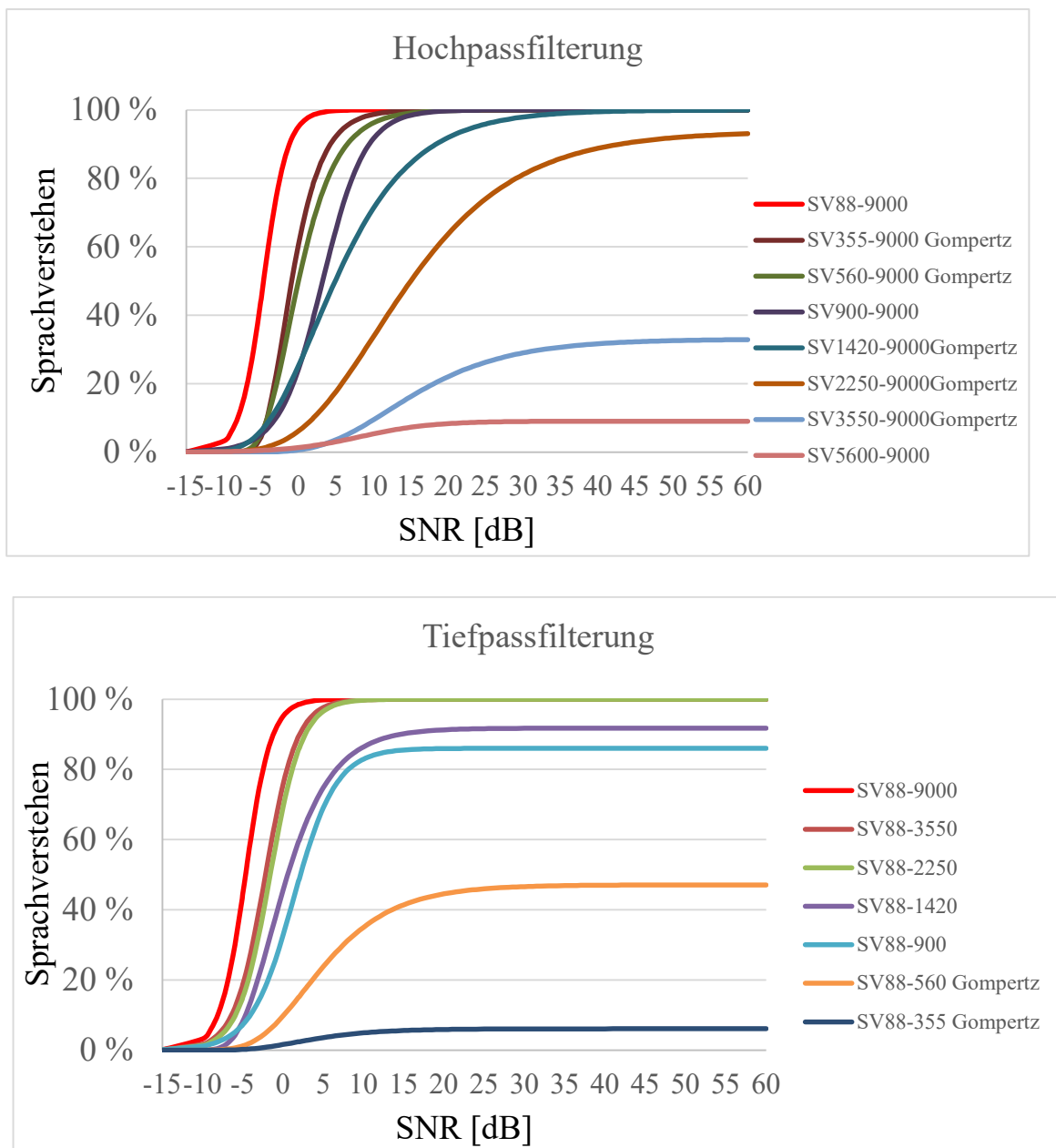


Abbildung 6: Vergleichende Darstellung der Diskriminationsfunktionen bei Hochpass- (oben) und Tiefpassfilterung (unten). Diskriminationsfunktionen, die durch die Gompertz-Funktion dargestellt werden, sind in der Legende extra bezeichnet.

Wie unter 2.4.1 bereits näher erläutert, wurde als Modellfunktion der Sprachverständlichkeit entweder eine logistische Funktion oder eine Wachstumsfunktion nach Gompertz verwendet. Aus Tabelle 5 wird ersichtlich, dass sich sowohl bei der Tiefpass-, als auch bei der Hochpassfilterung die Steigung und das maximale Sprachverstehen mit abnehmender Filterbandbreite verringern, wenn ein Schwellenwert der Bandbreite unterschritten wird. Die Sprachverständlichkeit steigt schon bei geringer Verbesserung des SNR stark an. Einige Diskriminationsfunktionen erreichen erst im SNR-Bereich um 60 dB ihr Maximum.

Bandbreite [Hz]	Maximales SV [%]	SRT [dB]	Steigung m [%/dB]	b	R	Typ
88-9000	100	-4,669	15,9	1,571	0,998	Logistisch
88-355	6,102	1,552	0,3	5,444	0,773	Gompertz
88-560	47,105	2,706	2,0	5,977	0,993	Gompertz
88-900	86,012	1,278	8,1	2,641	0,997	Logistisch
88-1420	91,754	-1,451	5,7	4,055	0,996	Logistisch
88-2250	100	-1,603	12,7	1,972	0,9985	Logistisch
88-3550	100	-2,188	13,0	1,925	0,9984	Logistisch
355-9000	100	-1,909	9,1	2,740	0,9969	Gompertz
560-9000	100	-1,275	7,2	3,460	0,9936	Gompertz
900-9000	100	3,218	8,8	2,837	0,9951	Logistisch
1420-9000	99,981	2,266	3,5	7,142	0,989	Gompertz
2250-9000	93,789	10,224	2,3	10,240	0,9837	Gompertz
3550-9000	33,056	11,957	0,9	8,816	0,8871	Gompertz
5600-9000	9,098	8,219	0,5	4,796	0,6596	Logistisch

Tabelle 5: Frequenzgrenzwerte der Breitband-, Tiefpass- und Hochpassfilterung sowie zugehörige Funktionsparameter und Typ der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen. Die Wahl zwischen einer logistischen oder Gompertz-Funktion erfolgte entweder nach dem größeren R oder bei (annähernder) Gleichheit nach optischer Bewertung der Anpassung über alle SNR-Bereiche.

Um die Datenpunkte für die relative Transferfunktion ermitteln zu können, wurden im nächsten Schritt frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen erstellt, in denen das Sprachverstehen gegen die Filtergrenzfrequenzen aufgetragen wurde (siehe Abb. 7). Es wurde jeweils der Funktionstyp verwendet, der sich am besten an die Datenpunkte anpassen ließ.

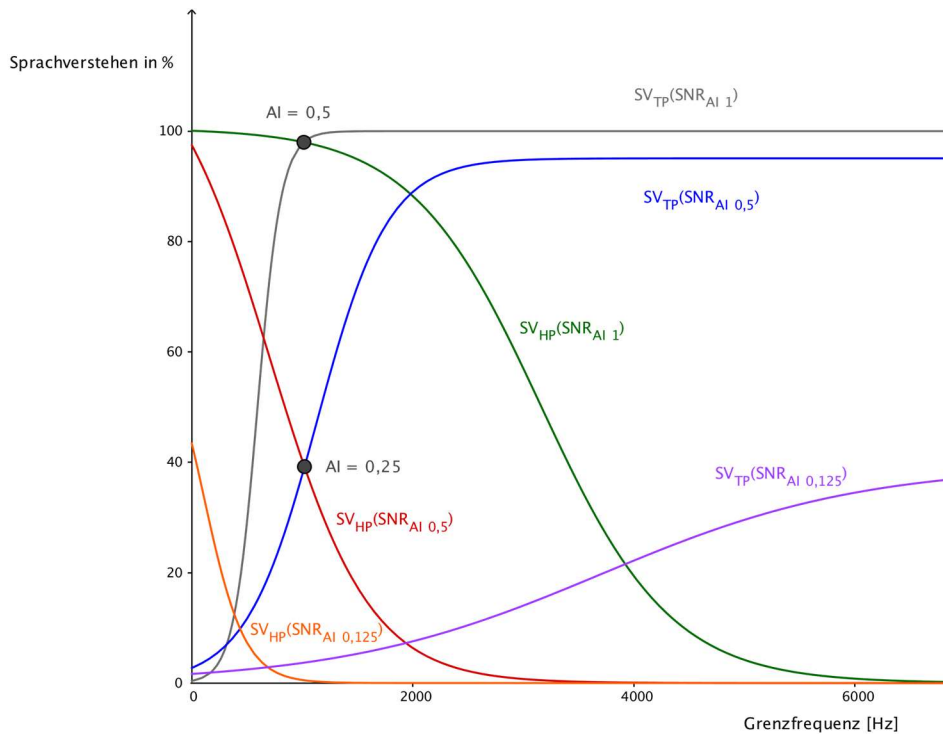


Abbildung 7: Ausgewählte Darstellung einiger frequenzabhängiger Diskriminationsfunktionen. Das Sprachverstehen ist in Abhängigkeit der Grenzfrequenz aufgetragen. Genauere Erläuterung siehe Abschnitt 2.4.1.1 Halving und Complementing mit Abb. 4 und 5.

Es ist zu erkennen, dass das Sprachverstehen für die hochpassgefilterten Hörbedingungen zu den hohen Grenzfrequenzen hin (schmalbandigere Filterung) rasch abfällt, da das hörbare Frequenzband hier immer geringer wird. Genauso verhält es sich mit den Tiefpassfilterungen. Sind nur schmale Frequenzbänder der niedrigen Frequenzen hörbar, geht das Sprachverstehen gegen null. Je breitbandiger die Sprache wird, also je mehr hohe Frequenzen hinzukommen, desto mehr steigt das Sprachverstehen an (vgl. Abb. 7).

An den Schnittpunkten der komplementären Hoch- und Tiefpassgraphen teilt sich die zur Verfügung stehende Sprachinformation genau in zwei gleichgroße Hälften. Sowohl die Frequenzen oberhalb als auch diese unterhalb des Schnittpunktes tragen gleich viel zum Verstehen bei. Dieser Kreuzungspunkt kann für jedes beliebige SNR bestimmt werden.

Durch das im Methodenteil beschriebene Vorgehen (2.4.1.1 Halving und Complementing) wurden aus den SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen (Tab. 5) die für die Transferfunktion nötigen Datenpunkte ermittelt (siehe Tab. 6).

Frequenz (Hz)	Sprachverstehen (%)	AI
	0	0
1082	6,06	0,125
937	6,62	0,15625
970	43,25	0,25
961	51,36	0,3125
1700	98,45	0,5
3188	99,21	0,675
580	100	0,675
3351	99,21	0,75
531	100	0,75
4825	99,21	0,8125
358	100	0,8125
4895	99,21	0,875
356	100	0,875
	100	1

Tabelle 6: Wertepaare des Sprachverstehens und des Artikulationsindex aus dem Halving- und Complementing-Verfahren zum Erstellen der Transferfunktion. Die Wertepaare SV / AI von 0 % / 0 AI und 100 % / 1 AI ergeben sich aus der Definition des AI und werden zur Ergänzung der Funktionswerte hinzugefügt.

3.3 Relative Transferfunktion

Die relative Transferfunktion wurde durch das im Methodenteil erläuterte Vorgehen hergeleitet und mit den 15 entstandenen Datenpunkte mit unterschiedlichen Fitfunktionen berechnet (Abb. 8).

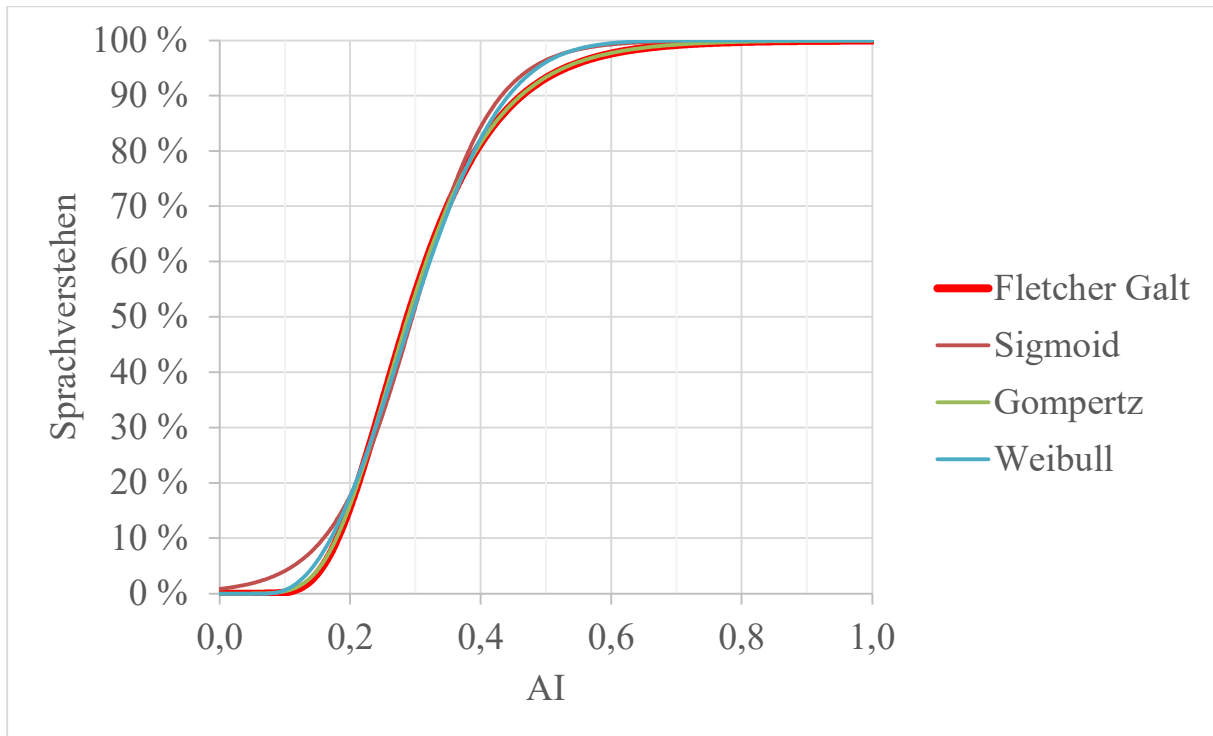


Abbildung 8: Vergleichende Darstellung verschiedener sigmoid verlaufender Fitfunktionen zur Berechnung der relativen Transferfunktion.

	Fletcher Galt	Sigmoid	Gompertz	Weibull
Regressionsfunktion	$(1 - 10^{-\frac{AI}{Q}})^N$	$\frac{a}{1 + e^{-\frac{SNR-SRT}{b}}}$	$ae^{-e^{-\frac{SNR-SNR_0}{b}}}$	$ae^{-\left(\frac{SNR-SNR_0+b\ln(2)^{\frac{1}{c}}}{b}\right)^c}$
R	0,9954	0,9951	0,9954	0,9958

Tabelle 7: Regressionsquotienten verschiedener sigmoid verlaufender relativer Transferfunktionen im Vergleich.

Bei ähnlichen Regressionsquotienten der vier Fitfunktionen wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit relevanten Literaturangaben die Fitfunktion nach Fletcher und Galt als Modell zur Berechnung der relativen Transferfunktion ausgewählt (Abb. 9).

