

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  
und der Transferfunktion zur Vorhersage der Sprachverständlichkeit auf der Basis  
des Hörbarkeitsindex AI für das Sprachmaterial des Freiburger  
Sprachverständlichkeitstests

Inaugural - Dissertation  
Zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Nina Bauer

2022



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  
und der Transferfunktion zur Vorhersage der Sprachverständlichkeit auf der Basis  
des Hörbarkeitsindex AI für das Sprachmaterial des Freiburger  
Sprachverständlichkeitstests

Inaugural - Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Medizin

der  
Fakultät für Medizin  
der Universität Regensburg

vorgelegt von  
Nina Bauer

2022

Dekan:	Prof. Dr. Dirk Hellwig
1. Berichterstatter:	PD Dr. biol hom. Thomas Steffens
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. med. Berthold Langguth
Tag der mündlichen Prüfung:	12.01.2022

für meinen Vater Stefan

*Was wir wissen, ist ein Tropfen; was wir nicht wissen, ein Ozean.*

Sir Isaac Newton

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	12
1.1 Die Bedeutung der Sprache für das menschliche Leben	12
1.2 Das psycholinguistische Modell der Sprachwahrnehmung	12
1.3 Bedarf eines Verfahrens zur rechnerischen Bestimmung von Sprachverständlichkeit	17
1.4 Funktionsprinzip und Berechnung des Artikulationsindex (AI)	18
1.5 Funktionsprinzip und Berechnung des Speech Intelligibility Index (SII)	20
1.6 Transferfunktionen	22
1.7 Auswirkung passend gewählter Wichtigkeits- und Transferfunktion auf die Genauigkeit der Sprachverständlichkeitsberechnung	22
1.8 Der Freiburger Sprachverständlichkeitstest	24
1.9 Ziel dieser Studie	28
2. Material und Methoden	29
2.1 Versuchspersonen	29
2.2 Sprachmaterial	29
2.3 Durchführung der Sprachverständlichkeitsmessungen	32
2.4 Behandlung von Ausreißern	32
2.5 Fitfunktionen zur Anpassung der Verständlichkeitsdaten	33
2.5.1 Fittingmethode mit einer logistischen Funktion	33
2.5.2 Fitting mit der Gompertz-Funktion	34
3. Ergebnisse	35
3.1 Messergebnisse der Sprachverständlichkeit	35
3.2 Diskriminationsfunktionen	35
3.2.1 SNR-abhängige Diskriminationsfunktionen	35
3.2.2 Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen	43
3.3 Relative Transferfunktion	48
3.4 Frequenz-Wichtigkeits-Funktionen	52
3.4.1 Wichtigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Filtergrenzfrequenz und des SNR	52

3.4.2	Wichtigkeitsfunktionen für das AI- und SII-Verfahren	65
3.4.2.1	Wichtigkeitsfunktion für Terzbänder	66
3.4.2.2	Bänder gleicher Wichtigkeit	69
3.4.2.3	Wichtigkeitsfunktion für Bänder mit beliebigen unteren und oberen Grenzfrequenzen $f_{iu}$ und $f_{io}$	71
3.4.2.4	Wichtigkeitswerte für Oktav- und Terzbänder	72
3.5	Absolute Transferfunktion	73
4.	Diskussion	78
4.1	Vergleich der Diskriminationsfunktionen	78
4.2	Vergleich der Frequenz-Wichtigkeitsfunktionen	86
4.3	Vergleich der Transferfunktionen	90
5.	Fazit und Ausblick	96
6.	Literatur	97
7.	Anhang	101
7.1	Anzahl der Messungen pro Testbedingung	101
7.2	Messwerte der Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit von Filterbandbreite und SNR	103
7.3	Vergleich der Fittingmethoden der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen	105
	Danksagung	
	Curriculum vitae	

## Abkürzungsverzeichnis

a	Maximale Sprachverständlichkeit
Abb	Abbildung
AI	Artikulationsindex
ANSI	American National Standard Institute
b	Steilheitsparameter
BIF	Band-Importance-Function, (Frequenz-)Wichtigkeitsfunktion, I(i)
BMAS	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
dB	Dezibel
CI	Cochlea-Implantat
CID-W1	Central Institute for the Deafs Auditory Test W1
CID-W22	Central Institute for the Deafs Auditory Test W-22
CST	Connected Speech Test
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRT	Diagnostic Rhyme Test
ELU	Ease of Language Understanding Model
$f_i$	Grenzfrequenz eines Frequenzbandes i
$f_{iu}$	Untergrenze eines Frequenzbandes i
$f_{io}$	Obergrenze eines Frequenzbandes i
$f_{mi}$	Mittenfrequenz eines Frequenzbandes i
GdB	Grad der Behinderung
GdS	Grad der Schädigungsfolgen
HNO	Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde
Hz	Hertz
i	Frequenzband-Index

I	Wichtigkeit, Importance
I(i)	Wichtigkeit des Frequenzbandes i, Band-Importance-Function, BIF
I(f <sub>i</sub> )	Wichtigkeit in Abhängigkeit der Frequenzbandgrenzen
I(f <sub>m</sub> <sub>i</sub> )	Wichtigkeitsfunktion in Abhängigkeit der Mittenfrequenz der Terzbänder
K	Korrekturwert des Rauschpegels an die Sprachdynamik
L <sub>50</sub>	Sprachpegel korrespondierend zu 50% Sprachverständlichkeit
L <sub>eq</sub>	Energieäquivalenter Dauerschallpegel
L <sub>Neq</sub>	Energieäquivalenter Dauerschallpegel des Störgeräusches
L <sub>Seq</sub>	Energieäquivalenter Dauerschallpegel der Sprache
m	Steigung
MdE	Minderung der Erwerbsfähigkeit
ms	Millisekunden
N	Rauschpegel
n	Anzahl der Frequenzbänder
NU6	Northwestern University Auditory Test No.6
P	Proficiency Faktor
PB-50	Phonetically balanced Words
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß zur Angabe der Anpassungsgüte der Fittingfunktion
r	Regressionskoeffizient zur Angabe der Anpassungsgüte der Fittingfunktion
RMS	Root Mean Square, Quadratischer Mittelwert
S.	Seite
SII	Speech Intelligibility Index
SNR	Signal-to-Noise-Ratio, Signal-Geräusch-Abstand, Signal-Rausch-Verhältnis
SP	Speech Peaks, Sprachpegelspitzenwerte
SPIN	Speech Perception in Noise

SPIN-PH	Speech Perception in Noise, Predictability high
SPIN-PL	Speech Perception in Noise, Predictability low
SPL	Sound Pressure Level
SP/N	Effective Speech Peak to Noise Ratio
SRT	Speech Recognition Threshold, Sprachverständlichkeitsschwelle
SV	Sprachverständlichkeit
TF	Transferfunktion
TF(AI)	Transferfunktion in Abhängigkeit des AI
TF(SII)	Transferfunktion in Abhängigkeit des SII
Tab	Tabelle
$x_0$	Wendepunkt
W(i)	Weighting-Function, Gewichtungsfunktion

## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Akustisches Terzpegelspektrum des Freiburger Einsilbertests bei freifeldentzerrter Kopfhörerausgabe
- Abb. 2 Akustisches Terzpegelspektrum des sprechersimulierenden Rauschens bei freifeldentzerrter Kopfhörerausgabe
- Abb. 3 Logistische Diskriminationsfunktion der Breitbandpräsentation in Abhängigkeit des SNR [dB]
- Abb. 4 Logistische Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Tiefpassfilterungen
- Abb. 5 Logistische Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Hochpassfilterungen
- Abb. 6 Mit der Gompertz-Funktion als Modellfunktion erstellte Diskriminationsfunktion der Breitbandpräsentation in Abhängigkeit des SNR [dB]
- Abb. 7 Mit der Gompertz-Funktion als Modellfunktion erstellte Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Tiefpassfilterungen
- Abb. 8 Mit der Gompertz-Funktion als Modellfunktion erstellte Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Hochpassfilterungen
- Abb. 9 Werte der Sprachverständlichkeit SV [%] aufgetragen gegen die Grenzfrequenz  $f_i$  [Hz]
- Abb. 10 Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen, erstellt mit der logistischen Fittingmethode
- Abb. 11 Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen  $SV_{HP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{TP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{HP}(SNR_{AI0,5})$  und  $SV_{TP}(SNR_{AI0,5})$  zur Ermittlung der SV [%] korrespondierend zu 0,5 AI und 0,25 AI
- Abb. 12 Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen  $SV_{HP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{TP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{HP}(SNR_{AI0,5})$  und  $SV_{TP}(SNR_{AI0,5})$  zur Ermittlung der SV [%] korrespondierend zu 0,75 AI
- Abb. 13 Relative Transferfunktion für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests
- Abb. 14 Kumulativ aufgetragene frequenzabhängige AI-Werte bei Tiefpassfilterung
- Abb. 15 Kumulativ aufgetragene frequenzabhängige AI-Werte bei Hochpassfilterung