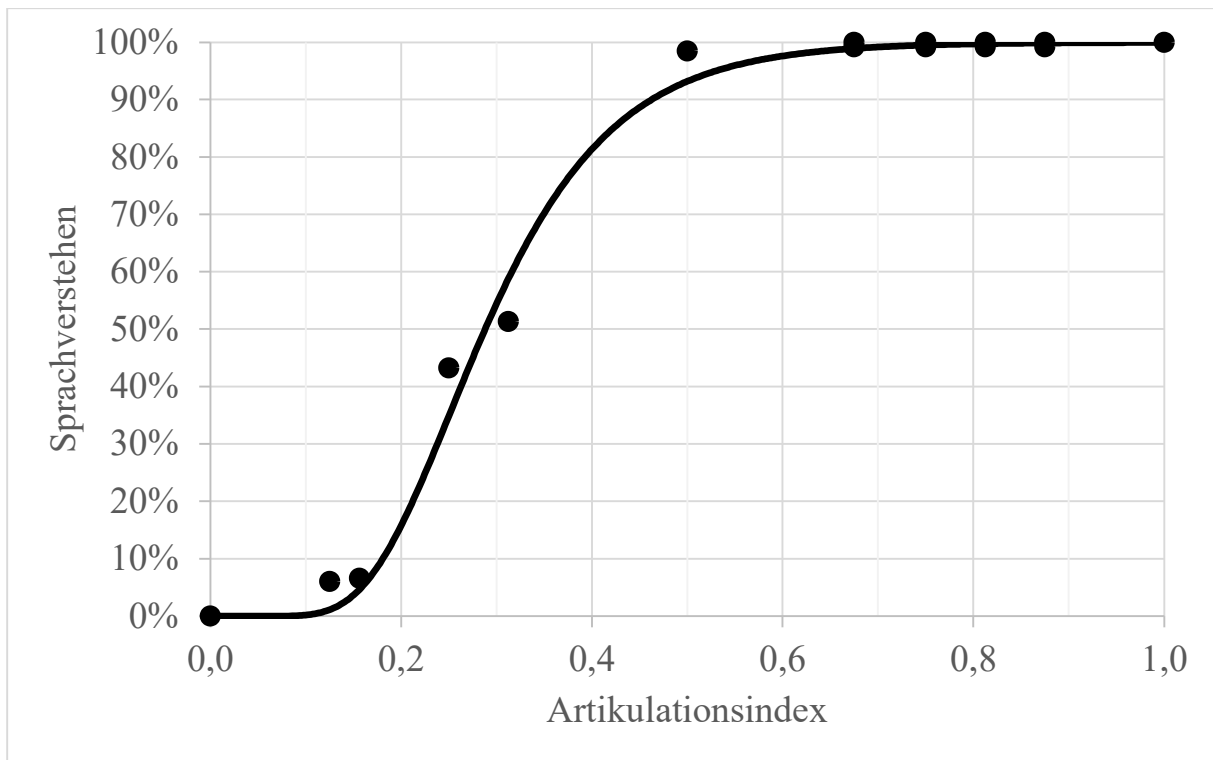


Abbildung 9: Relative Transferfunktion für das Sprachmaterial des Göttinger Satztest mit der Fitfunktion nach Fletcher und Galt.

Q	0,2155
N	14,6882
R	0,9954

Tabelle 8: Funktionsparameter der relativen Transferfunktion für die Fletcher-Galt-Funktion.

Als nächstes soll ermittelt werden, in welchem Maße die einzelnen Frequenzbänder zum Gesamtverstehen beitragen. Um im nächsten Schritt eine Frequenzband-Wichtigkeitsfunktion (Band-Importance-Function, BIF) erstellen zu können, wird für die weitere Berechnung die inverse Transferfunktion benötigt. Die inverse relative Transferfunktion ist in Abbildung 10 dargestellt, deren Funktionsparameter in Tabelle 9.

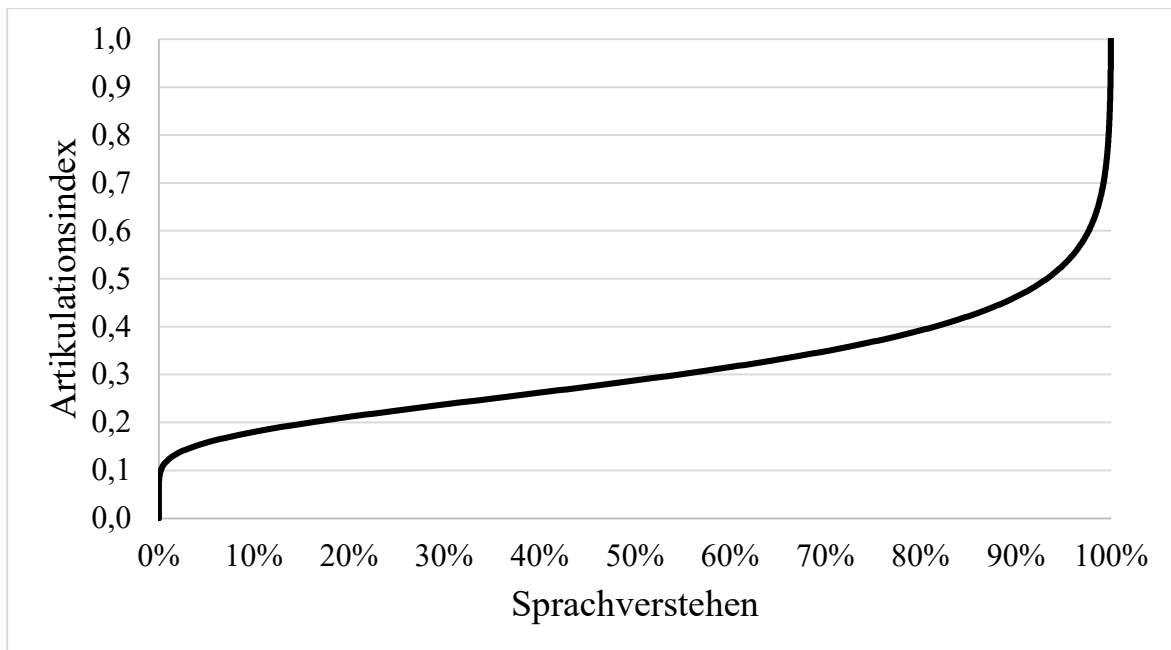


Abbildung 10: Inverse relative Transferfunktion zwischen Sprachverstehen und AI.

Q	0,2155
N	14,6882
R	1

Tabelle 9: Funktionsparameter der inversen (Fletcher-Galt-)Transferfunktion.

Im nächsten Schritt wurde zur Bestimmung der Band Importance Function nun jede Frequenzband-Mittelfrequenz mit dem zugehörigen Sprachverstehen mit Hilfe der inversen Transferfunktion aus Gleichung 10 einem spezifischen AI zugeordnet.

3.4 Band Importance Function (BIF)

Die Band Importance Function ordnet jeder Frequenzband-Mittenfrequenz einen AI zu. Die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren erfolgt für jedes Filterband durch Mittelung und Normierung der SNR-spezifischen normierten AI-Werte. Da sich das Sprachverstehen in den unterschiedlichen Frequenzbändern über einen unterschiedlichen SNR-Bereich hinweg verändert und sein Maximum teilweise schon bei SNRs zwischen 0 bis 5 dB, aber auch erst zwischen 50 bis 60 dB erreicht (Tab. 4 und Abb. 6), stellte sich die Frage, welche SNR-Spanne für die Mittelung der Gewichtungsfaktoren verwendet werden sollte. Bei der Berücksichtigung der gesamten Änderungsspannbreite über alle Frequenzbänder bis zu einem SNR von 60 dB, bei dem auch im letzten Frequenzband das maximale Sprachverstehen erreicht wurde, werden die perzeptiv einfachen sehr großen SNR-Bereiche überproportional stark gegenüber den schwierigeren kleinen SNR-Bereichen unter 0 dB gewichtet. Dies könnte zu einer Verzerrung des Ergebnisses zugunsten einfacher Hörsituationen mit wenig Störgeräusch führen.

Es wurde für die Referenz-BIF des GÖSA deshalb der SNR-Bereich gewählt, innerhalb dessen die Breitbandergebnisse von 0 % auf 100 % ansteigen, also von -9 dB bis +11 dB. Dabei wurde von der alltäglichen Gesprächssituation ausgegangen, bei der Sprache in der Regel breitbandig, also ungefiltert zu hören ist und Hörbarkeitseinschränkungen typischerweise durch Störgeräuschmaskierungen entstehen. In Abbildung 11 ist die Band Importance Function kumulativ dargestellt. Anhand der Steilheit der Kurve lässt sich die Wichtigkeit der jeweiligen Frequenz für das Sprachverstehen ablesen – je steiler, desto wichtiger.

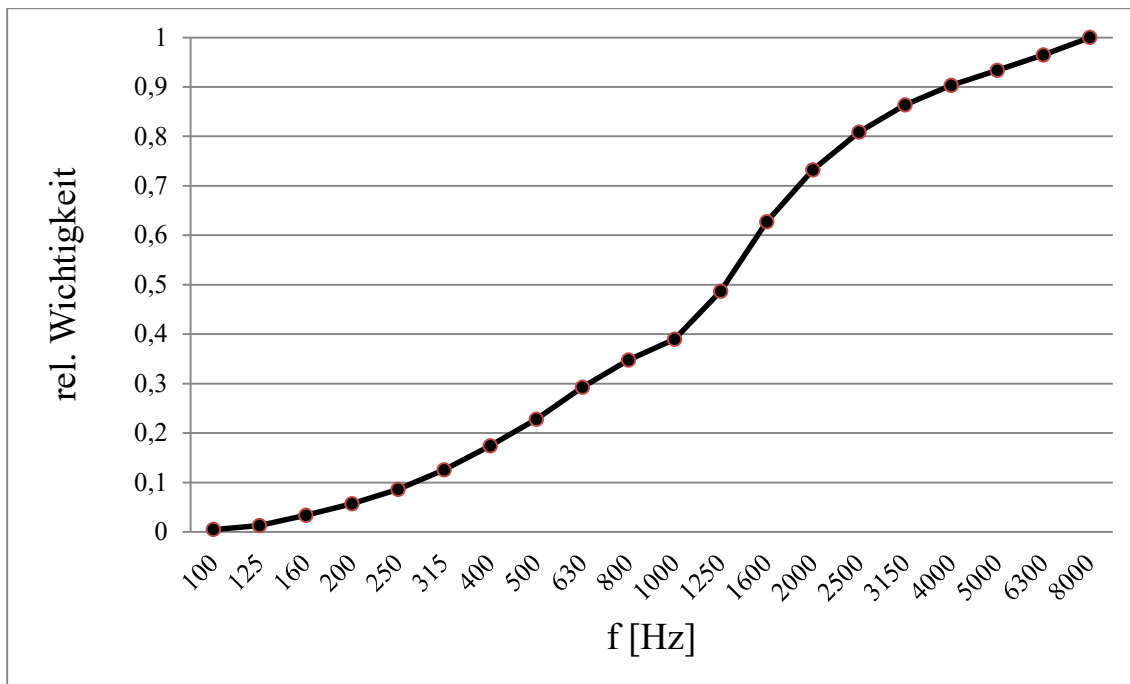


Abbildung 11: Kumulative Band Importance Function für den Göttinger Satztest je Terzbandmittenfrequenz, ermittelt aus dem SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.

Abbildung 12 zeigt die relative Bandwichtigkeit als AI-Anteil in Prozent für jede Terzband-Mittenfrequenz zwischen 100 und 8000 Hz für den SNR-Bereich von -9 dB bis +11 dB. Die höchste relative Wichtigkeit befindet sich im Frequenzbereich um 1600 Hz.

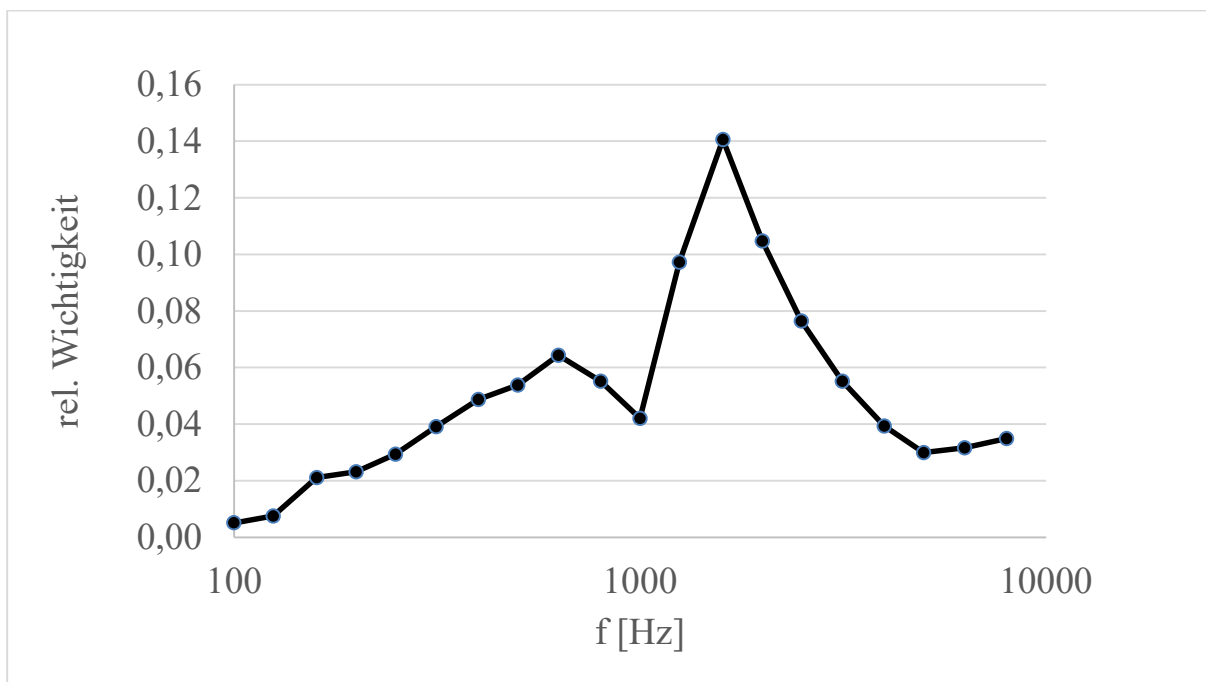


Abbildung 12: Referenz-Band Importance Function für den Göttinger Satztest, aufgetragen gegen die Mittenfrequenz jedes Terzbandes, ermittelt aus dem SNR-Bereich von -9 bis +11 dB, bei dem das Sprachverstehen unter Breitbandbedingung von 0 – 100 % variiert.

Die BIF für andere SNR-Intervalle sind im Abschnitt 4.2.3.1 in Abbildung 17 dargestellt. Sie weichen in ihrem Verlauf zum Teil erheblich von der Referenzfunktion des GÖSA in Abbildung 12 ab und zeigen, dass die BIF eine deutliche SNR-Abhängigkeit aufweisen.

Tabelle 10 demonstriert die Wichtigkeit jedes Terzbandes als AI-Anteil in Prozent (Terzbandfrequenz nach DIN EN ISO 266:1997-08 Akustik – Normfrequenzen).

Terzband			Wichtigkeit pro Band in %	Wichtigkeit kumulativ in %
f_u [Hz]	f_o [Hz]	f_{Mitte} [Hz]		
88	112	100	0,513	0,513
112	142	125	0,759	1,271
142	180	160	2,109	3,381
180	225	200	2,317	5,698
225	280	250	2,942	8,639
280	355	315	3,915	12,554
355	450	400	4,872	17,426
450	560	500	5,382	22,808
560	710	630	6,434	29,242
710	900	800	5,515	34,758
900	1120	1000	4,211	38,969
1120	1420	1250	9,724	48,693
1420	1800	1600	14,066	62,759
1800	2250	2000	10,475	73,234
2250	2800	2500	7,649	80,883
2800	3550	3150	5,520	86,403
3550	4500	4000	3,936	90,339
4500	5600	5000	3,000	93,339
5600	7100	6300	3,163	96,502
7100	9000	8000	3,498	100,000

Tabelle 10: Nicht kumulative und kumulative Bandwichtigkeit als AI-Anteile in Prozent je Terzband für den SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.

3.5 20 Bänder gleicher Wichtigkeit

Mit der kumulativen Zunahme des AI mit zunehmender Bandbreite (Tab. 10), der kumulativen BIF, können auch die in der Literatur und im SII-Verfahren angegebenen 20 Frequenzbänder mit gleicher Wichtigkeit für das Sprachmaterial des GÖSA berechnet werden. Diese tragen dann jeweils 5 %-Punkte zur Gesamtsprachinformation bei (Tab. 12).

Hierfür wurde aus den Wertepaaren der oberen Terzfrequenzgrenzen (f_{og}) und dem kumulativen AI-Anteil aus Tabelle 10 für den Verlauf der kumulativen Band Importance Function ein geeigneter Funktionsterm ermittelt. Neben einer möglichst genauen Anpassung an die Datenpunkte sollte die gesuchte Funktion auch die maximale Sprachinformationsmenge von 100 % innerhalb des Frequenzbereichs der Breitbandfilterung erreichen. Mit Hilfe dessen Umkehrfunktion konnten im Anschluss die Grenzfrequenzen für die 20 Bänder mit jeweils 5 % Bandwichtigkeit errechnet werden.

Der Verlauf der gesuchten frequenzabhängigen kumulativen BIF wurde unter Berücksichtigung der oben genannten Bedingungen am besten durch eine Sigmoidale Funktion nach Hill mit drei Parametern beschrieben:

Hill – Funktion
$$AI(f_{og}) = \frac{af_{og}^b}{c^b + f_{og}^b} \quad (13)$$

Aus deren Umkehrfunktion können die Frequenzgrenzen für beliebige AI-Anteile (> 0) berechnet werden:

Inverse Hill – Funktion
$$f(AI) = \left(\frac{c^b}{\frac{a}{AI} - 1} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (14)$$

a	1,0612
b	1,5275
c	1427,1589
R	0,998

Tabelle 11: Funktionsparameter der kumulativen Band Importance Function.

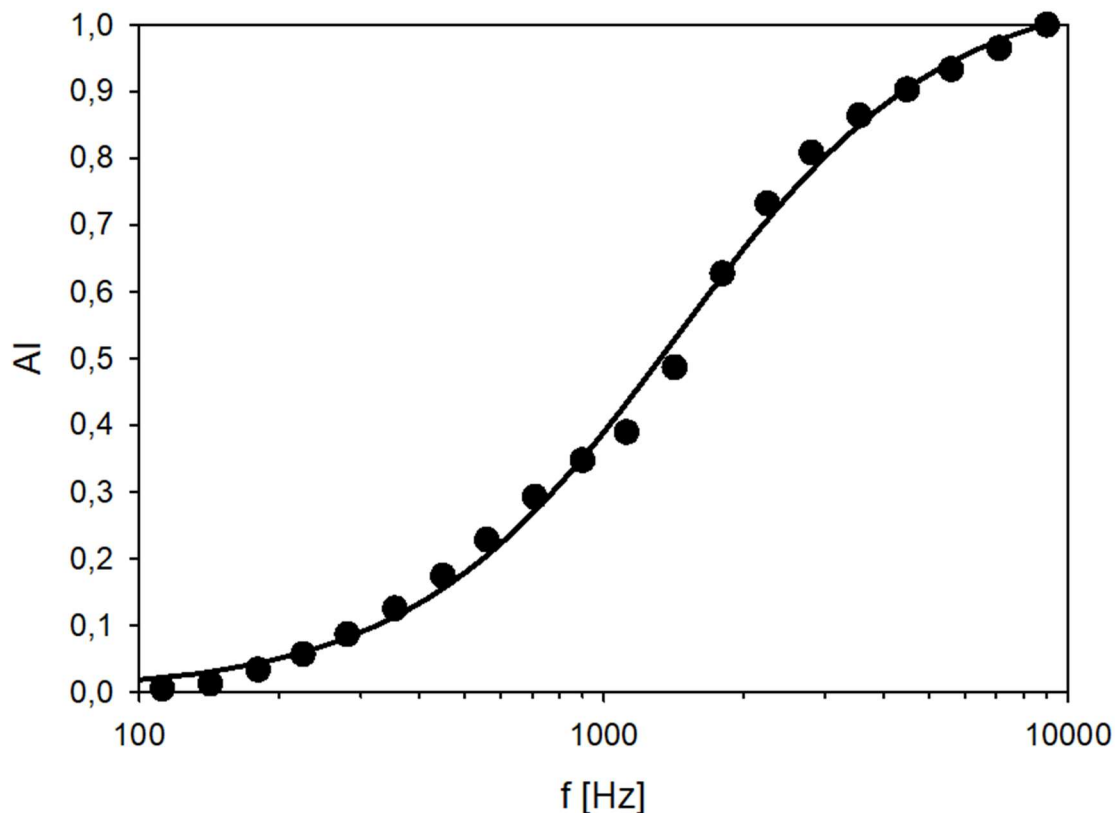


Abbildung 13: Kumulative Band Importance Function für den Göttinger Satztest je Terzbandmittenfrequenz, ermittelt aus dem SNR-Bereich von -9 bis +11 dB.

Der Startwert für die Berechnung der Bandbreite der 20 Frequenzbänder ist die untere Filtergrenze der Breitbandbedingung von 88 Hz. Die weiteren unteren (f_u) und oberen Frequenzgrenzen (f_o) nach Gleichung 14, sowie die resultierenden Bandbreiten der Frequenzbänder, die jeweils 0,05 AI beinhalten, sind in Tabelle 12 aufgeführt. Bis zum siebten Band ($f_o = 897$ Hz) bleibt die Bandbreite etwa konstant zwischen 110 - 120 Hz und steigt dann mit zunehmender Frequenz stetig und nichtlinear bis auf rund 3000 Hz im höchsten Frequenzband an.

Band-Nr.	AI	f_u [Hz]	f_o [Hz]	Bandbreite [Hz]
1	0,05	88	199	111
2	0,1	199	324	125
3	0,15	324	438	114
4	0,2	438	549	111
5	0,25	549	660	112
6	0,3	660	776	115
7	0,35	776	897	121
8	0,4	897	1027	130
9	0,45	1027	1168	141
10	0,5	1168	1323	155
11	0,55	1323	1497	174
12	0,6	1497	1695	198
13	0,65	1695	1926	231
14	0,7	1926	2201	275
15	0,75	2201	2538	338
16	0,8	2538	2970	431
17	0,85	2970	3551	581
18	0,9	3551	4400	849
19	0,95	4400	5813	1413
20	1	5813	8887	3074

Tabelle 12: 20 Frequenzbänder mit gleicher Wichtigkeit (jeweils 5 % AI).

3.6 Absolute Transferfunktion

Um die absolute Transferfunktion zu ermitteln wurde wie im Abschnitt 2.4.3 beschrieben nach der Methode von Studebaker et al. ein Korrekturwert K bestimmt, für den der mittlere quadratische Fehler (RMS) der Sprachverständlichkeitsberechnung im Vergleich zu den Messwerten am kleinsten wird. Abbildung 14 sowie Tabelle 13 veranschaulichen den RMS für jeden berechneten K Wert.

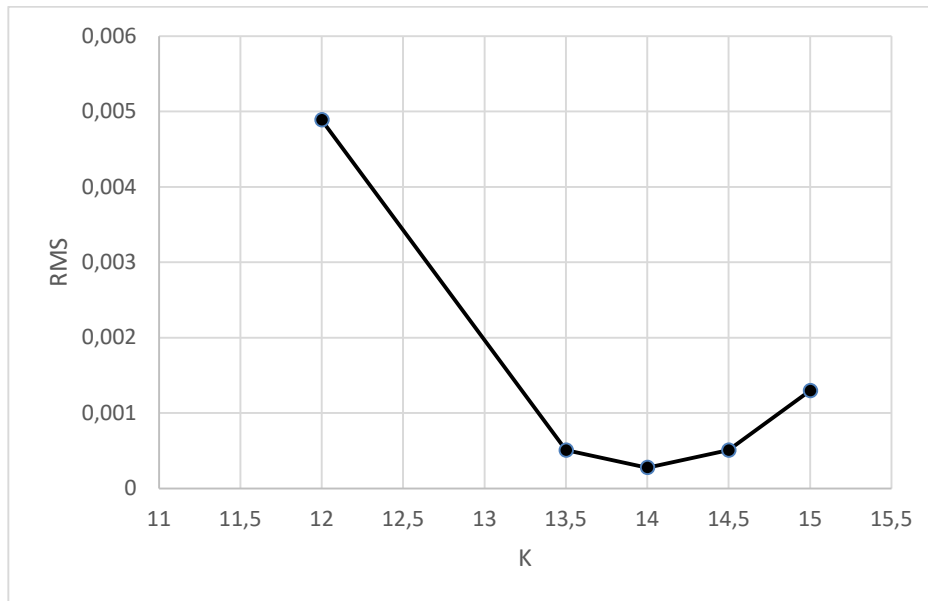


Abbildung 14: RMS-Abweichung je Korrekturwert K.

K	RMS
12	0,00488737
13,5	0,00050955
14	0,00027778
14,5	0,00050955
15	0,00129617

Tabelle 13: Korrekturfaktor K und RMS-Abweichung.

Es ergibt sich ein K von 14,0. Das gemessene Sprachverstehen wird schließlich gegen die korrigierten AI Werte aufgetragen, sodass die absolute Transferfunktion entsteht.

Es ergeben sich für die absolute Transferfunktion nach Fletcher und Galt folgende Funktionsparameter Q und N:

Q	0,1826
N	27,3797
R	1,00

Tabelle 14: Funktionsparameter der absoluten Transferfunktion.

Abbildung 15 gibt die absolute Transferfunktion wieder.

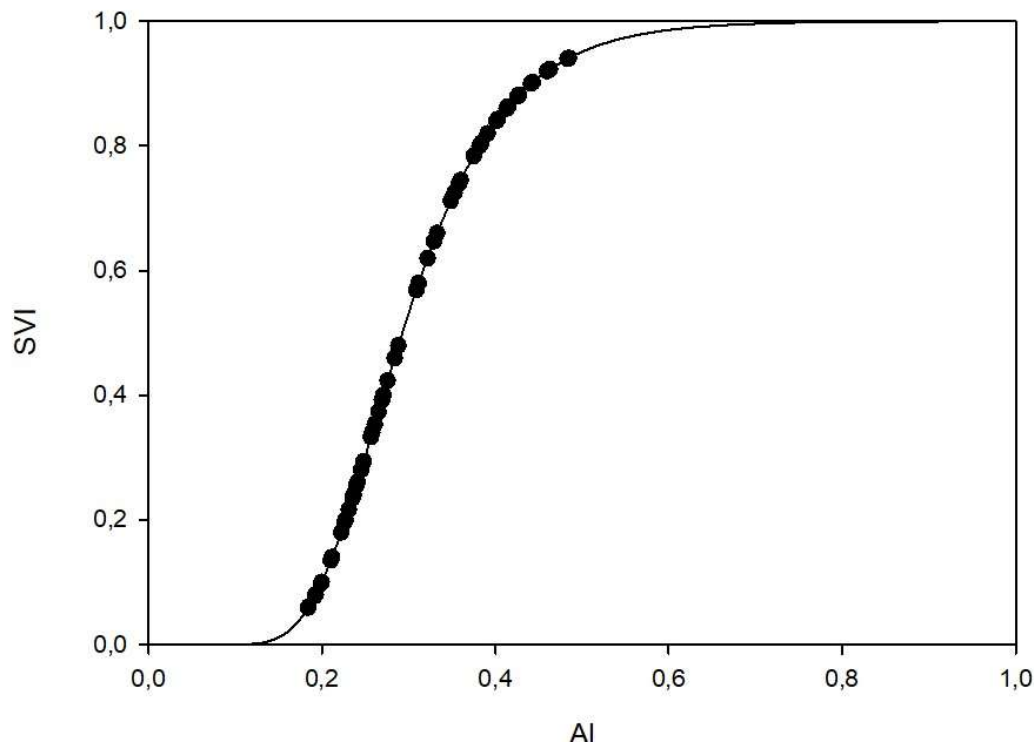


Abbildung 15: Absolute Transferfunktion für den Göttinger Satztest für Normalhörende. Die Schwelle des Sprachverstehens (AI für 50 % Verstehen) liegt bei einem AI von 0,293.

Mittels der absoluten Transferfunktion kann nun für Normalhörende die AI-abhängige Sprachverständlichkeit für den Göttinger Satztest oder näherungsweise anderer deutschsprachiger Satztests mit sinnvollen Sätzen der Alltagssprache im stationären Rauschen vorhergesagt werden.

4 Diskussion

Mit dieser Studie wurde erstmals eine Sprachinformationsverteilungsfunktion (Band Importance Function) für einen deutschsprachigen Satztest entwickelt. Bisher war diese nur für englisches Sprachmaterial zur Verfügung gestanden. Es war anzunehmen, dass die Frequenzverteilung der Sprachinformation in der deutschen Sprache und somit auch der Informationsgehalt in jeder Frequenz von der der englischen Sprache abweichen. Diese Studie wurde gezielt mit dem Sprachmaterial der Göttinger Satztest durchgeführt, der wegen der guten Repräsentation der alltäglichen sprachlichen Kommunikation und der gleichmäßigen Schwierigkeitsverteilung der einzelnen Testlisten in der klinischen Sprachaudiometrie häufig verwendet wird. Auf Grundlage der hier ermittelten BIF kann nun der AI oder SII für Testbedingungen im stationären Störgeräusch berechnet werden und mit der ebenfalls in dieser Studie entwickelten absoluten Transferfunktion das dazugehörige Sprachverstehen des Göttinger Satztests in Abhängigkeit des AI unmittelbar für Normalhörende vorhergesagt werden.

4.1 Diskussion der Methoden

4.1.1 Probanden

An der vorliegenden Studie nahmen 71 deutschsprachige Studenten teil, die den Einschlusskriterien entsprachen. Durch das Heranziehen normalhörender, junger und intellektuell vergleichbarer Versuchspersonen entstand ein sehr homogenes Probandenkollektiv. Die hohe Anzahl an Versuchsteilnehmern ermöglichte eine Vielzahl an Wiederholungen jeder Hörbedingung.

Dennoch traten Schwankungen in der Hörleistung auf. Diese ließen sich beispielsweise durch eine eingeschränkte Konzentrationsfähigkeit, Müdigkeit oder durch Abweichungen im geläufigen Wortschatz einzelner Testpersonen erklären.

Im Vergleich zu anderen Studien war das Probandenkollektiv groß. So hatte die vergleichbare Studie von Studebaker und Pavlovic 60 Probanden in ähnlichem Alter wie in dieser Studie (Studebaker et al. 1987), DePaolis nur 32 (DePaolis 1992). Diese waren jeweils englische Muttersprachler. In Anbetracht der großen Anzahl an Probanden kann für die vorliegende Studie von einer ausreichend hohen Validität und Reliabilität ausgegangen werden.