- Abb. 16 SNR-spezifische Bandwichtigkeiten jeweils gemittelt aus den Wichtigkeitswerten für Hochpass- und Tiefpassfilterung, aufgetragen nach Mittenfrequenz  $f_{m_i}$  [Hz] der 20 Terzbänder
- Abb. 17 Wichtigkeitsfunktion  $I(f_{m_i})$  für den Freiburger Einsilbertest, gemittelt über verschiedene Hörbedingungen, aufgetragen nach Mittenfrequenz  $f_{m_i}$  [Hz] der  $i$  Terzbänder
- Abb. 18 Kumulative Wichtigkeitsfunktion  $I(f_i)$  für den Freiburger Einsilbertest
- Abb. 19 Bandbreiten der Bänder gleicher Wichtigkeit von 0,05
- Abb. 20 Frequenzverteilung der Wichtigkeit (Sprachinformationsanteile) für Oktav- und Terzbänder.
- Abb. 21 RMS-Werte in Abhängigkeit des iterativ berechneten Korrekturwerts  $K$  [dB] für die Erstellung der absoluten Transferfunktion
- Abb. 22 Absolute Transferfunktion für den Freiburger Einsilbertest mit den gemessenen Werten der Sprachverständlichkeit.
- Abb. 23 Wichtigkeitsfunktionen für vier SNR-Gruppen, gemittelt jeweils aus den Hochpass- und Tiefpasswerten für jeweils drei SNR-Bedingungen
- Abb. 24 Wichtigkeitsfunktionen verschiedener Einsilbertests im Vergleich
- Abb. 25 Vergleich der Wichtigkeitsfunktionen verschiedener Sprachmaterialien mit der des Freiburger Einsilbertests: sinnlose Silben, fließende Konversation, Fließtext
- Abb. 26 Vergleich der absoluten Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests mit den Transferfunktionen anderer Sprachmaterialien mit mehr Kontext
- Abb. 27 Vergleich der absoluten Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests mit denen anderer Einsilbertests

## Tabellenverzeichnis

- Tab. 1 Liste 1 aus dem Freiburger Sprachverständlichkeitstest für Einsilber
- Tab. 2 Filterbandbreiten der Sprachsignalfilterung
- Tab. 3 Funktionsparameter und SRTs (für  $a > 50\%$ ) der logistischen SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen
- Tab. 4 Funktionsparameter und SRTs (für  $a > 50\%$ ) der mit der Gompertz-Funktion erstellten SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen
- Tab. 5 Tiefpassfilterung: Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit von Bandbreite und SNR
- Tab. 6 Hochpassfilterung: Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit von Bandbreite [Hz] und SNR [dB]
- Tab. 7 Parameter der frequenzabhängigen Diskriminationsfunktionen
- Tab. 8 Wertepaare für die graphische Methode nach French und Steinberg: Werte der SV [%] korrespondierend zu einem AI von 0,5; 0,25; 0,125 und 0,0625.
- Tab. 9 Funktionsparameter der relativen Transferfunktion
- Tab. 10 Kumulative AI-Werte in Abhängigkeit von Frequenz [Hz] und SNR [dB]
- Tab. 11 Funktionsparameter der kumulativen Wichtigkeitsfunktionen
- Tab. 12 Wichtigkeit I der  $i=20$  Terzbänder, innerhalb der entsprechenden SNR [dB]
- Tab. 13 Wichtigkeiten  $I(f_{mi})$  der  $i$  Terzbänder nach Mittenfrequenz  $f_{mi}$  [Hz] und deren kumulierte Werte über alle Terzbänder.
- Tab. 14 Funktionsparameter der Wichtigkeitsfunktion  $I(f_i)$  für den Freiburger Einsilbertest
- Tab. 15 Untere und obere Grenzfrequenzen sowie Bandbreiten [Hz] der 20 Bänder gleicher Wichtigkeit in Höhe von 0,05 AI für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests
- Tab. 16 Wichtigkeit von Oktav- und Terzbändern als bandspezifische Sprachinformationsanteile zur Verwendung im AI- und SII-Verfahren.
- Tab. 17 Funktionsparameter und RMS-Werte der vorläufigen absoluten Transferfunktionen
- Tab. 18 Funktionsparameter der absoluten Transferfunktion

- Tab. 19 Maximale Steigung [%/dB] und SRT [dB SNR] der Diskriminationsfunktionen verschiedener Sprachmaterialien im Störgeräusch.
- Tab. 20 Die Crossover Frequenz [Hz] des Freiburger Einsilbertests im Vergleich mit Werten verschiedener Sprachmaterialien
- Tab. 21 Funktionsparameter der Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests im Vergleich mit Werten verschiedener Sprachmaterialien
- Tab. 22 Anzahl der Messungen pro Testbedingung
- Tab. 23 Messwerte der prozentualen Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit der Bandbreite [Hz] und des SNR [dB]
- Tab. 24 Ergebnis des Mann-Whitney Rank Sum Test zum Vergleich der Fittingmethoden der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen

# 1. Einleitung

## 1.1 Die Bedeutung der Sprache für das menschliche Leben

Gespräche und Sprache sind im alltäglichen Zusammenleben essentiell für den Informationsaustausch. Darüber hinaus vermittelt der Sprecher aber auch seine Emotionslage und beeinflusst die des Hörers (1, S.2). Ebenso werden Aufforderungen oder Bitten durch Sprache an den Hörer herangetragen und durch Sprache entsteht letztlich auch eine soziale Gesamtsituation wie z.B. Abgrenzung oder Gemeinsamkeit. Sprache ist eine wesentliche Grundlage persönlicher Entfaltung, familiärer und freundschaftlicher Beziehungen sowie der Freizeitgestaltung (1, S.2). Zusätzlich ist sie das zentrale Instrument zur Vermittlung von Wissen in Aus- und Weiterbildung und daher in der Schule und am Arbeitsplatz von herausragender Bedeutung (1, S.2). Auf der Basis von Sprache kann der Mensch seine Kommunikation in sehr vielfältiger und differenzierter Art und Weise ausüben. Daher ist Sprachproduktion und Sprachwahrnehmung zum Informationsaustausch sowie auch in sozialer und kultureller Hinsicht essentiell für den Menschen.

## 1.2 Das psycholinguistische Modell der Sprachwahrnehmung

In der Psycholinguistik werden bei der Beschreibung von Sprachwahrnehmung mehrere Analyseebenen unterschieden. Es wird angenommen, dass beim Hören von Sprache phonetische, lexikalische, grammatikalische und inhaltliche Faktoren Einfluss auf die Verarbeitung innerhalb des Sprachsystems nehmen (1, S.426). Dabei geht man in der Psycholinguistik davon aus, dass die Analyseebenen hierarchisch geordnet sind, wobei die phonetische die unterste und die semantisch-inhaltliche Ebene die oberste Ebene darstellt. (1, S.426). Auf der phonetischen Ebene wird Information in Form von Schallwellen zum Hörer übertragen und im Innenohr in neuronale Impulse umgewandelt. Hiermit wird die Grundlage in Form von noch unbewerteter hörbarer Information geschaffen (2, S.678). In den oberen Ebenen wird die hörbare Information dann zugeordnet und mit im Gehirn gespeicherten Mustern abgeglichen, sodass letztlich aus den vorhandenen Alternativen eine Auswahl getroffen wird und ein bestimmtes Wort oder ein bestimmter Laut erkannt wird. (1, S.67). Im Prozess der Sprachwahrnehmung steht nach dem Durchlaufen dieser Ebenen am Ende ein

Sprachteil, den der Hörer glaubt, verstanden zu haben und dessen Richtigkeit anschließend überprüft werden kann. Der Anteil der richtig verstandenen Sprachanteile an den insgesamt präsentierten, die prozentuale Sprachverständlichkeit, ist experimentell messbar. Die Bedeutung verschiedener Analyseebenen für die resultierende prozentuale Sprachverständlichkeit konnte in der Vergangenheit experimentell nachgewiesen werden (1, S.426-436). Ebenso wurden Einflussfaktoren auf die phonetischen, lexikalischen und grammatikalisch-inhaltlichen Faktoren der Sprache, die sich auf der jeweiligen Ebene auf die Gesamtsprachverständlichkeit auswirken, eruiert.

Auf die phonetischen Faktoren der Sprache, die auf der untersten Ebene des Sprachsystems für die Bedeutungsunterscheidung ausschlaggebend sind, wirkt sich eine Störung der Übertragung der sprachlichen Mitteilung durch Geräusche aus (3–6). Durch Störgeräusche kann nicht mehr alle Information in Form von Schallwellen die Haarzellen im Innenohr erreichen, da die Anteile der Sprache, die einen geringeren Pegel als das Störgeräusch aufweisen, vom Störgeräusch maskiert, d.h. überdeckt, werden. Dieses Fehlen von Information kann von den hierarchisch höheren Ebenen je nach Gesamtsituation bis zu einem gewissen Punkt ausgeglichen werden (7, 8), darüber hinaus schlägt es sich in einer Abnahme der Sprachverständlichkeit nieder. Auch das Vorhandensein oder Fehlen bestimmter spektraler Informationsanteile, wenn Sprache über Lautsprecher mit begrenzter Frequenzbandbreite präsentiert wird, wirkt sich auf die phonetischen Faktoren, die für die unterste Ebene des Sprachsystems entscheidend sind, aus (3, 4). Auch hier kann ein Sprachinformationsmangel in bestimmten Fällen noch durch lexikalische Prozesse von den nachfolgenden Ebenen ausgeglichen werden (7, 8). Andernfalls resultiert unweigerlich eine Abnahme der Sprachverständlichkeit und des darauf aufbauenden Sprachverstehens, was die Bedeutung der phonetischen Faktoren der Sprache und ihre Auswirkung auf der untersten Analyseebene des auditorischen Sprachanalyseystems zeigt.