4.1.2 Sprachmaterial

Als Sprachmaterial wurde der deutschsprachige Göttinger Satztest verwendet. Mit seinen 20 Testlisten mit je zehn Sätzen bietet er eine ausreichende Anzahl von Testsätzen für mehrere aufeinander folgende Messungen, ohne dabei Sätze wiederholen zu müssen. Vorteilhaft ist, dass die Testsätze untereinander sprachlich sowie in Bezug auf die mittlere Gesamtverständlichkeit homogenisiert worden sind, sodass die resultierenden Testlisten eine vergleichbare Verständlichkeit aufweisen. Des Weiteren ist kein Üben erforderlich und die Messung kann in Ruhe oder im Störgeräusch durchgeführt werden. Durch die alltagsnahe Themenauswahl und einfache Syntax und Grammatik der Sätze ist der GÖSA besonders repräsentativ für die Alltagssprache.

Der Vorteil von Satztests ist, dass sie durch die große Anzahl an Testwörtern pro Messung eine hohe Messgenauigkeit bei geringer Messdauer erreichen (Thornton und Raffin 1978; Steffens 2006). Nachteilig ist hierbei jedoch, dass gut verstandene Sätze über lange Zeit im Gedächtnis bleiben und die Testlisten daher nicht beliebig oft wiederholt werden können. Dadurch ist die Verwendung des GÖSA für jede Testperson auf die 20 Testlisten limitiert.

Die Bekanntheit von Worten oder Sätzen beeinflusst das Verstehen. Man kann erkennen, dass das Modell der Lexical Neighbourhood auch in diesem Test zutrifft. Ein Beispiel ist der Satz „Was kostet ein Glas Selterswasser?“ (Liste 2, Satz 8). Das Wort „Selterswasser“ ist im Norden und in der Mitte Deutschlands gebräuchlich und wird in Ost- und Süd-Bayern nicht verwendet. Es fiel auf, dass nur Testpersonen mit Bezug zum nord- und mitteldeutschen Raum dieses Wort richtig wiedergegeben haben. Alle anderen antworteten „Wasser“ oder „Leitungswasser“. Die Antworten entsprachen damit zwar dem Kontext und der Aussage des Satzes, womit angenommen werden kann, dass die Satzaussage korrekt im Sinne des Begriffes „Sprachverstehen“ erfasst wurde. Auch kann für die normalhörenden Probanden eine vollständige Sprachverständlichkeit für das Wort „Selterswasser“ angenommen werden. Das vermutlich unbekannte Wort „Selterswasser“ wurde dennoch auf den bekannten Wortteil „Wasser“ reduziert oder durch das wahrscheinlich häufiger verwendete Wort „Leitungswasser“ ersetzt. Dies wäre auch durch die Top-Down-Verarbeitung nach dem Modell von Rönneberg zu erwarten, wenn im auditorischen System des Hörers das Satzende der gerade gesprochenen Wortfolge schon mit den im individuellen Wortschatz dominierenden Worten „Wasser“ oder „Leitungswasser“ vorbelegt wurde. Ein Beispiel dafür sind gut bekannte Sprichwörter, bei denen schon während des Aussprechens der ersten

Wörter der weitere Fortlauf eines Satzes bis zum Ende im auditorischen System vorweggenommen wird.

Einzelne Sätze wurden vergleichsweise besser verstanden als andere, selbst unter schwierigen Bedingungen. Besonders auffallend war dies bei dem Satz „Wir wollen heute spazieren gehen.“ (Liste 8, Satz 5). Ein Erklärungsansatz wäre, dass dieser Satz im Alltag so gebräuchlich ist, dass er besser verstanden wird. In Betracht käme auch, dass dieser Satz ein Beispiel für die Pegelkorrektur in der Testentwicklung ist.

Ferner zeigen sich einige inhaltliche Wiederholungen in den Sätzen. So stehen mehrere Sätze im Zusammenhang mit Bahnhof und Zug: „Die Bahn soll schneller werden.“ (Liste 1, Satz 5), „Der Zug fuhr heute Früh um fünf.“, „Die Station wird angesagt.“, sowie „Die Bremsen quietschen grässlich.“ (Liste 16, Satz 3, 4, 5). Diese thematische Häufung kann das Verstehen beeinflussen. In Liste 20 sind in den originalen Testlisten zwei Sätze hintereinander, in denen das Wort „Kinder“ vorkommt. Der zweite Satz wurde vor Testbeginn an das Ende der Liste gestellt, um ein besseres Verstehen durch direkte Wiederholung desselben Wortes zu vermeiden.

Die Durchführung und die Testergebnisse verschiedener Studien sind schwer zu vergleichen. Die Unterschiede sowohl der Komplexität des Inhalts des Sprachmaterials als auch der Sprache, sowie die Sprechweise der Sprecher variieren stark. So wurde der GÖSA von einem ungeschulten männlichen Sprecher mit normaler umgangssprachlicher Artikulation gesprochen, er gilt jedoch wegen der schnellen Sprechweise als schwieriger Satztest (Kollmeier und Wesselkamp 1997). In der Studie von Studebaker und Pavlovic dagegen wurden drei verschiedene Sprecher, zwei Männer und eine Frau, verwendet, die verschiedene Abschnitte aus einem Kinderlexikon vorlasen. Die Sprecher galten als sehr gut verständlich, der Text war auf dem Niveau der siebten Jahrgangsstufe gehalten (Studebaker et al. 1987).

Die Eigenschaften des Sprechers, wie beispielsweise das Geschlecht, Artikulation und Sprechweise können sich erheblich auf das Testverfahren auswirken (Lazarus et al. 2007, S. 31). Zwischen der männlichen und der weiblichen Stimme gibt es Unterschiede, besonders in der Tonlage. Die Grundfrequenz der Stimme männlicher Sprecher liegt bei etwa 125 Hz, die der weiblichen Stimme bei 250 Hz (Lazarus et al. 2007, S. 53). Die Frequenzcharakteristik der Sprache wird wiederum insbesondere durch die einzelnen Sprachlaute bestimmt (Lazarus et al. 2007, S. 54).

Des Weiteren haben neben der Lautstärke auch die Sprechgeschwindigkeit und die Länge der Pausen einen erheblichen Einfluss auf das Sprachverstehen. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit der Sprechgeschwindigkeit neben der Länge der Pausen auch die Artikulationsgeschwindigkeit der einzelnen Laute variiert (Lazarus et al. 2007, S. 58–59).

Ferner basierte diese Studie auf deutschsprachigem Material, während alle Vergleichsstudien die englische Sprache zur Basis hatten. Es war anzunehmen, dass sich durch die Unterschiede in der Phonetik und der Syntax der beiden Sprachen auch die Bedeutung der einzelnen Elemente für das Verstehen voneinander unterscheidet. So kommen in der deutschen Sprache Konsonanten und Vokale im Verhältnis von 39 zu 61 vor (Meier 1964). Die englische Sprache besteht zu 37,5 % aus Konsonanten und zu 62,5 % aus Vokalen (Tarnóczy 1971). Vokale werden bereits ab einem mittleren Pegel der Silben von circa 25 dB verstanden, Konsonanten dagegen erst ab einem Schallpegel der Silben von 30 bis 60 dB. Grund hierfür ist, dass Vokale im Sprachfluss mit höherer Intensität gesprochen werden. Vokale werden um 20 bis 25 dB lauter ausgesprochen als die am leisesten gesprochenen Konsonanten „f“, „p“, „d“ und „b“, die Konsonanten „m“, „n“, „g“, „k“, „z“ und „s“ liegen in der Sprechintensität dazwischen. (Lazarus et al. 2007, S. 47)

Konsonanten sind im Unterschied zu den Vokalen allerdings erheblich informationshaltiger, wodurch sie für das Sprachverstehen einen wesentlich größeren Beitrag leisten (Lazarus et al. 2007, S. 26–27). Somit kann ein Störgeräusch in den verschiedenen Sprachen durch die Unterschiede in der Anzahl der Konsonanten auch unterschiedlich viel Einfluss auf das Verstehen nehmen. Ein mit dem GÖSA vergleichbarer Satztest im Englischen ist der Connected Speech Test (CST).

Neben dem Sprecher, der Phonetik und dem Bekanntheitsgrad der Wörter wird die Hörschwelle für Sprache auch von der Art des Sprachmaterials bestimmt (Lazarus et al. 2007, S. 26). Sinnlose Silben dienen als Testmaterial für die rein akustischen Bedingungen eines Raumes oder einer Anlage, da das Gehörte nicht durch das Verstehen von Kontext beeinflusst wird. Häufig in der Audiometrie verwendet werden Worttests, beispielsweise der Freiburger Sprachverständlichkeitstest, der älteste und am häufigsten verwendete deutsche Sprachtest, der mit einsilbigen Wörtern arbeitet. Durch die Einsilbigkeit haben auch diese Worte eine geringe Redundanz. Bei Satztests dagegen kann durch den Kontext, die Grammatik und den Satzbau leichter auf nicht gut verstandene Satzteile geschlossen werden, was das Verstehen

deutlich erleichtert. Die Nutzbarkeit von Kontext ist eine individuelle Fähigkeit der Testperson.

Zuletzt kann bei der Durchführung von Sprachverständlichkeitstests zwischen der offenen Testform, bei der der Proband das Gehörte ohne weitere Hilfestellung nachsprechen soll, und der geschlossenen Testform gewählt werden. Bei letzterer kann der Proband das Gehörte aus vorgegebenen Antworten auswählen (Lazarus et al. 2007, S. 31).

Die Fülle an Einflussfaktoren auf das Sprachverstehen zeigt, wie schwierig es ist, Sprachverständlichkeitstests mit verschiedenem Sprachmaterial und Sprechern zu vergleichen.

4.1.3 Diskussion der Methode

Grundlage dieser Studie war die von French und Steinberg entwickelte Methode, die einerseits auf der Frequenzfilterung der Sprache in Hoch- und Tiefpässe, andererseits auf der Überdeckung der Sprache mit Störgeräusch basiert. Diese Methode war Grundlage vieler verschiedener Studien. Sie wurde ebenfalls von Studebaker und Pavlovic 1986 verwendet (Studebaker et al. 1987).

Mit Hilfe dieser Methode ließ sich der quantitative Beitrag jedes Frequenzbereichs für das Sprachverstehen ermitteln. Vorteilhaft ist hierbei auch die Alltagsrelevanz dieser Methode. Mittels des Störgeräusches lässt sich der Aspekt der verminderten Hörbarkeit von Sprache durch eine Schwerhörigkeit alltagsähnlich simulieren, während durch die Frequenzfilterung zum Beispiel die Hörbarkeitsverminderung einer Hochtonschwerhörigkeit nachempfunden werden kann. Dies kann bei Untersuchungen zur pathophysiologischen Wirkung von Schwerhörigkeiten auf das Sprachverstehen oder zur Wirksamkeit von Hörhilfen dahingehend hilfreich sein, dass aus den Hörschwellen mit Hörhilfe und dem daraus berechneten AI mit Hilfe der absoluten Transferfunktion eine Vorhersage des Sprachverstehens erfolgen kann, was eine Zielgröße für das theoretisch erreichbare maximale Sprachverstehen aufgrund von Hörbarkeitseinschränkungen darstellt. Fallen individuelle Testergebnisse schlechter aus als die Vorhersage, sind neben einem Hörbarkeitsdefizit wahrscheinlich zusätzliche Faktoren dafür verantwortlich. Dabei kann es sich zum Beispiel um die stärkere Maskierungswirkung von verbreiterten Wanderwellen oder zusätzlichen Undeutlichkeiten durch fehlerhafte

neuronalen Signalverarbeitung im auditorischen System (zum Beispiel durch eine Neuropathie) handeln.

Messungen mit Versuchspersonen sind meistens aufwändig, zeitintensiv und fehlerbehaftet. Daher wurden Modelle zur Vorhersage von Sprachverständlichkeit entwickelt. Mathematische Modelle beschreiben die Realität durch mathematische Formeln und tragen zum theoretischen Verständnis der Prozesse des Sprachverstehens bei. Sie ermöglichen durch Variation der Modellparameter eine Anpassung der Vorhersage an reale Ergebnisse. Die Vorhersage der quantitativen Sprachverständlichkeit mit mathematischen Modellen ist zeitsparend, vermeidet subjektive Einflüsse auf das Testergebnis, erlaubt durch den Vergleich der Vorhersage und der tatsächlichen Untersuchungsergebnisse Plausibilitätsprüfungen und ist wichtig für klinische Untersuchungen.

Relevante Modelle zur Vorhersage der Sprachverständlichkeit und des Sprachverstehens sind der AI und der SII. Der SII ist eine Erweiterung des AI durch Berücksichtigung der Maskierungswirkungen gleichzeitig vorhandener spektraler Anteile. Er berücksichtigt die räumlichen Auslenkungen der Basilarmembran und somit die Aufwärts- und Abwärtsmaskierung im Innenohr von Normalhörenden. Nachteil sowohl des AI als auch des SII-Verfahrens ist, dass sie nur stationäre Störgeräusche berücksichtigen, nicht aber fluktuierende wie den Nachhall. Dieser wurde im Speech-Transmission-Index (STI) durch die Hüllkurve der Sprache in jeder Oktave berücksichtigt (Lazarus et al. 2007, S. 249).

Für die klinische Anwendung ist es deutlich kosten- und zeitgünstiger, wenn mittels Messung der Hörschwelle nun mit Hilfe der in dieser Studie entwickelten deutschsprachigen Daten und des SII-Verfahrens das Verstehen vorhergesagt werden kann, statt alle Werte für jeden Patienten selbst messen zu müssen.

Es wäre hilfreich, auch weitere deutschsprachige Tests, beispielsweise Einsilber, für diese Möglichkeit zugänglich zu machen, da verschiedenes Sprachmaterial für verschiedene Zwecke sinnvoll ist.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Sprachverstehen

Trotz aller Maßnahmen zur Homogenisierung des Testmaterials und der Probandenauswahl kam es bei einigen Messbedingungen zu Streuungen in den Testergebnissen. Eine Möglichkeit, die Ergebnisschwankungen zwischen einzelnen Testpersonen auszugleichen, wäre, einen individuellen Proficiency Factor anzuwenden, der die individuelle Befähigung zum Sprachverstehen unter suboptimalen akustischen Bedingungen berücksichtigt. Dieser liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 dabei für optimale Fähigkeit zum Sprachverstehen steht. Da es jedoch keine einfache, leicht anwendbare Möglichkeit gibt, diesen Faktor für jede Versuchsperson zu bestimmen, wird er für Normalhörende gleich 1 gesetzt (Studebaker et al. 1995). Für Nicht-Muttersprachler oder Hörgeschädigte kann ein Wert unter 1 gewählt werden. Zusammen mit der unterschiedlichen Konzentrationsfähigkeit der Testpersonen und dem individuellen Wortschatz können hierin Ursachen für die Streuung der Testergebnisse gesehen werden.

4.2.2 Absolute Transferfunktion

In der vorliegenden Studie wurde erstmals eine absolute Transferfunktion für das deutschsprachige Sprachmaterial des Göttinger Satztest entwickelt. Sie zeigt einen sehr steilen Anstieg und erreicht bereits bei einem AI von 0,67, also wenn nur etwa 2/3 der Sprachinformation hörbar ist, mit 0,994 ein nahezu 100-prozentiges Sprachverstehen (siehe Abb. 15: Absolute Transferfunktion).