Die Auswirkung der lexikalischen Faktoren der Sprache auf die Sprachverständlichkeit wurde gut in einer Arbeit von Miller aufgezeigt (9). Es konnte gezeigt werden, dass sprachliche Reize, die im Kontext einer bedeutungsvollen Mitteilung stehen, mit höherer Wahrscheinlichkeit erkannt werden und die Bedeutung der Sprachäußerung verstanden wird als Reize ohne kontextuelle Einbindung. Sinnlose Silben konnten

beispielsweise bei gleicher phonetischer Bedingung deutlich schlechter identifiziert werden als einsilbige Wörter. Des Weiteren konnten dieselben Wörter im Kontext eines Satzes deutlich besser identifiziert werden als einzeln. Vergleicht man weitere Studien (7, 8, 10), so wird deutlich, dass unter schwierigen Hörbedingungen (niedriger Sprachpegel, Störgeräusche) isoliert präsentierte einsilbige Wörter schlechter zu identifizieren sind als mehrsilbige Wörter (11). Einzelpräsentierte Wörter werden wegen des fehlenden Kontexts tendenziell schlechter wiedererkannt als die Wörter in ganzen grammatikalisch korrekten Sätzen und die Sprachverständlichkeit einzelpräsentierter Sätze ist wiederum geringer als die von Fließtext mit einem thematisch sinnvollen Zusammenhang zwischen den Sätzen. Variiert man die Länge des Satzes, von dem ein Zielwort kontextuell umgeben ist und misst die Sprachverständlichkeit unter schwieriger Hörbedingung, so zeigt sich, dass längere Sätze das Verstehen des Zielwortes im Vergleich zu umgebenden Sätzen mit weniger Worten erleichtern (12). Je mehr zusätzliche Information der Hörer zu dem zu identifizierenden Reiz hat, desto besser wird also dessen Verständlichkeit auch bei eingeschränkter phonetischer Hörbedingung.

Miller konnte 1951 ebenfalls zeigen, dass für die Einzelwortverständlichkeit der Stichprobenumfang, aus dem das Vokabular stammt, entscheidend ist. Die Versuchspersonen hatten in einem geschlossenen Testdesign Wortlisten vorliegen, aus denen ihnen dann Wörter präsentiert wurden. Je kürzer die Listen waren, je weniger Möglichkeiten also zur Auswahl standen, desto höher war die prozentuale Sprachverständlichkeit bei gleicher phonetischer Hörbedingung (9). In einem weiteren Experiment wussten die Probanden vor Beginn des Tests, dass sie Zahlen von 1 bis 9 präsentiert bekommen. Hier zeigte sich die Sprachverständlichkeit deutlich besser als für einsilbige Wörter (9). Die Information, dass es sich um Zahlen handelte, war vergleichbar mit einer Einschränkung des Testvokabulars durch eine Liste. Insofern stellt das Wissen des Hörers, nur Wörter aus einem bestimmten Themengebiet präsentiert zu bekommen, einen weiteren Einflussfaktor auf die lexikalische Ebene des Sprachsystems dar.

Bei uneingeschränkter Auswahl an Lösungsmöglichkeiten stehen dem Hörer viele Alternativen in Form von ähnlich klingenden Wörtern, die er im Laufe seines Lebens erlernt hat, zur Auswahl. Die Sprachverständlichkeitsschwelle für diese Wörter ist jedoch nicht immer gleich hoch. Entscheidend ist hier die Auftretens- beziehungsweise

Benutzungshäufigkeit der präsentierten Wörter in der Umgangssprache. Howes fand eine Abnahme der Sprachverständlichkeitsschwelle um 4,5 dB bei einer Verzehnfachung der Worthäufigkeit in der Umgangssprache oder einem vorgegebenen Text (11). Häufig gehörte und benutzte Wörter werden also bei gleicher Hörbedingung besser verstanden als seltene und ein Informationsausfall auf phonetischer Ebene kann im Fall besser bekannter Worte durch höhere lexikalische Ebenen besser kompensiert werden. Pollack errechnete bei unbekanntem Sprachmaterial einen Abfall der Schwelle von 1,9 dB pro Verzehnfachung der Worthäufigkeit (13). Savin überprüfte den Effekt der Worthäufigkeit auf die Sprachverständlichkeitsschwelle und stellte zusätzlich fest, dass häufig gehörte und benutzte Wörter von den Probanden auch als falsche Antwort öfter gegeben wurden als seltene (14). Die Hörer wählten in ihrem Sprachverständlichkeitsprozess aus den im Laufe ihres Lebens erlernten Wörtern generell also öfter häufig gehörte und benutzte Wörter aus. Auf neuronaler Ebene wird im Prozess des Sprachverstehens auf der Basis der hörbaren phonetischen Information die Entscheidung für die Identifikation eines Wortes aus den im rezeptiven Wortschatz des Langzeitgedächtnisses abgespeicherten Wörtern getroffen. Hierbei wird durch einen Vergleich der Muster der akustischen Merkmale eines gehörten Wortes mit den akustischen Mustern der erlernten ähnlichen Alternativen ein Wort ausgewählt und den nachfolgenden Prozessen der Wahrnehmung und des Sprachverstehens zugeführt. Häufig gehörte Wörter werden hierbei aufgrund der stärkeren synaptischen Verknüpfungen im Gedächtnis mit höherer Wahrscheinlichkeit ausgewählt als seltene. Die Wahrscheinlichkeit, das richtige Wort aus den gespeicherten Alternativen auszuwählen steigt ebenfalls, wenn es nur wenige Alternativen gibt. Dieser Prozess wurde von Luce und Pisoni genauer untersucht und in ihrem „Neighbourhood-Activation-Modell“ in ein generelles Konzept der Wortidentifikation eingebettet (15).

Grammatikalisch-semantische Faktoren der Sprache, die die Basis für das inhaltliche Verstehen, der Bedeutung einer Sprachbotschaft darstellen, beeinflussen die oberste Ebene des auditorischen Sprachanalyse-systems beim Vorgang der Sprachwahrnehmung. Miller stellte fest, dass die gleichen Wörter in einen sinnvollen Satz eingefügt deutlich besser identifiziert werden konnten als bei isolierter Einzelpräsentation (9). Bell zeigte einen Effekt des semantischen Inhalts des umgebenden Satzes. Um die Zielwörter wurden einerseits Sätze, die viel Rückschluss

auf das Zielwort zuließen, konstruiert. Andererseits wurden die Zielwörter in Sätze eingebettet, die möglichst wenig Rückschluss auf das Zielwort zuließen. Erwartungsgemäß wurden dieselben Wörter in dem Kontext mit viel Rückschlussmöglichkeit deutlich besser erkannt (16). Inhaltliche Information scheint sich hier ähnlich einer Verringerung des zur Auswahl stehenden Vokabulars beim Abgleich des Gehörten mit den im Laufe des Lebens erlernten Lautmustern der einzelnen Wörter auszuwirken (9). Bei einer geringeren Anzahl an zur Auswahl stehenden Lautmustern kann bei gleichen sonstigen Hörbedingungen eine größere Sprachverständlichkeit erzielt werden und auch Informationsausfall auf der phonetischen Ebene kompensiert werden. Miller interpretiert dies im Sinne der Theorie der Übergangswahrscheinlichkeiten von Wörtern in einem Satz. (1, S.431). Hierbei geht er davon aus, dass ein Hörer sein Wissen über die Abfolge von Sprachereignissen, das er zu einem früheren Zeitpunkt erworben hat, zur Orientierung einsetzt. Der Hörer schließt von dem bereits gehörten Satzteil auf das noch Folgende. Gute Beispiele aus Alltagsgesprächen sind Redewendungen (z. B. „Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm“). Miller führt hier als zugrundeliegendes Prinzip zunächst die erlernte Häufigkeit gemeinsam vorkommender Wörter an (9), widerspricht dem selbst aber später und macht das Wissen um die Regeln für den Aufbau von Sprache, also die Grammatik, verantwortlich (17). Allerdings könnte auch das sukzessive Erfassen der Sprachbotschaft, das Sprachverstehen zur Vorhersage und Fehlerkorrektur einzelner Wörter verwendet werden und den beobachteten Effekt erklären. Ein aktuelles Modell auf der Grundlage des permanenten dynamischen Erfassens der lexikalischen Faktoren und der Satzsemantik während des Hörens der fließenden Sprache und des sofortigen Abgleichs der daraus hergeleiteten Bedeutung als Grundlage für eine interne a priori Prognose der nachfolgenden, noch nicht ausgesprochenen Wörter eines Satzes oder eines Gespräches, stellt das Ease of Language Understanding (ELU) Model von Rönneberg et al. dar (18).

Insgesamt ist zu beachten, dass die Sprachverständlichkeit und das Sprachverstehen einen sehr komplexen Prozess darstellen, auf den verschiedenste Faktoren von der Hörbarkeit akustischer Einzelelemente bis zu kognitiven Leistungen des Verstehens Einfluss nehmen.