Der Vergleich mit anderen Studien weist einige Unterschiede zwischen den darin angegebenen und der hier ermittelten absoluten Transferfunktionen auf. Studebaker und Pavlovic erarbeiteten eine annähernd gleiche Transferfunktion wie in dieser Studie (Studebaker et al. 1987). Die Transferfunktion von French und Steinberg jedoch zeigt einen erheblich flacheren Verlauf. Nach einem langsamen, nahezu gleichmäßigen Anstieg erreicht diese erst bei einem AI von 1 ein vollständiges Sprachverstehen (French und Steinberg 1946). Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass aus verschiedenem Sprachmaterial verschiedene Transferfunktionen resultieren. Die vorliegende Studie basierte mit dem GÖSA auf einem Satztest mit vollständigen sinnvollen Sätzen der Alltagssprache, ähnlich wie er auch von Studebaker und Pavlovic benutzt worden war. French und Steinberg jedoch nutzten als

Sprachmaterial sinnlose Silben. Je mehr Kontext dem Hörer zur Verfügung steht, desto mehr kann er von dem Gehörten auf das eventuell nicht ganz Verstandene schließen, was für jeden AI zu deutlich besseren Hörleistungen führt. Dies lässt darauf schließen, dass bei Sätzen der Kontext und der Satzbau sehr stark zum Verstehen beitragen. Dass bei einem AI von etwa 0,67 bereits circa 100 % des Inhalts verstanden werden kann, bedeutet, dass nur zwei Drittel der akustischen Sprachinformation nötig sind, um auf den gesamten Inhalt schließen zu können. Sinnlose Silben müssen in dieser Hinsicht deutlich hörbarer sein, da der Kontext fehlt.

Die Ähnlichkeit der absoluten Transferfunktionen für ganze Sätze (GÖSA) und Connected Discourse (Studebaker et al. 1987) lässt aber auch darauf schließen, dass die Landessprache, also Englisch oder Deutsch, gegenüber der Art des Sprachmaterials einen deutlich geringeren Einfluss auf die Transferfunktion zu haben scheint. Abbildung 16 stellt die absoluten Transferfunktionen im Vergleich dar.

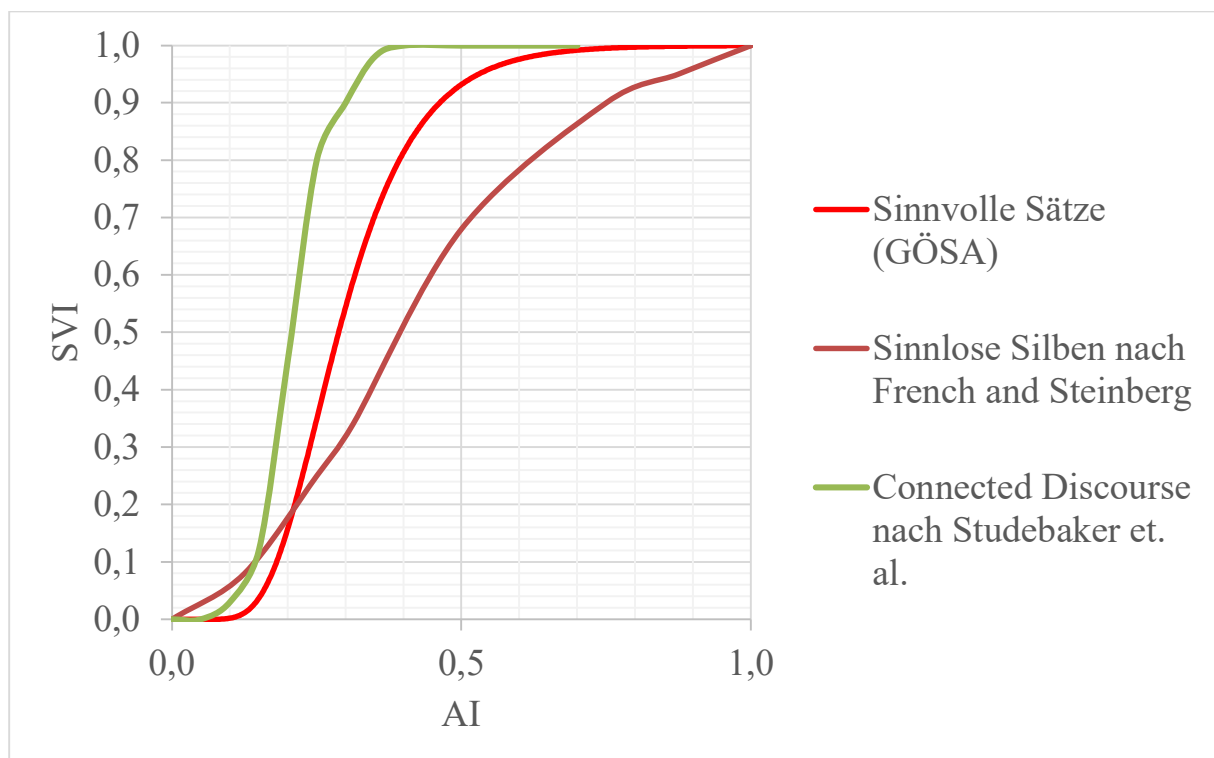


Abbildung 16: Absolute Transferfunktionen im Vergleich. Die Funktionen für sinnvolle ganze Sätze der Alltagssprache (GÖSA und Connected Discourse) besitzen eine größere Steigung als die für sinnlose Silben. Für denselben Wert des Sprachverstehens sind für Sätze geringere Sprachinformationsmengen notwendig als für sinnlose Silben.

4.2.3 Band Importance Function

Die Band Importance Function ordnet jeder Frequenz einen AI zu und stellt die Wichtigkeit der einzelnen Frequenzbänder durch deren AI-Anteil dar. In der nicht-kumulativ aufgetragenen Darstellung (siehe Abb. 12) fällt besonders ein Peak bei 1600 Hz auf. Ein kleinerer Peak ergibt sich auch im niedrigen Frequenzbereich. Diese Frequenzbereiche scheinen also für das Sprachverstehen von besonderer Bedeutung zu sein.

Vergleicht man die vorliegende BIF nun mit den BIFs in der Literatur, zeigen sich deutliche Unterschiede. Studebaker und Pavlovic fanden in ihrer Studie mit Sätzen als Sprachmaterial einen zweigipfligen, relativ gleichmäßigen Kurvenverlauf, den deutlichsten Peak jedoch bei 400 bis 500 Hz (Studebaker et al. 1987). French und Steinberg dagegen erzielten bei sinnlosen Silben nur einen, dafür aber sehr deutlichen Peak bei 2000 bis 3000 Hz (French und Steinberg 1946). Die BIF im ANSI Standard von 1997 für Terzbänder zeigte für kurze Sätze ebenfalls einen doppelgipfligen Verlauf mit dem größten Peak bei 500 Hz, dem zweitgrößten bei 2500 Hz (Acoustical Society of America 1997, S. 19). Es scheint, dass auch hier wieder ein Zusammenhang mit der Art des Sprachmaterials und den Stimm- und Sprechereigenschaften des Testsprechers besteht. Bei sinnlosen Silben sind die zum Verstehen besonders wichtigen Konsonanten noch wichtiger, da es wenig andere Hinweise auf den Inhalt gibt. Da Konsonanten in den höheren Frequenzen liegen, ist so der Peak in den hohen Frequenzen zu erklären. Bei Satzmaterial gibt es mit Kontext und Syntax zusätzliche Hilfen, so dass die Konsonanten an Bedeutung verlieren, was kleinere Peaks zur Folge hat.

Insgesamt scheinen die Peaks der BIF der vorliegenden Studie im Vergleich jedoch plausibel zu sein.

Bei der Darstellung 20 Frequenzbänder, die jeweils 0,05 AI beinhalten, fällt auf, dass bis zum siebten Band ($f_0 = 897$ Hz) die Bandbreite etwa konstant zwischen 110 und 120 Hz bleibt und dann mit zunehmender Frequenz stetig und nichtlinear bis auf rund 3000 Hz im höchsten Frequenzband ansteigt. Der Verlauf der Bandbreite gibt den Verlauf der Sprachinformationsdichte an, welche ein Maß der Wichtigkeit ist.

4.2.3.1 SNR-Abhängigkeit der BIF

Bei genauerer Untersuchung der BIF zeigte sich bei Mittelung der Werte eine deutliche Abhängigkeit vom gewählten SNR-Bereich. Die BIF für den gesamten SNR-Bereich von -10 bis +60 dB ergab einen eingipfligen Verlauf mit Peak bei 1600 Hz. Hierbei überwiegt jedoch die in den höheren SNR besser bzw. vollständig verständliche Information und bekommt somit zu viel Gewicht. Die Wahl einer geringeren Sprachpegeldynamik erscheint daher sinnvoll.

Bei der Untergrenze sollte nach den Argumenten von Studebaker und Sherbecoe (Sherbecoe und Studebaker 1990; Sherbecoe und Studebaker 2002; Studebaker und Sherbecoe 1991) das Sprachverstehen mindestens 5 % betragen, weil die Messwerte darunter fehlerbehaftet sein können. Daher wurde in dieser Studie von einer unteren Grenze von -9 dB SNR ausgegangen. Die obere Grenze von 11 oder 21 dB richtet sich nach dem ersten SNR, bei dem das Sprachverstehen 100 % erreicht (11 dB), bzw. nach der typischen Sprachdynamik von 30 dB (-9 bis +21 dB SNR).

Bei geringerer Obergrenze bildet sich ein Doppelgipfel aus. Dabei scheint sich die Verwendung der Sprachinformation in Richtung der beiden Gipfel zu verschieben. In dieser Studie wurde für die Mittelung derjenige SNR-Bereich verwendet, innerhalb dessen die Breitbandergebnisse von 0 % auf 100 % ansteigen.

Die Abhängigkeit der BIF vom SNR-Bereich wurde bisher in der Literatur noch nicht diskutiert. Ein graphischer Vergleich der BIFs in Abhängigkeit verschieden großer SNR-Bereiche ist in Abbildung 17 dargestellt. Es stellt sich heraus, dass die Wahl des einbezogenen SNR-Bereichs sehr entscheidend ist. Fließt der positive Bereich mit sehr leichten Präsentationbedingungen stärker mit ein, entsteht eine eingipflige Gewichtung.

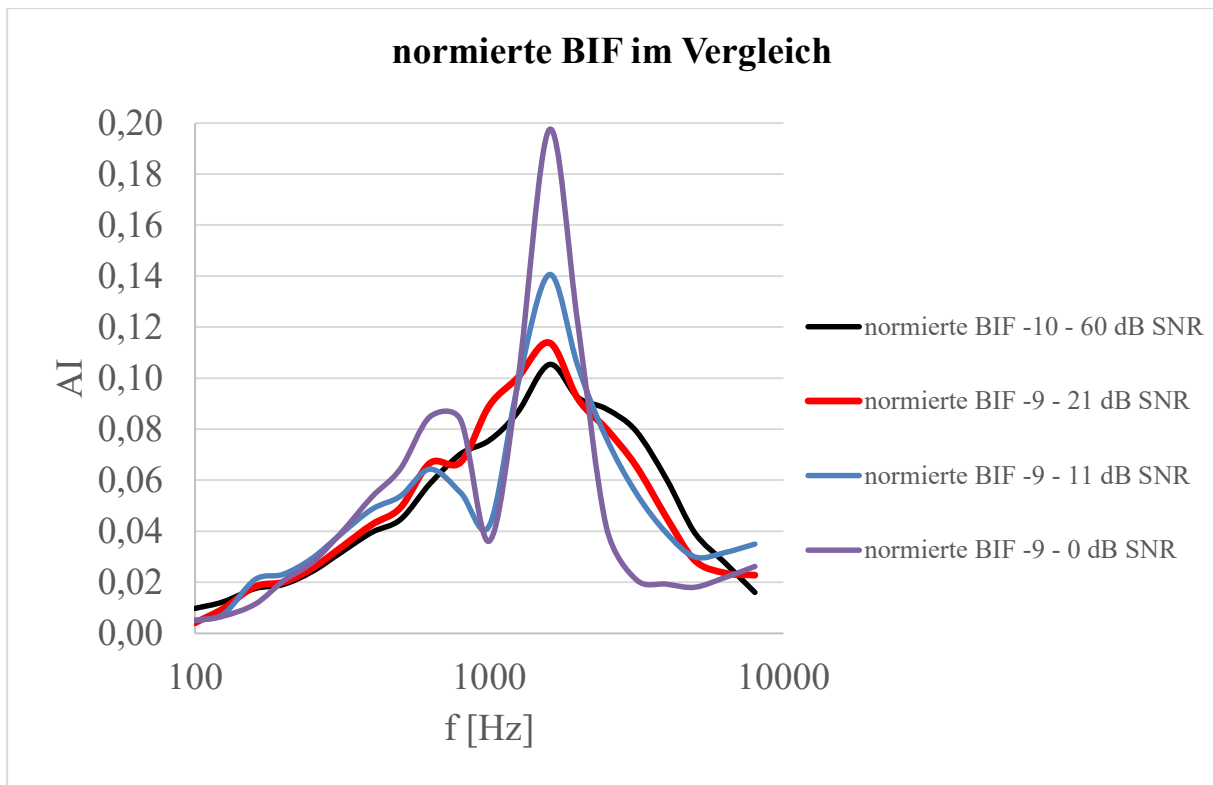


Abbildung 17: Ein Vergleich der normierten BIF in Abhängigkeit des SNR-Bereichs, aus denen die BIFs berechnet wurden. Reicht der SNR Bereich weit in den positiven Bereich (20 – 60 dB), dann ergeben sich eingipflige Verteilungen (rot, schwarz). Dabei werden allerdings die Ergebnisse der Sprachverstehensmessungen im weit positiven SNR Bereich übergewichtet. Die Referenzfunktion für den GÖSA aus Abb.12 ist blau gezeichnet.

5 Zusammenfassung

Bisher war die Vorhersage des Sprachverstehens auf der Basis des SII für deutschsprachige Sprachverständlichkeitstests nur näherungsweise mit den Band Importance Functions der englischen Sprache möglich. Es war anzunehmen, dass die Frequenzverteilung der Sprachinformation in der deutschen Sprache und somit auch der Informationsgehalt in jeder Frequenz von der der englischen Sprache abweichen.

Daher war es Ziel der vorliegenden Studie, für einen vielbenutzten deutschen Standardsprachtest, den Göttinger Satztest, sowohl eine Band Importance Function als auch eine Transferfunktion zu entwickeln.

Hierfür wurde das Sprachmaterial nach der von French und Steinberg vorgeschlagenen Methode mittels Hoch- und Tiefpassfilterung in Doppelterzen gefiltert. Des Weiteren wurde ein sprechersimulierendes Rauschen als Störgeräusch in verschiedenen Pegeln darübergerlegt. Anschließend wurde der Test an einem normalhörenden Probandenkollektiv von 71 Studenten durchgeführt und ausgewertet.

Das Ergebnis der Messungen zeigte, dass das Sprachverstehen umso besser wurde, je breiter die Filtergrenzen waren und je größer der SNR wurde. Die ermittelte absolute Transferfunktion verlief mit einem sehr steilen Anstieg. Dies ist wegen Kontext und Syntax typisch für Sprachmaterial mit vollständigen Sätzen. Der Vergleich mit Transferfunktionen anderer Studien ergab, dass die Sprache, also Englisch oder Deutsch, einen deutlich geringeren Einfluss auf die Transferfunktion zu haben scheint als die Art des Sprachmaterials, also zum Beispiel sinnlose Silben gegenüber vollständigen Sätzen.

Bei der Band Importance Function ergab sich für den Göttinger Satztest der deutlichste Peak bei 1600 Hz. Bei genauerer Untersuchung der BIF zeigte sich eine deutliche Pegelabhängigkeit, ein Ergebnis, das bisher in der Literatur noch nicht diskutiert worden war.

Auf Grundlage dieser Arbeit kann nun für Normalhörende mittels der absoluten Transferfunktion der SII als Vorhersage des Sprachverstehens für den Göttinger Satztest oder näherungsweise andere deutschsprachige Satztests im stationären Störgeräusch in Abhängigkeit der SNR berechnet werden.