### 1.3 Bedarf eines Verfahrens zur rechnerischen Bestimmung von Sprachverständlichkeit

Die prozentuale Sprachverständlichkeit in einer bestimmten Situation ist, wie oben bereits erwähnt, als Endergebnis von akustischen Bedingungen, neuronaler Verarbeitung und kognitiver Leistung des Hörers empirisch messbar, indem einem Probanden Sprachmaterial präsentiert wird. Die korrekte Sprachverständlichkeit kann dann beispielsweise durch anschließendes Nachsprechen des Gehörten durch den Probanden oder sprachfreiem Auswählen aus vorgegebenen Alternativen überprüft werden (1, S.30). Ein solches sprachaudiometrisches Vorgehen anhand von empirischer Messung ist jedoch stets mit großem Aufwand verbunden, da für verlässliche Werte zur Verminderung des rechnerischen Einflusses von zufälligen Fehlern auf das Testergebnis große Mengen an Testwörtern und mehrfaches Testen durchgeführt werden müssen. Beispielsweise für die Planung der akustischen Gestaltung öffentlicher Räume, wie Bahnhöfe oder Theatersäle, wäre eine große Menge an Tests erforderlich, die zudem immer erst nach abgeschlossenem Bau der Räumlichkeiten durchgeführt werden könnten. Für die architektonische Planung wäre aber eine Prognose der später resultierenden Sprachverständlichkeit von großem Vorteil. So entsteht der Bedarf nach einem mathematischen und somit theoretischen Verfahren, die Sprachverständlichkeit aus wenigen akustischen Faktoren vorherzusagen. Ebenso ist eine solche theoretische Berechnung vorteilhaft, um in der modernen Telekommunikation eine maximale Sprachverständlichkeit bei möglichst minimaler übermittelter Datenmenge zu erzielen. Insbesondere auch auf medizinischem Gebiet, z. B. in der audiologischen Diagnostik und zur Optimierung der Wirkung von Hörhilfen werden solche Berechnungsverfahren gefordert und in unterschiedlicher Form angewendet. Im Hinblick auf die Begutachtung von Schwerhörigkeit gilt die Sprachaudiometrie als unentbehrlicher Bestandteil und als die entscheidende Grundlage für die quantitative Bemessung des Hörschadens (19, S.102). Es wird geschlussfolgert, welchen Einfluss eine Hörstörung auf den Alltag des Patienten hat und wie somit die bestmögliche Versorgung aussähe. Weitgehend auf sprachaudiometrischen Methoden und damit der Sprachverständlichkeit beruhen Begutachtungen und Bewertungen von Schwerhörigkeiten in den Kategorien von MdE (Minderung der Erwerbsfähigkeit), GdB (Grad der Behinderung) und GdS (Grad der Schädigungsfolgen), so wie es in der Königsteiner Empfehlung (20) und in der

Versorgungsmedizinverordnung (21) festgelegt ist. Für diese diagnostische Einschätzung ist es für das Erkennen unplausibler Resultate oder bei Aggravation beziehungsweise Simulation von Hörstörungen sehr vorteilhaft eine Schätzung der durchschnittlich zu erwarteten Sprachverständlichkeit als Vergleichsgröße zu individuellen Testergebnissen zur Verfügung zu haben.

Hierfür wurden verschiedene Methoden entwickelt, die zu einem Großteil auf dem Artikulationsindex (AI) nach French und Steinberg basieren (3).

#### 1.4 Funktionsprinzip und Berechnung des Artikulationsindex (AI)

Sprachverständlichkeit ist in erster Linie eine Frage der Hörbarkeit der Sprachinformation auf phonetischer Ebene. Bei einem bestimmten Schallpegel hängt die Hörbarkeit der mit Sprache übertragenen Information von der Hörschwelle und von der akustischen Verdeckung des Sprachschalls durch Störgeräusche ab. Die mit dem Sprachschall zum Hörer übertragene Menge an Sprachinformation lässt sich mit Methoden erfassen, die auf objektiv messbaren akustischen Größen wie dem Sprach- und Störgeräuschpegel und dem daraus resultieren Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-noise-Ratio, SNR), sowie dem Frequenzspektrum der Sprache basieren.

Der AI unterteilt das Sprachspektrum in unterschiedliche Frequenzbänder und bewertet anschließend für jedes einzelne Frequenzband dessen Beitrag zur gesamten Sprachinformation unter optimalen Hörbedingungen und welchen Anteil davon es unter aktuellen Bedingungen, die unter Umständen die Sprachinformation vollständig oder teilweise maskierende Störgeräusche enthalten, aufweist. Diese aktuellen akustischen Bedingungen (Sprachpegel, Störgeräuschpegel) gehen als objektiv messbare Größen in den AI ein. Aus der Summe der Beiträge an Sprachinformation in den einzelnen Bändern errechnet sich der gesamte Anteil der potentiell hörbaren Sprachinformation, der AI (3) als Eingangssignal für die neuronalen und kognitiven Verarbeitungsprozesse des auditorischen Systems.

Sprach- und Störgeräuschpegel werden in der Regel als energieäquivalente Mittelungspegel über die Zeitdauer einer sprachlichen Äußerung (Dauerschallpegel) gemessen. Aus der Differenz der energieäquivalenten Dauerschallpegel der Sprache ( $L_{Seq}$ ) und des Störgeräusches ( $L_{Neq}$ ) errechnet sich der Signal-Geräusch-Abstand

(Signal-to-Noise-Ratio, SNR) sowohl in der breitbandig präsentierten Sprache als auch innerhalb eines Bandes. Je größer das SNR ist, desto größer der Anteil der Sprachbestandteile, der lauter ist als das Störgeräusch und somit hörbar wird. In der Berechnungsmethode des AI wird angenommen, dass bei einem SNR von +12 dB auch die leisesten perceptiv nutzbaren Anteile der Sprache in einem Band hörbar sind. Daher ist der Beitrag des Bandes zum AI ab diesem SNR maximal, alle Information ist potentiell hörbar. Werden die Werte des SNR kleiner, so nimmt der Anteil der Sprachbestandteile, der das Störgeräusch überragt, ab. Bei -18 dB SNR sind laut der Methode des AI auch die lautesten Spitzen der Sprache nicht mehr hörbar bzw. perceptiv nutzbar und der relative Sprachinformationsbeitrag des Bandes zum AI hat den Wert 0. Aus der potentiellen Hörbarkeit der Sprachinformation in einem Band wird des Weiteren die Wichtigkeit des Bandes für die Sprachverständlichkeit als der Anteil der gesamten Sprachinformation, der sich in dem jeweiligen Band befindet, berechnet. Bänder, die viel Sprachinformation enthalten, können unter optimalen akustischen Bedingungen mehr zur Sprachverständlichkeit beitragen als solche mit weniger Sprachinformation. Der resultierende Wert des AI quantifiziert so die potentiell hörbare Menge an Sprachinformation und berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$AI = P \sum_{i=1}^n I(i)W(i) \quad (1)$$

Der AI wird durch die algebraische Summe der Anteile der potentiell hörbaren Sprachinformation der einzelnen Frequenzbänder  $i$  errechnet. Der Anteil der Sprachinformation eines Frequenzbandes  $i$  ist das Produkt aus der Wichtigkeitsfunktion  $I(i)$  (auch als Band-Importance-Function, BIF, bezeichnet) und einer Gewichtungsfunktion  $W(i)$  (Weighting-Function) des entsprechenden Bandes. Die Wichtigkeitsfunktion  $I(i)$  stellt die Wichtigkeit eines Frequenzbandes  $i$  für die Sprachverständlichkeit dar. Sie beschreibt die Teilmenge an Sprachinformation als prozentualen Anteil an der Gesamtsprachinformation, die ein Frequenzband unter optimalen Hörbarkeitsbedingungen, also ohne Maskierung der Sprachinformation durch Störgeräusche und potentiell vollständiger Hörbarkeit im Hinblick auf die Hörschwelle, die als internes Rauschen berücksichtigt wird, zur Gesamtsprachinformation beitragen kann. Sie ist abhängig von lexikalischen, semantischen und grammatikalischen Eigenschaften des Sprachmaterials und den Stimm- und Sprechereigenschaften eines Sprechers und kann für jede Art von

Sprachmaterial und Sprecher spezifisch ermittelt werden. Das akustische Sprachsignal besteht aus einer Aneinanderreihung von unterschiedlichen akustischen Sprachbestandteilen (Lauten, Silben) und weist eine starke zeitliche Pegelschwankung auf. Die Schwankungsgrenzwerte zwischen den geringsten und größten Sprachpegeln, die während der Sprachpräsentation auftreten, werden als Sprachpegeldynamik oder kurz Sprachdynamik bezeichnet. Die Gewichtsfunktion (Weighting Function)  $W(i)$  ist der hörbare Anteil der Sprachpegeldynamik innerhalb des Bandes  $i$  der nicht von Störgeräuschen maskiert wurde und/oder oberhalb der Hörschwelle liegt. Der Faktor  $P$  (Proficiency) ist ein Maß für die Fähigkeit eines Hörers die akustisch übertragene Sprachinformation erfolgreich zu verarbeiten, bezieht also die individuellen lexikalischen, semantischen und grammatikalischen Fähigkeiten als Grundlage der Sprachverständlichkeit und des Sprachverstehens mit ein. Für muttersprachliche Normalhörende mit mindestens durchschnittlicher Sprachbegabung und ohne kognitive Einschränkungen wird er mit dem Wert 1 belegt. Unter Idealbedingungen, wenn also über das gesamte Sprachspektrum auch die leisesten Anteile der Sprache potentiell hörbar sind, ist der  $AI = 1$ . Bei vollständiger Maskierung der Sprachschallpegel oder Unhörbarkeit wird der  $AI = 0$ . Die Anzahl  $n$  der Frequenzbänder, in die ein Sprachsignal zur  $AI$ -Berechnung unterteilt wird, ist abhängig von der Gesamtbandbreite der Sprachübertragung und kann innerhalb dieser verschieden gewählt werden: Typisch sind 20 Bänder mit gleichem Beitrag zur Sprachverständlichkeit (5 % Sprachinformation pro Band) oder in Anlehnung an die Bandbreiten und Verteilung der psychoakustischen Frequenzgruppen, die ausreichend genau mit der Terz-Skala nach ISO 266 (22) angenähert werden kann und typisch 18 Terzbänder für den Sprachfrequenzbereich umfasst. Eine gröbere Auflösung wird mit sechs Oktavbändern erreicht, die mit ihrer Mittenfrequenz einigen Testfrequenzen der Tonaudiometrie entsprechen. 1969 wurden die grundlegenden Methoden und Parameter oben genannter Berechnungsverfahren durch das American National Standard Institute (ANSI) standardisiert (23).