6 Ausblick

Obwohl die Annahme der Abhängigkeit der Sprachverständlichkeit von der Hörbarkeit der Sprachinformation sowohl für das AI- als auch das SII-Verfahren durch die sprachmaterialspezifischen BIF theoretisch gut begründet ist, könnte der spezifische Kontexteffekt des Testmaterials bei den hier eingesetzten studentischen Testpersonen aufgrund deren intellektuellen Fähigkeiten bei nicht-akademischen Personen zu größeren Differenzen zwischen Testergebnissen und Vorhersagen führen. Die Genauigkeit bzw. Repräsentativität der Vorhersage des Sprachverstehens durch die testspezifische SII-Berechnung kann in weiteren Untersuchungen an normalhörenden nicht-akademischen Testpersonen verifiziert werden.

In der hiesigen Studie zeigte sich, dass die Band Importance Functions in ihrem Verlauf deutlich je nach SNR-Intervall variierten. Um diesem Phänomen weiter nachzugehen, wäre es interessant, in einer weiteren Studie die SNR-Abhängigkeit der Diskriminationsfunktionen dahingehend zu untersuchen, ob diese jeweils für unterschiedliche Testschwierigkeiten besser geeignet sind.

Das größte Potenzial der testspezifischen SII-Berechnung besteht für die klinische Anwendung in der Möglichkeit, Testergebnisse zum Sprachverstehen aufgrund der individuellen frequenzspezifischen Hörschwellen vorherzusagen. Dabei geht man von der Annahme aus, dass die dem Originalverfahren zugrunde liegenden Hörbarkeitseinschränkungen durch Störgeräusche mit dem Effekt erhöhter Hörschwellen vergleichbar sind. Dies trifft in erster Linie für reine Schallleitungsstörungen zu, da es dabei im Wesentlichen nur zu einer Pegelabschwächung der Sprachsignale bei normaler Innenohrfunktion kommt. Die Übereinstimmung zwischen gemessenem und vorhergesagtem Sprachverstehen kann mit entsprechenden Patienten untersucht werden.

Häufiger als reine Schallleitungsstörungen treten Innenohrschwerhörigkeiten auf, bei denen die angehobenen Hörschwellen durch Ausfall von äußeren und inneren Haarzellen und verbreiterten Wanderwellen hervorgerufen werden. Im SII-Verfahren wird lediglich eine normale Innenohrfunktion berücksichtigt, weshalb eine unmittelbare Vorhersage des Sprachverstehens bei Innenohrschwerhörigkeiten nicht erwartet werden kann. Dennoch kann untersucht werden, ob mit einer hörverlustabhängigen Korrekturfunktion im Sinne des Proficiency Factor die Vorhersagegenauigkeit bei Innenohrschwerhörigkeiten soweit optimiert werden kann, dass eine klinische Anwendung möglich wird.

Es wurde bereits eine Vielzahl verschiedener Methoden entwickelt, Sprachverständlichkeit zu testen. Healy beispielsweise wandelte die in dieser Studie verwendete Methode in seiner Studie 2012 ab, indem er die Sprache in 21 kritische Bänder wie in der SII-Methode unterteilte und dann dem Hörer eine gewisse Anzahl an Bändern gleichzeitig darbot, einmal mit und einmal ohne das zu untersuchende Band. Er nahm an, dass man durch die Differenz auf die Bedeutung des einzelnen Bandes schließen könne (Healy et al. 2013). Hierbei stellt sich jedoch die Frage, ob beide Methoden tatsächlich zum selben Ergebnis führen. Wie bei sinnvollen Sätzen als Sprachmaterial der Kontext zu besseren Ergebnissen führt, wäre es möglich, dass von den benachbarten Frequenzbändern auf den Inhalt des fehlenden Bandes geschlossen werden kann und dessen Bedeutung somit überschätzt wird.

Eine weitere Methode, Sprachverständlichkeit zu untersuchen, wäre die Begrenzung im Pegelbereich durch Filterung einzelner Amplituden. Es kann zwischen Peak Clipping, also dem Herausschneiden der oberen Amplitudenbereiche, oder dem Center Clipping, dem Herausfiltern der mittleren Amplitudenbereiche, unterschieden werden (Lazarus et al. 2007, S. 147). Licklider und Miller zeigten 1951, dass bei Erhalt der kleinen und mittleren Amplituden, also dem Peak Clipping, das Sprachverstehen fast vollständig erhalten bleibt, jedoch bei Präsentation nur der Sprachspitzenpegel so gut wie keine Sprachinformation mehr beinhaltet ist. Dies lässt sich wiederum mit der oben bereits genannten Theorie erklären, dass Konsonanten wesentlich für das Verstehen von Sprache verantwortlich sind, in den hohen Amplituden jedoch nur noch Vokale enthalten sind (Licklider 1946; Miller und Licklider 1950). Diese Erkenntnis kann im Alltag wiederum bei Sprachübertragungssystemen hilfreich sein. Die Erhöhung der Amplituden zur besseren Verständlichkeit war bisher durch die Übersteuerung der Sprachspitzen limitiert, durch Weglassen dieser sowieso wenig Sprachinformation enthaltenden Teile konnte dieses Problem reduziert werden. Heutzutage wird jedoch das Verfahren der Amplitudenkompression zur Vermeidung der Übersteuerung bevorzugt (Lazarus et al. 2007, S. 148).

Des Weiteren wäre es sinnvoll, die Sprachinformationsverteilung für weiteres deutschsprachiges Testmaterial zu untersuchen und dafür Transferfunktionen zu erstellen, um die Vorhersagemöglichkeiten von Testergebnissen aufgrund der Hörbarkeit des Sprachmaterials in der deutschsprachigen Audiologie zu erweitern und zu verbessern.

7 Literaturverzeichnis

Acoustical Society of America (1997): American National Standard - Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index. ANSI S.3.5.

DIN EN ISO 266:1997-08, 1997 - 08: Akustik - Normfrequenzen.

Böhme, Gerhard; Welzl-Müller, Kunigunde (2005): Audiometrie. Hörprüfungen im Erwachsenen- und Kindesalter ; Lehrbuch. 5., vollst. überarb. und erg. Aufl. Bern: Huber.

DePaolis, R. A. (1992): The Intelligibility of Words, Sentences, and Continuous Discourse, Using the Articulation Index. The Pennsylvania State University.

Feldmann, H. (2004): 200 Jahre Hörprüfungen mit Sprache, 50 Jahre deutsche Sprachaudiometrie - ein Rückblick. In: *Laryngo- rhino- otologie* 83 (11), S. 735–742.

Fletcher, Harvey; Galt, Rogers H. (1950): The Perception of Speech and Its Relation to Telephony. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 22 (2), S. 89–151.

French, N. R.; Steinberg, J. C. (1946): Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 19 (1), S. 90–119.

Gompertz, Benjamin (1825): “On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies.”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (vol. 115), S. 513–583.

Hahlbrock, Karl-Heinz (1953): Über Sprachaudiometrie und neue Wörtertteste. In: *Archiv f. Ohren-, Nasen- u. Kehlkopfheilkunde* 162 (5), S. 394–431.

Healy, Eric W.; Yoho, Sarah E.; Apoux, Frederic (2013): Band importance for sentences and words reexamined. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 133 (1), S. 463–473.

Irwin, R. J.; Hinchcliff, L. K.; Kemp, S. (1981): Temporal acuity in normal and hearing-impaired listeners. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology* 20 (3), S. 234–243.

Kollmeier, B.; Lenarz, T.; Winkler, A.; Zokoll, M. A.; Sukowski, H.; Brand, T.; Wagener, K. C. (2011): Hörgeräteindikation und -überprüfung nach modernen Verfahren der Sprachaudiometrie im Deutschen. In: *HNO* 59 (10), S. 1012–1021.

Kollmeier, Birger: Neue Verfahren in der audiologischen Diagnostik.

Kollmeier, Birger; Wesselkamp, Matthias (1997): Development and evaluation of a German sentence test for objective and subjective speech intelligibility assessment. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 102 (4), S. 2412–2421.

Lazarus, Hans; Sust, Charlotte A.; Steckel, Rita; Kulka, Marko; Kurtz, Patrick (Hg.) (2007): Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation. Mit 117 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Licklider, J. C. R. (1946): Effects of Amplitude Distortion upon the Intelligibility of Speech. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 18 (2), S. 429–434.

Luce, P. A.; Pisoni, D. B. (1998): Recognizing spoken words: the neighborhood activation model. In: *Ear Hear* 19 (1), S. 1–36.

Meier, Helmut (1964): Deutsche Sprachstatistik. 2 Bände. Hildesheim: Georg Olms Verlagsbuchhandlung.

Miller, George A.; Galanter, Eugene; Pribram, Karl H. (1960): Plans and the structure of behavior. New York: Holt (A Holt-Dryden book).

Miller, George A.; Heise, George A.; Lichten, William (1951): The intelligibility of speech as a function of the context of the test materials. In: *Journal of Experimental Psychology* 41 (5), S. 329–335.

Miller, George A.; Licklider, J. C. R. (1950): The Intelligibility of Interrupted Speech. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 22 (2), S. 167–173.

Moore, Brian C. J. (1989): An introduction to the psychology of hearing. London: Academic Press.

Mrowinski, Dieter; Scholz, Günther; Steffens, Thomas (2017): Audiometrie. Eine Anleitung für die praktische Hörprüfung. 5. aktualisierte und erweiterte Auflage. Stuttgart: Thieme.

Müller-Deile, Joachim (2009): Verfahren zur Anpassung und Evaluation von Cochlear Implant Sprachprozessoren. 1. Aufl. Heidelberg: Median-Verlag von Killisch-Horn.

Plomp, R. (1964): The Ear as a Frequency Analyzer. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 36 (9), S. 1628–1636.

Rönnberg, Jerker; Lunner, Thomas; Zekveld, Adriana; Sörqvist, Patrik; Danielsson, Henrik; Lyxell, Björn et al. (2013): The Ease of Language Understanding (ELU) model: theoretical, empirical, and clinical advances. In: *Frontiers in Systems Neuroscience* 7:31.

Sherbecoe, R. L.; Studebaker, G. A. (1990): Regression equations for the transfer functions of ANSI S3.5-1969. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 88 (5), S. 2482–2483.

Sherbecoe, Robert L.; Studebaker, Gerald A. (2002): Audibility-index functions for the connected speech test. In: *Ear Hear* 23 (5), S. 385–398.

Steffens, T. (2017): Die systematische Auswahl von sprachaudiometrischen Verfahren. In: *HNO* 65 (3), S. 219–227.

Steffens, T.; Marcrum, S. C. (2018): Fachärztliches Basiswissen zur Wirksamkeit von Hörgeräten in Abhängigkeit der Art und Pathophysiologie einer Hörstörung. In: *HNO* 66 (2), S. 122–127.

Steffens, Thomas (2006): Test-Retest-Differenz der Regensburger Variante des OLKI-Reimtests im sprachsimulierenden Störgeräusch bei Kindern mit Hörgeräten. In: *Zeitschrift für Audiologie* (45 (3)), S. 88–99.

Stowe, Arthur N.; Harris, William P.; Hampton, Donald B. (1963): Signal and Context Components of Word-Recognition Behavior. In: *J. Acoust. Soc. Am.* 35 (5), S. 639–644.

Studebaker, G. A.; McDaniel, D. M.; Sherbecoe, R. L. (1995): Evaluating relative speech recognition performance using the proficiency factor and rationalized arcsine differences. In: *Journal of the American Academy of Audiology* 6 (2), S. 173–182.

Studebaker, G. A.; Pavlovic, C. V.; Sherbecoe, R. L. (1987): A frequency importance function for continuous discourse. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 81 (4), S. 1130–1138.

Studebaker, Gerald A.; Sherbecoe, Robert L. (1991): Frequency-Importance and Transfer Functions for Recorded CID W-22 Word Lists. In: *J Speech Lang Hear Res* 34 (2), S. 427–438.

Tarnóczy, T. (1971): Das durchschnittliche Energiespektrum der Sprache (für sechs Sprachen). In: *Acustica* (24 (2)), S. 57–74.

Thornton, A. R.; Raffin, M. J. (1978): Speech-discrimination scores modeled as a binomial variable. In: *Journal of Speech and Hearing Research* (21), S. 507–518.

Wagener, Kirsten; Brand, Thomas; Kollmeier, Birger (1999): Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache Teil 2: Optimierung des Oldenburger Satztests. In: *Zeitschrift für Audiologie* (38 (2)), S. 44–56.

Winsor, C. P. (1932): The Gompertz Curve as a Growth Curve. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 18 (1), S. 1–8.

8 Anhang

8.1 Testlisten Göttinger Satztest

Erste Testliste:

1. Stehend klatschten sie Beifall. _____ / 4
 2. Das Haus hat keinen Garten. _____ / 5
 3. Jetzt wird das Fundament gelegt. _____ / 5
 4. Übermorgen fahren wir fort. _____ / 4
 5. Die Belastung war zu hoch. _____ / 5
 6. Er gewinnt sechs Spiele nacheinander. _____ / 5
 7. Ein kleiner Junge war der Sieger. _____ / 6
 8. Trotzdem wurde keiner satt. _____ / 4
 9. Ich freue mich schon auf das Essen. _____ / 7
 10. Wir hören den plätschernden Bach. _____ / 5
- _____ / 50

Zweite Testliste:

1. Seht euch doch ein bisschen um. _____ / 6
 2. Er musste unbezahlten Urlaub nehmen. _____ / 5
 3. Jetzt suche ich das Weißbrot. _____ / 5
 4. Der Wagen wurde abgeschleppt. _____ / 4
 5. Bald ist der Hunger gestillt. _____ / 5
 6. Sie sollte Medizin nehmen. _____ / 4
 7. Der Kutscher besieht sich den Schaden. _____ / 6
 8. Was kostet ein Glas Selterswasser? _____ / 5
 9. Alles hört auf mein Kommando. _____ / 5
 10. Er schüttelt kräftig deine Hand. _____ / 5
- _____ / 50

Dritte Testliste:

1. Jeder blickte zu Boden. _____ / 4
 2. Er konnte den Ball nicht mehr fangen. _____ / 7
 3. Wir werden euch nie vergessen. _____ / 5
 4. Zum Ausweis gehört ein Lichtbild. _____ / 5
 5. Morgen ist auch noch ein Tag. _____ / 6
 6. Der Direktor hatte keinen Erfolg. _____ / 5
 7. Alle Blumen gingen ein. _____ / 4
 8. Gleich hier sind die Nahrungsmittel. _____ / 5
 9. Schnupfen stört uns natürlich sehr. _____ / 5
 10. Das Angebot war sittenwidrig. _____ / 4
- _____ / 50

Vierte Testliste:

1. Der Streit ist beendet. _____ / 4
 2. Links herum geht es schneller. _____ / 5
 3. Alle nahmen an dem Ereignis teil. _____ / 6
 4. Unser Doktor besucht Vater täglich. _____ / 5
 5. Die Bahn soll schneller werden. _____ / 5
 6. Heut ist kein Geschäft zu machen. _____ / 6
 7. Lange nicht gesehen, mein Lieber. _____ / 5
 8. Darf ich deine Schleife binden? _____ / 5
 9. Auskunft gibt es erst morgen. _____ / 5
 10. Sie hatten wunderschöne Urlaubstage. _____ / 4
- _____ / 50

Fünfte Testliste:

1. Sie leiteten den Verkehr um. _____ / 5
 2. Diese zarten Blumen welken rasch. _____ / 5
 3. Die Schwelle liegt zu hoch. _____ / 5
 4. Auf der Straße war ein Auflauf. _____ / 6
 5. Im Zimmer herrschte strahlende Helle. _____ / 5
 6. Das ist der Reiz des Neuen. _____ / 6
 7. Die Arbeiten dauerten viele Jahre. _____ / 5
 8. Bahn und Post gehören zusammen. _____ / 5
 9. Wir erwarten noch eine Überraschung. _____ / 5
 10. Alle Vorbereitungen waren getroffen. _____ / 4
- _____ / 51