### 1.5 Funktionsprinzip und Berechnung des Speech Intelligibility Index (SII)

Im  $AI$ -Verfahren wurde die Bedingung der Hörbarkeit von Sprachinformation lediglich mit den akustischen Eigenschaften von Sprache und Störgeräuschen und der

Tonhörschwellen gleichgesetzt. Die spezifischen kognitiven Prozesse der Sprachverständlichkeit und des darauf aufbauenden Sprachverstehens finden sich nur indirekt im Proficiency Faktor wieder. 1997 wurde das AI-Verfahren vom American National Standard Institute (ANSI) daher durch den Speech Intelligibility Index (SII) ersetzt (24). Das SII-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des AI, folgt allerdings weiterhin dem Ansatz der Additivität der akustischen Sprachinformationsanteile in verschiedenen Frequenzbändern. Wie beim AI wird das akustische Sprachsignal in einzelne Frequenzbänder unterteilt und deren spezifischer hörbarer Informationsanteil ermittelt. Die Variation der Hörbarkeit wird im SII-Verfahren ebenfalls durch das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der energieäquivalenten Dauerschallpegel des Sprachsignals ( $L_{Seq}$ ) und eines stationären Rauschens ( $L_{Neq}$ ) definiert, jedoch wurde die Lage des  $L_{eq}$  innerhalb der Sprachdynamik von 30 dB auf den Mittelwert verlegt:

$$AI: -18 \text{ dB} < L_{eq} < 12 \text{ dB}$$

$$SII: -15 \text{ dB} < L_{eq} < 15 \text{ dB}$$

Neu ist auch, dass nicht mehr alleine die akustischen Bedingungen und die Hörschwelle die Hörbarkeit bestimmen, sondern auch Prozesse der Wanderwellenmechanik im (normalen) Innenohr. Da Sprache aus mehreren gleichzeitig vorhandenen Schallfrequenzen besteht, tritt im Innenohr durch die räumliche Ausbreitung der Wanderwellen auf der Basilarmembran eine gegenseitige Überlagerung und Maskierung der einzelnen Sprachfrequenzen (Selbstmaskierung) auf, die im AI nicht berücksichtigt ist. Die zusätzliche Berücksichtigung dieser pegelabhängigen Auf- und Abwärtsmaskierung in der Gewichtungsfunktion  $W$ , die dazu führt, dass nicht alle gleichzeitig akustisch vorhandenen Sprachfrequenzanteile tatsächlich hörbar sind, ist ein weiterer Unterschied des SII zum AI.

Folgende Gleichung wird zur Berechnung des SII verwendet:

$$SII = \sum_{i=1}^n I_i W_i. \quad (2)$$

Hierbei ist  $I_i$  wieder die Wichtigkeitsfunktion (Band Importance Function) und  $W_i$  die Gewichtungsfunktion (Hörbarkeitsfunktion, Band Audibility Function) in Abhängigkeit der Frequenzbandmittenfrequenz. Der Gewichtungsfaktor  $W_i$  berücksichtigt hier intern mehrere Subfaktoren, die den Anteil potentiell hörbarer Sprachinformation beeinflussen. Dazu zählen der Anteil der in Relation zum SNR unmaskierten

Sprachpegeldynamik, die Hörschwelle als internes Rauschen und ein Faktor zur Selbstmaskierung durch Auf- beziehungsweise Abwärtsmaskierungseffekte der Wanderwellen.

Das SII-Verfahren enthält die Wichtigkeitsfunktionen und Gewichtungsfaktoren für vier verschiedene Aufteilungen der Frequenzbänder: in 17 Bänder mit jeweils gleicher Wichtigkeit (0,0588 pro Band), in 21 Frequenzgruppen, in 18 Terzbänder und in sechs Oktavbänder.

### 1.6 Transferfunktionen

Stellen AI und SII lediglich Hörbarkeitsindices zur Angabe des nutzbaren Sprachinformationsanteils dar, können daraus mit entsprechenden Transferfunktionen auch Schätzungen der davon abhängigen durchschnittlich zu erwarteten Sprachverständlichkeit ermittelt werden. Dabei werden die Anteile der potentiell hörbaren Sprachinformation mit einer Transferfunktion TF in die resultierende prozentuale Sprachverständlichkeit SV umgewandelt:

$$SV = TF(AI) \quad (3)$$

$$SV = TF(SII) \quad (4)$$

Die SV ist unter anderem auch abhängig von subjektiven Einflussfaktoren beim Hörer, wie seinem Wortschatz und der individuellen Nutzung der lexikalischen, semantischen und grammatikalischen Eigenschaften des Sprachmaterials und der Artikulation und Stimmeigenschaften des Sprechers. Dementsprechend müssen die Transferfunktionen für jedes Sprachmaterial, jeden Sprecher und jede Hörergruppe spezifisch ermittelt werden.

### 1.7 Auswirkung passend gewählter Wichtigkeits- und Transferfunktion auf die Genauigkeit der Sprachverständlichkeitsberechnung

Die Berechnungsverfahren der Sprachindices berücksichtigen mit Bandbreite und SNR die Faktoren, die Einfluss auf die akustisch-phonetische Ebene der

Sprachwahrnehmung haben. Durch eine auf das konkrete Sprachmaterial abgestimmte Wichtigkeitsfunktion  $I(i)$  und Transferfunktion  $T(AI)$  oder  $T(SII)$  werden auch die Faktoren zur lexikalischen und grammatikalisch-semantischen Ebene bei der Vorhersage der Sprachverständlichkeit berücksichtigt. Für unterschiedliches Sprachmaterial liegt beispielsweise der Gipfel der Wichtigkeitsfunktion, also das Frequenzband mit dem höchsten Beitrag zur Sprachverständlichkeit, bei 500 Hz für fließende Konversation (7) oder bei 2500 Hz für sinnlose Silben (3). Bei gleichen suboptimalen akustisch-phonetischen Faktoren (Bandbreite, SNR), die nur einen Teil der Sprachinformation potentiell hörbar machen, wird bei isoliert, ohne jeden Kontext und Vorhersagbarkeit vorgesprochenen Einzelwörtern eine deutlich geringere prozentuale Sprachverständlichkeit erzielt als bei fließender Sprache. Deren Wörter lassen sich durch den Kontext in einem Satz und dessen Satzaussage zumindest teilweise vorhersagen, womit fehlende Hörbarkeit von Sprachinformation kompensiert werden kann. Diese großen Unterschiede der Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit des gewählten Sprachmaterials müssen auch in der Berechnung der Vorhersage der Sprachverständlichkeit berücksichtigt werden und zeigen die Bedeutung einer für ein Sprachmaterial spezifischen Wichtigkeitsfunktion für die Aussagekraft der errechneten Werte der Sprachindices. Ausgehend vom errechneten AI- oder SII-Wert ist aber auch das Verwenden einer zur Testperson passenden Transferfunktion entscheidend für das Erzielen einer aussagekräftigen erwarteten prozentualen Sprachverständlichkeit. Auch hier sind die Unterschiede je nach verwendetem Sprachmaterial groß. So vergleicht Studebaker (7) seine für fließende Konversation erstellte Transferfunktion, die eine durchschnittliche Steigerung von etwa 55% SV bei einer Änderung des AI um 0,1 vorweist, mit der von French und Steinberg für sinnlose Silben erstellten Transferfunktion (3), deren mittlere Steigung etwa 20% SV pro 0,1 AI beträgt. Die in der zitierten Literatur angegebenen Steigungen wurden jeweils für den steilsten, annähernd linearen Teil der Transferfunktionen zwischen 20-80% SV ermittelt. Die Sprachverständlichkeit steigt also bei gleich großer Verbesserung der Hörbarkeit (AI) für fließende Konversation mehr als doppelt so stark an wie für sinnlose Silben. Für eine präzise Vorhersage der Sprachverständlichkeit ist die Wahl einer auf das Sprachmaterial passenden Transferfunktion also unerlässlich. Die genauesten Ergebnisse in der Berechnung der Sprachverständlichkeit werden erzielt, wenn Wichtigkeitsfunktion und Transferfunktion direkt mit dem Sprachmaterial, auf das sie dann angewendet werden, erstellt wurden und die Eigenschaften dieses

Sprachmaterials sowie der Stimme und der Artikulation des spezifischen Sprechers dadurch optimal berücksichtigen.

### 1.8 Der Freiburger Sprachverständlichkeitstest

Der vor über 60 Jahren entstandene Freiburger Sprachverständlichkeitstest, festgeschrieben in DIN 45621, ist seit Jahrzehnten und noch heute ein auch abseits der reinen Audiometrie relevanter Standardtest (25). Er darf als ein sehr häufig in Deutschland eingesetzter sprachaudiometrischer Test bezeichnet werden und geht zurück auf die umfassenden Arbeiten von Karl-Heinz Hahlbrock zu Beginn der 1950er-Jahre. Dieser strebte mit seinen wegweisenden Untersuchungen das Ziel an, die Audiometrie über das Niveau der Tonprüfreihen mit Stimmgabeln und die in Deutschland noch in den Anfängen befindliche Tonaudiometrie hinaus zu erweitern (25) und wollte für die Untersuchung des Hörvermögens ein Signal verwenden, das für den aus dem Gehör bezogenen Nutzen wirklich relevant ist (26). Er definierte das Wortmaterial anhand seiner Gebräuchlichkeit und griff für die Auswahl von Testwörtern zurück auf die damals noch unveröffentlichte aber schon vorhandene Sprachstatistik von Helmut Meier (27), die auf dem Häufigkeitswörterbuch von Friedrich Wilhelm Kaeding aus dem Jahr 1897 beruht (28). Dieses wiederum war aus Wortauszählungen aus Schriftstücken des 19. Jahrhunderts entstanden (28). Hahlbrock wählte aus den 13.215 häufigsten Wörtern in Meiers Sprachstatistik die 1.194 am häufigsten verwendeten einsilbigen Substantive mit 2 bis 5 Lauten pro Wort aus, aus denen er am Ende der Testentwicklung 400 Wörter für seinen Test selektierte (25). Anschließend gruppierte er diese 400 Testwörter in 20 Listen zu 20 Wörtern, wobei er als Grundannahmen für seine Auswahl der Wörter Sinnhaftigkeit, Allgemeinverständlichkeit, Gebräuchlichkeit (Bekanntheitsgrad), grammatikalische Homogenität und keine zu große Vereinfachung zugrunde legte (28). Für die Zusammenstellung der Testlisten stellte Hahlbrock die Forderung, dass jede Wörtergruppe an den Probanden die gleichen Schwierigkeitsanforderungen stellen und, unter Einbeziehung der weiter unten diskutierten individualspezifischen Faktoren, bei verschiedenen Personen erzielte Ergebnisse untereinander vergleichbar sein sollten (25). So achtete er beispielsweise darauf, dass die Lage der Hauptformanten bezüglich Anlaut, Inlaut oder Auslaut einigermaßen ähnlich waren (26). Die Listen

wurden des Weiteren so erstellt, dass die Lautverteilung in jeder einzelnen möglichst gut der Lauthäufigkeitsverteilung der deutschen Sprache angenähert wurde (26). Dies war jedoch aus verschiedenen Gründen nur bedingt möglich, u.a. da sich in der deutschen Sprache 53 Laute unterscheiden lassen und jede Testliste 73 Laute umfasst, woraus sich schon rein mathematisch eine Unmöglichkeit der genauen Repräsentation ergibt (25). Außerdem ist z.B. der Laut [d] in fließender Sprache wegen der Artikel besonders häufig, anders als im Durchschnitt in einsilbigen Substantiven (25). Bezüglich der Worthäufigkeit hatte Hahlbrock den Anspruch, dass die Testwörter selbst bei wenig sprachbegabten Menschen aus der Verwendung in deren Alltagssprache so bekannt sein sollten, dass individuelle Sprachbegabung, Bildung oder Belesenheit keinen Einfluss auf das Testergebnis haben sollten (26, S.90), ohne dies jedoch geprüft zu haben (28). Wie zuvor erwähnt werden häufig gehörte und somit gut bekannte Wörter leichter verstanden, sodass die Worthäufigkeit im individuellen Sprachgebrauch die Verständlichkeit beeinflusst. Durch eine Auswahl von Wörtern, die allen potentiellen Hörern gleichermaßen sehr bekannt sein sollten, wurde zumindest versucht, den Einfluss der höheren kognitiven Ebenen des Sprachverstehens klein zu halten.

Im Gegensatz zum „Zahlentest“ mit seinen mehrsilbigen Wörtern, der ebenfalls Teil des Freiburger Sprachtests ist und für die Ermittlung der Sprachverständlichkeitsschwelle genutzt wird, dient der Einsilberteil des Freiburger Sprachtests dazu, die Fähigkeit zur Sprach- bzw. Lautunterscheidung oder Sprachdiskrimination zu bestimmen (25). Für eine solche Zielsetzung ist die Wahl eines geeigneten Sprachmaterials entscheidend. Soweit heute rekonstruierbar, wurde von der Verwendung von Sätzen abgesehen, weil das Testmaterial genügend schwer sein sollte, um sowohl bei Guthörenden als auch bei Schwerhörenden differenzierbare Ergebnisse erzielen zu können (26, S.87). Hinsichtlich der Wortform fiel die Wahl auf einsilbige Substantive, u. a. um die Auswirkung der „eklektischen Kombination“ (der Schaffung eines neuen Systems aus der Kombination bekannter Elemente) zu begrenzen (25). (Heute würde man präziser von der Nutzung von Kontext und Redundanz sprachlicher Elemente in einem Wort (Laute und Silben) bei der Wortidentifikation und der Neigung, die erkannten Laute im Vergleich mit dem individuellen Wortschatz immer zu einem bekannten Wort zusammenzuführen, sprechen.) Somit wurde der Einfluss der oben genannten grammatikalisch-inhaltlichen

Ebene des Sprachverstehens vermindert, auf die Größe des individuellen Wortschatzes beschränkt und zudem für alle Worte gleich gehalten. Lange Zeit nach den ersten Bandaufnahmen in der Camera silens der Freiburger audiologischen Abteilung (26) entstand mit der Aufsprache durch den Berufssprecher Claus Wunderlich in den Studios des Norddeutschen Rundfunks in Hamburg am 12.3.1969 das Testmaterial, welches später in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig aufbereitet und in Bezug auf die Gleichheit der Spitzenpegel aller Testwörter justiert wurde (29). Ebenfalls an der PTB wurden die bis heute gültigen Bezugskurven („Normalkurven“) für die Sprachverständlichkeit ermittelt. Sie sind in DIN 45626-1 (30) festgehalten und bilden seitdem die Grundlage für die Beurteilung der Einschränkungen im Lebensalltag, die sich für die von einer Hörstörung Betroffenen aus den organischen und funktionellen Defiziten des Hörorgans ergeben (25).

Die häufige Verwendung des Freiburger Einsilbertests ist heutzutage keineswegs einer eventuell besonderen Testqualität geschuldet, sondern vermutlich eher der großen Erfahrung mit diesem Testmaterial sowie der einfachen Durchführbarkeit. Jedenfalls sind die Messeigenschaften des Freiburger Einsilbertest aus mehreren Gründen mangelhaft. Ein Kritikpunkt ist das Wortinventar, das auf Schriftquellen des 19. Jahrhunderts zurückgeht, weshalb etwa 45% der Einsilber in der gesprochenen kontemporären deutschen Sprache kaum mehr verwendet werden (28). Bei schwankender Bildungsnähe verschiedener Probanden könnten somit Unterschiede in der Sprachverständlichkeit auftreten, die auf einen unterschiedlich großen Wortschatz zurückzuführen sind. Zudem sind die Worthäufigkeitseigenschaften der Testwörter nicht gleichmäßig über die Listen verteilt, sodass einige Listen signifikant schwerer sind, da sie mehr seltene Wörter enthalten, während andere mit vielen häufig verwendeten Wörtern signifikant leichter sind (28). Die perzeptive Äquivalenz der einzelnen Testlisten ist in dieser Hinsicht nicht gewährleistet. Außerdem wird die nicht alltägliche Sprechweise in der Art von überartikulierter Theatersprache (31), gesprochen von einem Berufssprecher, kritisiert (32). Es gibt keinen Ankündigungsreiz, wodurch das zu hörende Wort bei nicht ausreichender Aufmerksamkeit verpasst werden kann, Phonemverwechslungen werden nicht ausgewertet und es existiert kein standardisiertes Störgeräusch (31). Zudem ist die

Messgenauigkeit und damit die Empfindlichkeit relativ gering und die Präsentationspegel der Einzelwörter sind nicht ausgewogen (25).

Dennoch sei bemerkt, dass der Freiburger Test unbestreitbar und insbesondere im internationalen Vergleich sehr früh einen bemerkenswerten Qualitätsstandard geschaffen hat und noch heute in vielen Bereichen den niedrigen Anforderungen der sprachaudiometrischen Untersuchungen in HNO-Praxen genügt. Er ist jedoch in einer Zeit entstanden, in der erstens die technischen Möglichkeiten zur Herstellung des Testmaterials vom heutigen Standard weit entfernt waren und zweitens die begrenzte Leistungsfähigkeit der technischen Hörhilfen noch nicht nach einer differenzierten und empfindlichen Erfolgskontrolle verlangte (25). Daher ist die Befürwortung einer weiteren Anwendung des Freiburger Tests zwar berechtigt, ebenso aber auch die Suche nach Alternativen für eine zeitgemäße und zukunftsfähige Sprachaudiometrie. Einsilbertests und speziell der Freiburger Einsilbertest sind nichtsdestotrotz derzeit ein vielverwendetes Verfahren bei sprachaudiometrischen Untersuchungen. Die schnell und einfach durchzuführenden und auszuwertenden Worttests im Störschall werden in der klinisch-audiologischen Anwendung im HNO-ärztlichen Alltag und in der Praxis der Hörgeräteanpassung gegenüber Satztests häufig präferiert. So erwähnt Löhler in seiner Erwiderung auf einen Leserbrief zur Diskussion um den Freiburger Einsilbertest (32) folgende Zahlen zur Häufigkeit der Verwendung von Einsilbertests. Eine auf der 84. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie e.V. in Nürnberg im Mai 2013 (Rundtisch: „Perspektiven der Sprachaudiometrie“) vorgestellte Auswertung von PubMed (2000–2012) ergab, dass die Zahl der sprachaudiometrischen Untersuchungen von 201 (im Jahr 2000) auf 406 (im Jahr 2012) angestiegen war. Im Jahr 2012 waren davon 114 Arbeiten zur CI-Versorgung (durchgeführt zu 90 % mit Einsilbern und zu 25 % mit Satztests), 114 Arbeiten zum Follow-up mittelohrchirurgischer Rekonstruktionen (zu 98% mit Einsilbern durchgeführt) und 94 sonstige Arbeiten. Bislang konnte kein Verfahren die gleiche Akzeptanz erreichen wie insbesondere der Freiburger Einsilbertest. Die Gründe dafür sind zum einen die langjährigen Anwendungserfahrungen und zum anderen seine Normierung in der DIN 45621-1 (30, 33), die einen formalen Rahmen für die Anwendung bildet, auf den schließlich auch in Empfehlungen und Richtlinien zur Erfassung von Hörschäden hingewiesen wird (20).