Sechste Testliste:

1. Die Mannschaft enttäuschte heute. _____ / 4
 2. Der Socke war viel zu groß. _____ / 6
 3. Am blauen Himmel ziehen die Wolken. _____ / 6
 4. Bist du sehr kalt geworden? _____ / 5
 5. Diese Durchsage ist ohne Gewähr. _____ / 5
 6. Die Röcke werden wieder kürzer. _____ / 5
 7. Schlaf vor Mitternacht ist gesund. _____ / 5
 8. Seine Frau macht ein trauriges Gesicht. _____ / 6
 9. Der Mann wurde bestraft. _____ / 4
 10. Beinahe hätte ich dich verpasst. _____ / 5
- _____ / 51

Siebte Testliste:

1. Begreifen Sie meine schwierige Lage? _____ / 5
 2. Wer muss noch Schularbeiten machen? _____ / 5
 3. Grüne Vorhänge verdeckten die Aussicht. _____ / 5
 4. Die Rinder sind noch auf der Weide. _____ / 7
 5. Lieber heute als morgen gehen. _____ / 5
 6. Hast du den Kuckuck gehört? _____ / 5
 7. Wir haben ein Abteil extra für uns. _____ / 7
 8. Iss dein Essen nie hastig. _____ / 5
 9. Jedermann war hochgestimmt. _____ / 3
 10. Nach Tisch wird geruht. _____ / 4
- _____ / 51

Achte Testliste:

1. Der Mantel kann in den Schrank. _____ / 6
 2. Die Aktien sind wieder gestiegen. _____ / 5
 3. Die Behörde weiß alles. _____ / 4
 4. Vater will sich eine Pfeife anzünden. _____ / 6
 5. Wir wollen heute spazieren gehen. _____ / 5
 6. Mir schmeckt heute alles. _____ / 4
 7. Die Sonne lacht. _____ / 3
 8. Unsere Eltern tanzen Wiener Walzer. _____ / 5
 9. Er war das fünfte Rad am Wagen. _____ / 7
 10. Über den Tarif wird bald entschieden. _____ / 6
- _____ / 51

Neunte Testliste:

1. Die Sonne wird bald wieder scheinen. _____ / 6
 2. Im Keller lagerten Weinfässer. _____ / 4
 3. Die Hütte bot uns allen Raum. _____ / 6
 4. Ich möchte hinter euch gehen. _____ / 5
 5. Alles geht einmal vorüber. _____ / 4
 6. Riecht ihr nicht die frische Luft? _____ / 6
 7. Die Kartoffeln gehören zum Mittagessen. _____ / 5
 8. Jeder brachte Schätze mit. _____ / 4
 9. Die Menschen standen und schauten. _____ / 5
 10. Frische Gardinen hängen am Fenster. _____ / 5
- _____ / 50

Zehnte Testliste:

1. Sie isst kein salziges Gericht. _____ / 5
 2. Gut Ding will Weile haben. _____ / 5
 3. Das Museum ist geschlossen. _____ / 4
 4. Ist denn noch nicht Feierabend? _____ / 5
 5. Endlich läuft unser Wasser wieder. _____ / 5
 6. Der Bahnhof liegt sieben Minuten entfernt. _____ / 6
 7. Anschrift und Marke nicht vergessen. _____ / 5
 8. Diese Epoche geht zu Ende. _____ / 5
 9. Morgen komme ich später. _____ / 4
 10. Der Fluss trat über die Ufer. _____ / 6
- _____ / 50

Elfte Testliste:

1. Messer und Gabel liegen neben dem Teller. _____ / 7
 2. Am Zaun steht eine Regentonne. _____ / 5
 3. Der Vortrag findet nicht statt. _____ / 5
 4. Der Weg führt schnurgerade darauf zu. _____ / 6
 5. Öl fehlte wohl auch. _____ / 4
 6. Viele Menschen fliegen ungern. _____ / 4
 7. Räum doch bitte den Tisch ab. _____ / 6
 8. Der Kanal musste verbreitert werden. _____ / 5
 9. Wer trinkt einen Kaffee? _____ / 4
 10. Die Fraktion hat abgestimmt. _____ / 4
- _____ / 50

Zwölfte Testliste:

1. Das alte Gerät tut es auch. _____ / 6
 2. Dort muss jedes Auto bremsen. _____ / 5
 3. Die Eltern müssen sich entscheiden. _____ / 5
 4. Unserer Tante fehlt gar nichts. _____ / 5
 5. Deine Uhr geht vor. _____ / 4
 6. Die Tante bewohnt ein nettes Häuschen. _____ / 6
 7. Wir genossen die prächtige Aussicht. _____ / 5
 8. Der Regen brachte die erhoffte Kühle. _____ / 6
 9. Dieser Vortrag war zu langweilig. _____ / 5
 10. Mutter konnte länger schlafen. _____ / 4
- _____ / 51

Dreizehnte Testliste:

1. Diese Gegend nennt man Sandwüste. _____ / 5
 2. Sie bummeln beide durch die Stadt. _____ / 6
 3. Im Keller brennt kein Licht. _____ / 5
 4. Die Götter thronen auf dem Olymp. _____ / 6
 5. Hör doch erst einmal zu. _____ / 5
 6. Du solltest weniger rauchen. _____ / 4
 7. Manche Menschen vertragen keine Erdbeeren. _____ / 5
 8. Wie finden Sie meinen neuen Hut? _____ / 6
 9. Zieht vielleicht die festen Schuhe an! _____ / 6
 10. Die Schwimmbäder waren überfüllt. _____ / 4
- _____ / 52

Vierzehnte Testliste:

1. Alle stimmten gleich mit ein. _____ / 5
 2. Dazu essen wir den Salat. _____ / 5
 3. Der Andrang war ungeheuerlich. _____ / 4
 4. Das Ziel liegt noch weit entfernt. _____ / 6
 5. Die Uhr ist schon abgelaufen. _____ / 5
 6. Diese Brücke wird bald einstürzen. _____ / 5
 7. Mir ist es viel zu warm. _____ / 6
 8. Öfen brauchen Kohlen und Briketts. _____ / 5
 9. Adler fliegen tausend Meter hoch. _____ / 5
 10. Die Konferenz ergab nichts Neues. _____ / 5
- _____ / 51

Fünfzehnte Testliste:

1. Die Arbeiter machen viel Lärm. _____ / 5
 2. Hoffentlich geht er vorsichtig. _____ / 4
 3. Dieser Anzug steht ihm gut. _____ / 5
 4. Das Gebäude wird abgetragen. _____ / 4
 5. Der gelbe Küchenofen sorgt für Wärme. _____ / 6
 6. Mitunter lohnt es zu warten. _____ / 5
 7. Zuvor müssen wir uns stärken. _____ / 5
 8. Aber alles zu seiner Zeit. _____ / 5
 9. Hast du genug Bier im Haus? _____ / 6
 10. Ob ich Süßigkeiten kaufen darf? _____ / 5
- _____ / 50

Sechzehnte Testliste:

1. In der Dämmerung kommen wir heim. _____ / 6
 2. Wir spielen alle Tage. _____ / 4
 3. Der Zug fuhr heute Früh um fünf. _____ / 7
 4. Die Station wird angesagt. _____ / 4
 5. Die Bremsen quietschen grässlich. _____ / 4
 6. Die Fenster sind alle entzwei. _____ / 5
 7. Nehmt doch Butter zum Brot. _____ / 5
 8. Der Giebel ist schon fertig. _____ / 5
 9. Alle Post ist schon ausgetragen. _____ / 5
 10. Die Feuerwehr verkündete den Ausnahmezustand. _____ / 5
- _____ / 50

Siebzehnte Testliste:

1. Motoren brauchen Benzin, Öl und Wasser. _____ / 6
 2. Einige Busse fahren heute später. _____ / 5
 3. Du begrüßt erst deinen Gast. _____ / 5
 4. Der Pflug zieht tiefe Furchen. _____ / 5
 5. Vater hat den Tisch gedeckt. _____ / 5
 6. Der Komplex wurde erweitert. _____ / 4
 7. Lasst bitte das Licht brennen. _____ / 5
 8. Die Freude war ihr anzusehen. _____ / 5
 9. Wir gehen auf den Bahnsteig. _____ / 5
 10. Die Zeitung hat es schon berichtet. _____ / 6
- _____ / 51

Achtzehnte Testliste:

1. Diese Wohnung liegt zu hoch. _____ / 5
 2. Es gab erhebliche Schwierigkeiten. _____ / 4
 3. Er muss wohl abgeschleppt werden. _____ / 5
 4. Was macht denn dein verstauchter Fuß? _____ / 6
 5. Wir bieten alle Größen an. _____ / 5
 6. Das Vergnügen findet morgen statt. _____ / 5
 7. Es ging erstaunlich leise zu. _____ / 5
 8. Ich müsste lesen und rechnen. _____ / 5
 9. Nicht jeder verträgt kaltes Bier. _____ / 5
 10. Er saß zu lange am Steuer. _____ / 6
- _____ / 51

Neunzehnte Testliste:

1. Sie musste ihr Kind erst versorgen. _____ / 6
 2. Lass den Hut nicht hängen. _____ / 5
 3. Kinderarbeit ist verboten. _____ / 3
 4. Die Klage wurde abgewiesen. _____ / 4
 5. Muss der Zucker nicht dort drüben stehen? _____ / 7
 6. Die neue Mauer ist höher. _____ / 5
 7. Die Hotels waren ausverkauft. _____ / 4
 8. Löst doch die Fahrkarten am Schalter. _____ / 6
 9. Jetzt haben sie wieder alles vergessen. _____ / 6
 10. Wer möchte noch Milch? _____ / 4
- _____ / 50

Testliste 20:

1. Alle Kinder mussten aufs Land. _____ / 5
 2. Schon bald sind wir zu Hause. _____ / 6
 3. Überquere die Straße vorsichtig. _____ / 4
 4. Achte auf die Autos. _____ / 4
 5. Mein Arzt empfahl dringend Bäder. _____ / 5
 6. Alles andere bleibt für später. _____ / 5
 7. Guten Morgen, meine Damen und Herren. _____ / 6
 8. Die Braut war festlich geschmückt. _____ / 5
 9. Der Mann hatte alles Geld ausgegeben. _____ / 6
 10. Alle Kinder essen gern Eis. _____ / 5
- _____ / 51

8.2 Anzahl an Wörtern pro Satz im Göttinger Satztest

Testliste	Satz 1	Satz 2	Satz 3	Satz 4	Satz 5	Satz 6	Satz 7	Satz 8	Satz 9	Satz 10	Summe
1	4	5	5	4	5	5	6	4	7	5	50
2	6	5	5	4	5	4	6	5	5	5	50
3	4	7	5	5	6	5	4	5	5	4	50
4	4	5	6	5	5	6	5	5	5	4	50
5	5	5	5	6	5	6	5	5	5	4	51
6	4	6	6	5	5	5	5	6	4	5	51
7	5	5	5	7	5	5	7	5	3	4	51
8	6	5	4	6	5	4	3	5	7	6	51
9	6	4	6	5	4	6	5	4	5	5	50
10	5	5	4	5	5	6	5	5	4	6	50
11	7	5	5	6	4	4	6	5	4	4	50
12	6	5	5	5	4	6	5	6	5	4	51
13	5	6	5	6	5	4	5	6	6	4	52
14	5	5	4	6	5	5	6	5	5	5	51
15	5	4	5	4	6	5	5	5	6	5	50
16	6	4	7	4	4	5	5	5	5	5	50
17	6	5	5	5	5	4	5	5	5	6	51
18	5	4	5	6	5	5	5	5	5	6	51
19	6	5	3	4	7	5	4	6	6	4	50
20	5	6	4	4	5	5	6	5	6	5	51

Tabelle 15: Anzahl an Wörtern pro Testliste und Satz bei dem Göttinger Satztest.

8.3 Anzahl der durchgeführten Messungen pro Testbedingung

SV [%]	SNR [dB]													
	-13	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
88-9000	5	5	5	5	6	9	8	9	8	9	9	10	14	14
88-142														
88-225														
88-355											1		1	5
88-560							8	8	9	8	8	8	8	8
88-900			4			8	8	9	8	9	8	8	8	8
88-1420			5			8	8	8	8	8	8	8	8	8
88-2250			5			8	8	8	8	8	8	8	8	9
88-3550		5				8	8	8	8	8	8	8	8	9
355-9000			1			5			8	8	9	8	8	9
560-9000						5		5	5	5		8	8	8
900-9000							5		5	5		5		3
1420-9000				4		5		5		5		5		5
2250-9000								1			5		5	
3550-9000														
5600-9000														

SV [%]	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
88-9000			4											
88-142										1	2			
88-225	1		2	3	5	3								
88-355	3	4	5									3		
88-560	8				5				5					
88-900			5			5			5					6
88-1420			5						6					6
88-2250			5						4					3
88-3550			5						4					
355-9000	8	8	8			5			4					
560-9000	8	8	8	8	8	8			4			4		
900-9000	5			8	8	8	8	8	8	8	8	8		
1420-9000			5			8	8	8	8	8	8	8	8	8
2250-9000	5		5		5	5		5			8	8	8	8
3550-9000		2			5		5	5		6	6		5	5
5600-9000			2					5		3	5	4	4	6

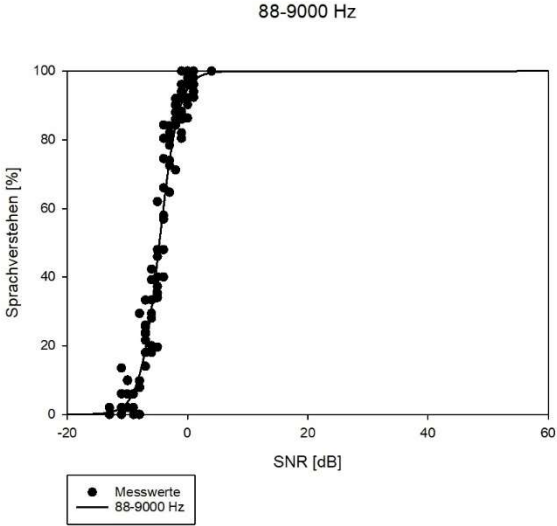
SV [%]	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
88-9000														
88-142														
88-225														
88-355										3				
88-560	6						6					7		
88-900					6					5				
88-1420					6					5				
88-2250														
88-3550														
355-9000														
560-9000		2												
900-9000	2	1						1						
1420-9000		5			4	1				4				
2250-9000	8	8	8	8	8			4	1				3	
3550-9000			8	8	8	9	8	8	8	8	8			
5600-9000	5			5			8	8	9	8	8	8	8	8

SV [%]					
Bandbreite [Hz]	30	33	43	44	45
88-9000					
88-142					
88-225					
88-355			3		
88-560		6			
88-900		5			
88-1420					
88-2250					
88-3550					
355-9000					
560-9000					
900-9000					
1420-9000				4	
2250-9000	5				
3550-9000		5		3	3
5600-9000	8				

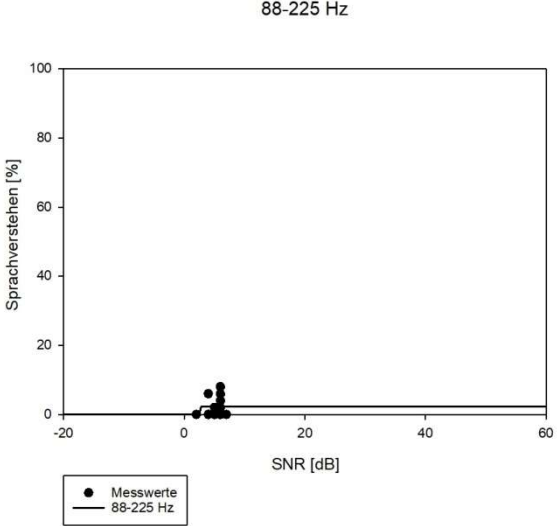
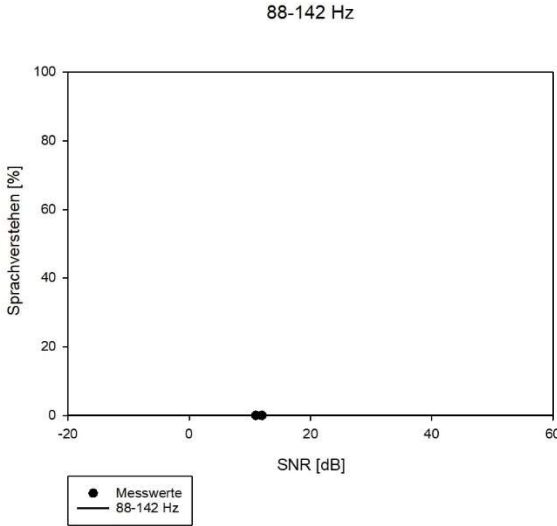
Tabelle 16: Anzahl durchgeführter Messungen pro Testbedingung.