## 1.9 Ziel dieser Studie

Für viele andere - insbesondere für englische – Sprachtests und Sprachmaterialien existieren zur AI- und SII-Berechnung bereits eigene Wichtigkeitsfunktionen und Transferfunktionen. Sie wurden für sinnlose Silben (3, 34), Wörter (10, 35–37), sinnlose Sätze (16), Sätze (37) und für Fließtext (7, 37) ermittelt. Die Ergebnisse betreffend englischsprachige Audiometrietests wurden vom American National Standard Institute zusammengefasst und standardisiert (24). So werden vom American National Standard Institute Wichtigkeitsfunktionen für Sinnlose Silben (3), passend beispielsweise für die Tests der Bell Laboratories (38) oder den Memphis Nonsense Syllable Test (39), angegeben. Des Weiteren werden Wichtigkeitsfunktionen für die englischsprachigen Einsilbertests CID-W22 (36, 40) und NU6 (10, 41), aufgeführt. Das American National Standard Institute führt Wichtigkeitsfunktionen für den Reimtest DRT (5, 34) sowie für kurze Passagen leichten Lesematerials (42) beziehungsweise fließende Konversation (7) auf. Ebenso wird für den SPIN Test, bei dem einsilbige Substantive in einem Satz mit viel oder wenig Kontext erkannt werden müssen (43, 44) eine Wichtigkeitsfunktion (16) angegeben. Nicht im ANSI Standard erwähnt, aber erstellt, wurden Wichtigkeitsfunktionen für die phonetisch ausgeglichenen englischen PB Words (35, 45) sowie für den englischsprachigen Connected Speech Test (8, 46). Transferfunktionen für bestimmte Sprachmaterialien werden im ANSI Standard von 1997 nicht aufgeführt, wurden aber beispielsweise für die oben genannten Einsilbertests CID-W22 (36) und NU6 (10), für fließende Konversation (7), für die SPIN Sätze (16) sowie für den englischen Connected Speech Test (8) erstellt.

Das erste Ziel dieser Studie ist die Ermittlung von spezifischen Wichtigkeitsfunktionen für die Anwendung des AI- und des SII-Verfahrens auf das Sprachmaterial des Freiburger Sprachverständlichkeitstests.

Das zweite Ziel ist die Bestimmung einer Transferfunktion zur Umrechnung des Hörbarkeitsindex AI in prozentuale Sprachverständlichkeitswerte.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Versuchspersonen

Die Untersuchung fand an 68 Versuchspersonen statt. Alle waren muttersprachlich deutsch und gaben keine wiederholten Mittelohrprobleme in der Kindheit an. Es lag keine Artikulationsstörung vor und das Mindestalter betrug 18 Jahre. Zum Ausschluss einer Hörstörung wurde unmittelbar vor den Tests das Tonaudiogramm bestimmt. Ein Hörverlust von größer 15 dB SPL in mehr als einer der 8 getesteten Frequenzen (250-8000Hz) oder von 20 dB SPL oder größer in mindestens einer Frequenz hätte den Ausschluss der Testperson zur Folge gehabt. Die Altersspanne betrug 19 bis 33 Jahre. Die Gruppe der Teilnehmer bestand aus 40 Frauen und 28 Männern. Den Teilnehmern wurden für die Dauer des Versuches eine Aufwandsentschädigung von 10 € / Stunde bezahlt.

### 2.2 Sprachmaterial

Verwendet wurde der Einsilberteil des Freiburger Sprachverständlichkeitstests nach DIN 45626-1 (47). Er besteht aus einsilbigen Substantiven, aufgesprochen mit einer Männerstimme. Jeweils 20 Substantive bilden eine Testliste. Insgesamt besteht der Test aus 20 verschiedenen Testlisten. In Tabelle 1 ist die erste Liste beispielhaft abgebildet.

Ring	Spott	Farm	Hang	Geist	Zahl	Hund	Bach	Floh	Lärm
Durst	Teig	Prinz	Aas	Schreck	Nuss	Wolf	Braut	Kern	Stich

Tab. 1: Liste 1 aus dem Freiburger Sprachverständlichkeitstest für Einsilber

Das stationäre sprechersimulierende Maskierungsrauschen bestand aus der 512-fachen unsynchronen Überlagerung aller Testwörter und wies somit exakt das mittlere Langzeitspektrum der Sprecherstimme auf. In allen Messbedingungen wurde das Rauschen ungefiltert dargeboten. Für diese Untersuchung wurde das Sprachmaterial und das sprechersimulierende Störgeräusch anhand des  $L_{eq}$  kalibriert. Dazu wurden alle 400 Einsilber mit einer Pause von nur einer typischen Silbenlänge von 125 ms aneinandergehängt und der  $L_{eq}$  über alle 400 Einsilber ermittelt. Die wortspezifischen Schallpegel wurden nicht geändert, damit die Pegelschwankungen in jeder Liste

beibehalten wurden. Für die Bestimmung des  $L_{eq}$  des Rauschens wurde ein Rauschintervall in der Länge der 400 Einsilber verwendet. Für ein SNR von 0 dB waren die  $L_{eq}$  des Rauschens ( $L_{Neq}$ ) und der Sprache ( $L_{Seq}$ ) identisch. In Abbildung 1 ist das über alle 400 Einsilber gemittelte akustische Terzpegelspektrum des Freiburger Einsilbertests und in Abbildung 2 das des sprechersimulierenden Rauschens dargestellt. Zusätzlich sind zur Darstellung der frequenzabhängigen Sprachdynamik die Verläufe der Perzentilen eingezeichnet. Die Schallausgabe erfolgte freifeldentzerrt über ein Audiometer (Astera, GN-Otometrics) mit dem Sennheiser HDA200 Kopfhörer. Die Pegelmessung erfolgte mit dem Ohrsimulatorcuppler 4153 von Bruel & Kjaer mit der Zeitkonstante „fast“ und der Frequenzbewertung „Z“. Für die Messung des  $L_{eq}$  als Mittelwert aller 400 Einsilber wurden alle Einsilber mit einer Pausendauer zwischen den Worten von 125 ms (mittlere Silbenlänge) aneinandergehängt.

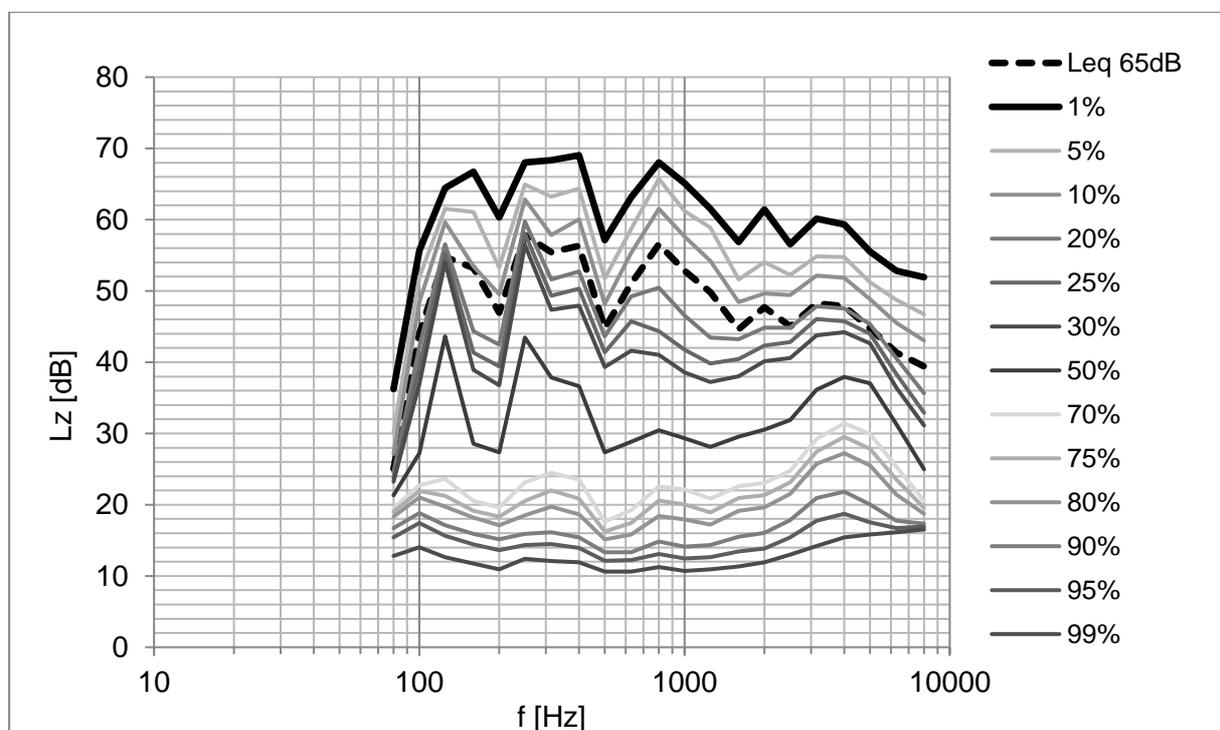


Abb. 1: Akustisches Terzpegelspektrum der unterschiedlichen Perzentilen des Summenpegels von  $L_{eq} = 65$  dB SPL des Freiburger Einsilbertests bei freifeldentzerrter Kopfhörerausgabe (für den Kopfhörer HDA200). Der frequenzabhängige Verlauf des  $L_{eq}$  in jedem Terzband ist durch die schwarze gestrichelte Linie angegeben.