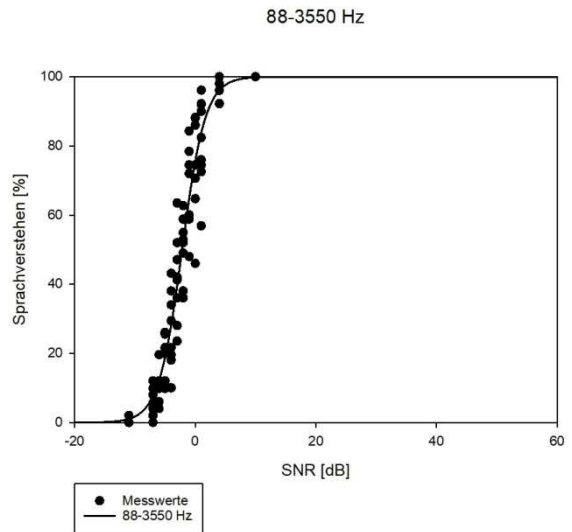
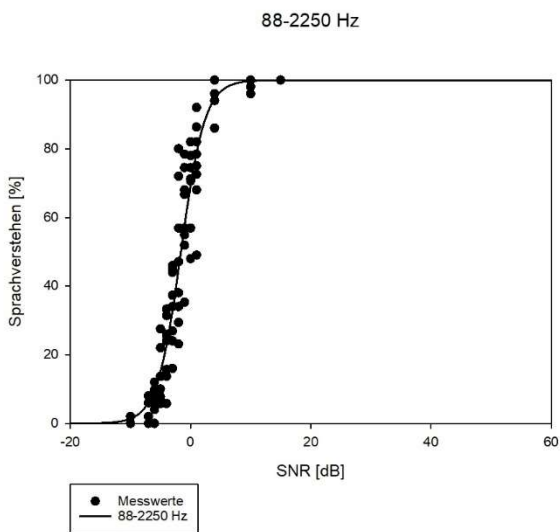
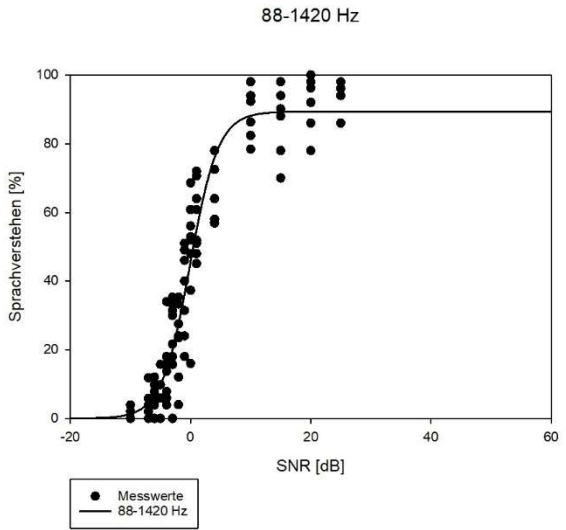
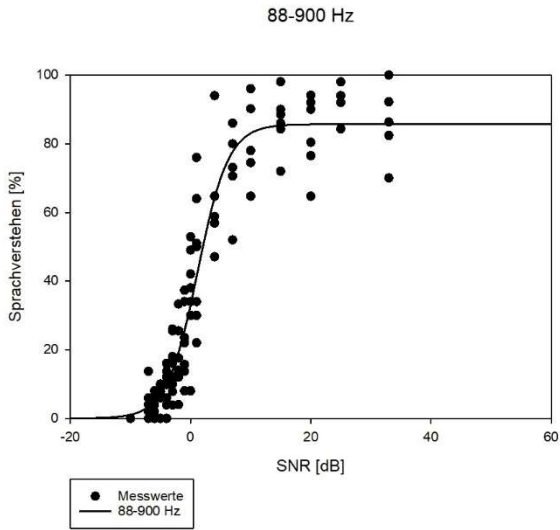
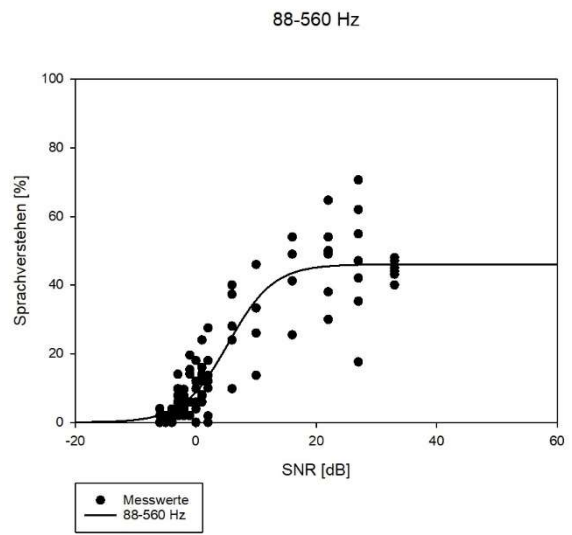
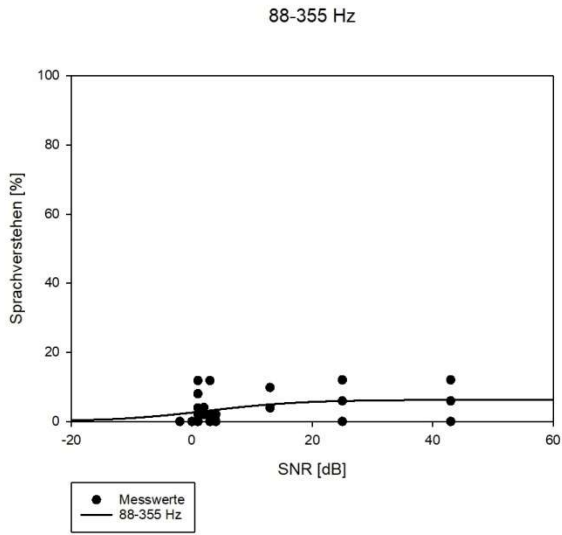
8.4 SNR abhängige Diskriminationsfunktionen

Breitbandbedingung:

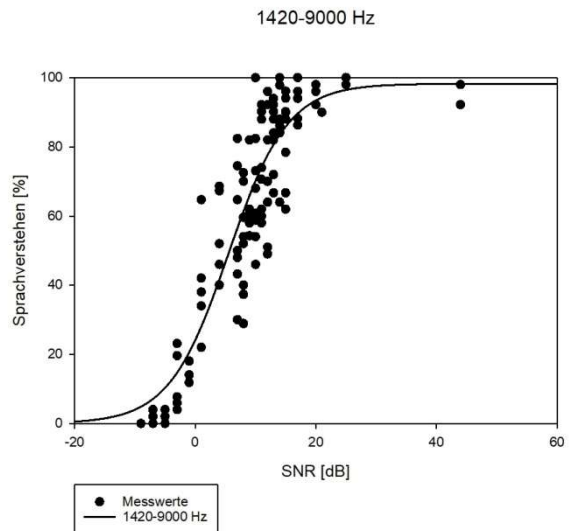
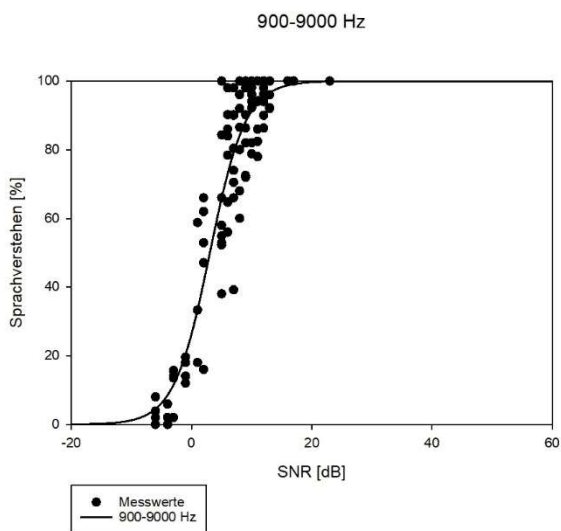
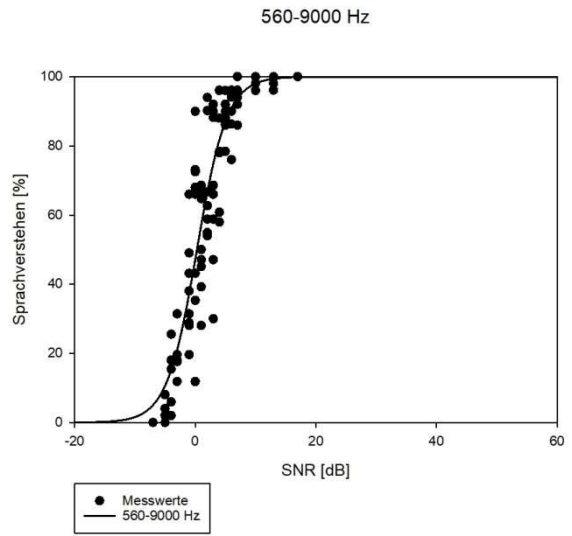
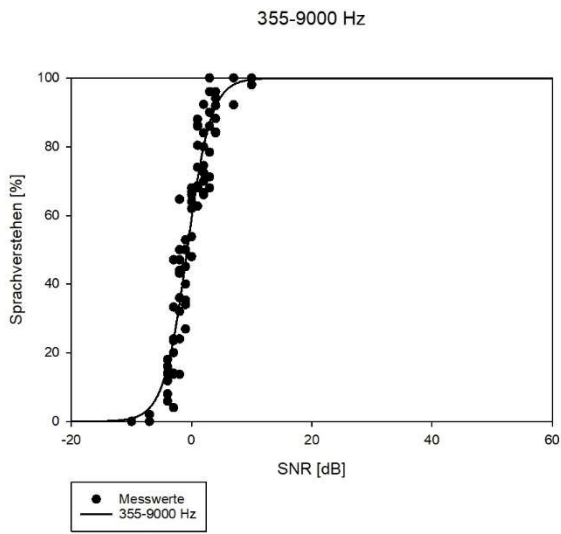


Tiefpässe:

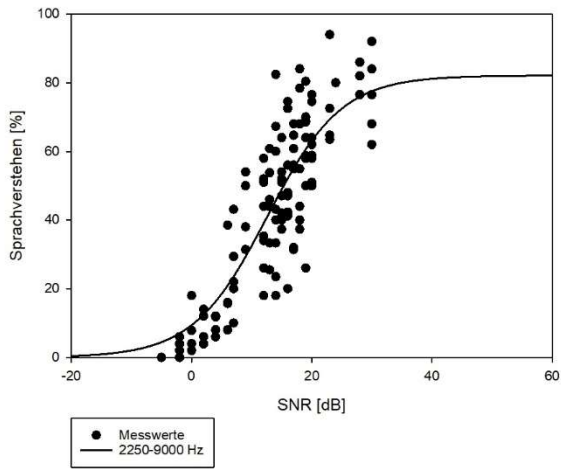




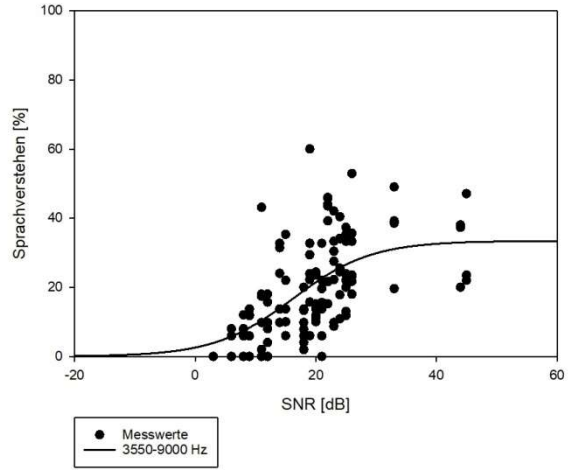
Hochpässe:



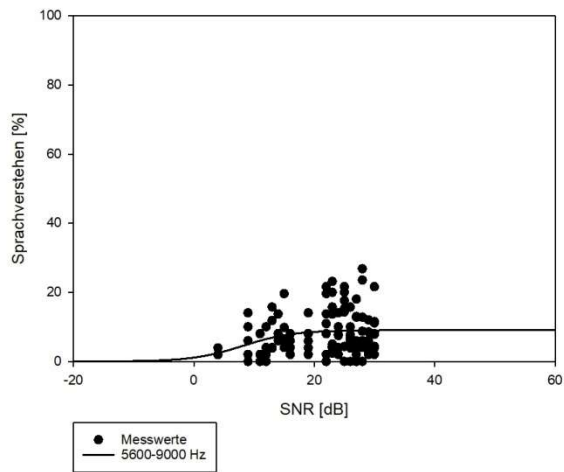
2250-9000 Hz



3550-9000 Hz



5600-9000 Hz



8.5 Verwendete Geräte und Programme

- Kopfhörer Sennheiser HDA200
- Pegelmessung am Bruel&Kjaer 4153- Ohrsimulatorkuppler
- Audiometer Astera GN-Otometrics
- Filterung mittels FFT-Filters des Programms Adobe Audition (Version 3)
- Sigmaplot 13.0
- QuickCalcs Outlier Calculator GraphPad Software
(<https://www.graphpad.com/quickcalcs/Grubbs1.cfm>)
- GeoGebra
- Microsoft Excel
- Microsoft Word

9 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Insbesondere habe ich nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeit erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Regensburg, den 04.11.2020

Sonja Bauer

10 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Thomas Steffens für die Überlassung des Themas und die engagierte und intensive Betreuung, die ich in den vergangenen Jahren erfahren durfte. Von ganzem Herzen danken möchte ich auch meinen Eltern, für ihre bedingungslose und fortwährende Unterstützung auf meinem beruflichen und privaten Lebensweg. Vor allem möchte ich meinem Mann danken, der mir in den letzten Jahren nicht nur eine emotionale Stütze war, sondern mir auch bei mathematischen Fragen stets mit Rat und Tat beiseite stand.

Außerdem wäre ohne die Teilnahme der zahlreichen Probanden sowie der Unterstützung der Audiologie der Universität Regensburg diese Arbeit nicht möglich gewesen. Vielen Dank dafür.