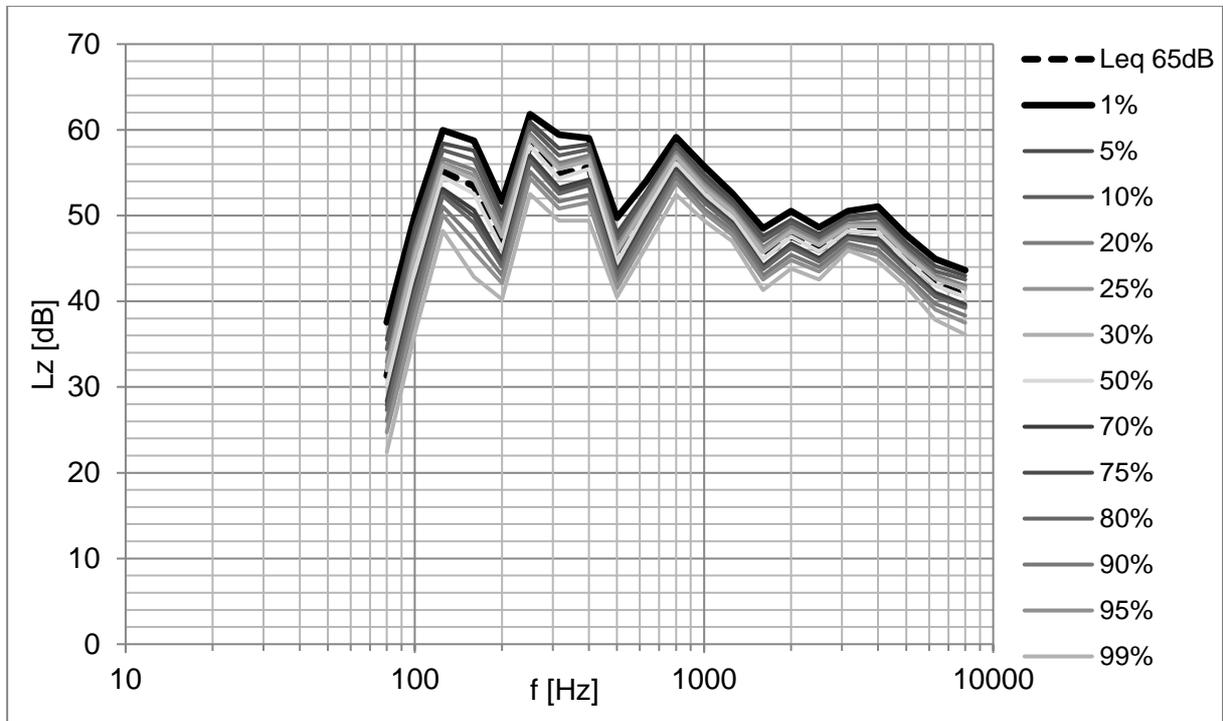


Abb. 2: Akustisches Terzpegelspektrum der unterschiedlichen Perzentilen des Summenpegels von  $L_{eq} = 65$  dB SPL des stationären sprechersimulierenden Rauschens bei freifeldentzerrter Kopfhörerausgabe (für den Kopfhörer HDA200). Der frequenzabhängige Verlauf des  $L_{eq}$  in jedem Terzband ist durch die schwarze gestrichelte Linie angegeben.

Die Bandbreite der ungefilterten Sprache betrug 88 – 9000 Hz (Breitband-Filterung). Für die Hoch- und Tiefpassfilterung des Sprachmaterials wurden 6 Tiefpässe und 7 Hochpässe verwendet. Die Abstufungen entsprechen jeweils einer Doppelterz. Die Filtergrenzfrequenzen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

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

Tab. 2: Filterbandbreiten der Sprachsignalfilterung

### 2.3 Durchführung der Sprachverständlichkeitsmessungen

Alle Untersuchungen fanden in einem schallgedämmten Audiometrieräum der Universitäts-HNO-Klinik Regensburg statt. Einer Versuchsperson wurden zwischen 10 und 20 Testlisten unter verschiedenen Filterbedingungen und Signal-Rausch-Abständen (Speech-to-noise-ratio, SNR) über Kopfhörer monaural auf dem rechten Ohr präsentiert. Die Hörbarkeit der Sprache wurde durch Veränderung des SNR und durch Variation der Bandbreite des gefilterten Sprachmaterials variiert. Die Veränderung des SNR fand ausschließlich durch Variation des Geräuschpegels statt, während der  $L_{Seq}$  (im Weiteren vereinfacht als Sprachpegel bezeichnet) konstant bei 65 dB SPL lag. Innerhalb einer Testliste blieben die Bedingungen bezüglich Bandbreite und SNR unverändert. Die Zuordnung von Testperson zu Testliste und Bedingungen wurde zufällig getroffen. Aus den 20 Wörtern einer Liste wurde die prozentuale Sprachverständlichkeit (SV) ermittelt. Die Hörer waren aufgefordert möglichst sinnvolle Wörter als Antwort zu geben und verstandene Wortbruchstücke zu vollständigen Wörtern zu ergänzen. Zudem sollten die Probanden angeben, wenn sie sich ermüdet fühlten. Nach jeweils 5 Testlisten wurde eine kurze Pause eingehalten. Das Sprachmaterial wurde jeweils nur einmal vorgespielt und zur Minimierung des Einflusses der Gedächtnisleistung wiederholten die Teilnehmer jedes einzelne Wort unmittelbar nach Präsentation. Aus Vortests hatte sich ergeben, dass unter Breitbandbedingung oder bei breiten Hoch- oder Tiefpässen und einem SNR von mindestens 0 dB eine SV von 50 % oder mehr zu erwarten war. Wurde die erste Testliste unter diesen Bedingungen dargeboten, konnte die Aufgabenstellung sofort begriffen und umgesetzt werden. Daher wurde zur Zeiteinsparung auf die Präsentation von Übungslisten in Ruhe verzichtet.

### 2.4 Behandlung von Ausreißern

Aus den erhaltenen Werten der SV wurden Ausreißer nach folgenden Kriterien aussortiert: Nicht verwendet wurden Werte, nach deren Messung die Versuchsperson angab sich ermüdet oder unkonzentriert gefühlt zu haben. Werte, die vom Grubbs-Test auf einem Signifikanzniveau von  $\alpha=0,05$  als Ausreißer gekennzeichnet wurden, wurden nicht verwertet. Tabelle 22 (Anhang 7.1) zeigt die Anzahl der Messwerte für

jede Messbedingung, die nach Elimination von Ausreißern in die weiteren Berechnungen eingehen konnten.

## 2.5 Fitfunktionen zur Anpassung der Verständlichkeitsdaten

Zur Anpassung der Messwerte an eine Modellfunktion wurde einerseits die üblicherweise verwendete logistische Funktion gewählt. Andererseits wurde als Alternative das Wachstumsmodell nach Gompertz verwendet, das im Vergleich zur logistischen Funktion ein schnelleres Anwachsen der Verständlichkeit zu Beginn der Wachstumsfunktion und ein langsames Wachstum jenseits des Wendepunktes beinhaltet.

### 2.5.1 Fittingmethode mit einer logistischen Funktion

Als Modellfunktion der Sprachverständlichkeit wurde zunächst eine logistische Funktion verwendet:

$$SV(SNR) = \frac{a}{1 + e^{\frac{x_0 - SNR}{b}}} \quad (5)$$

Dabei bestimmt der Funktionsparameter  $a$  die maximale Sprachverständlichkeit,  $x_0$  den Wendepunkt (entspricht bei  $a = 100\%$  der Sprachverständlichkeitsschwelle SRT) und  $b$  die Steilheit der Funktion. Die Steigung  $m$  erreicht bei  $x_0$  ihr Maximum und ergibt sich aus dem Steilheitsparameter  $b$ :

$$m = \frac{a}{4b} \quad (6)$$

Die Umkehrfunktion zur Berechnung des SNR in Abhängigkeit der Sprachverständlichkeit lautet:

$$SNR(SV) = x_0 - b * \ln\left(-\frac{SV-a}{SV}\right) \quad (7)$$

## 2.5.2 Fitting mit der Gompertz-Funktion

Desweiteren wurde als Modell zur Beschreibung der Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit des SNR die Gompertz-Funktion (48) verwendet:

$$SV(SNR) = ae^{-e^{-\frac{x_0-SNR}{b}}} \quad (8)$$

Dabei bestimmt der Funktionsparameter  $a$  die maximale Sprachverständlichkeit,  $x_0$  den Wendepunkt und  $b$  die Steilheit der Funktion. Die Steigung  $m$  erreicht am Wendepunkt  $x_0$  bei etwa 36,7 % von  $a$  ihr Maximum und ergibt sich aus dem Steilheitsparameter  $b$ :

$$m = \frac{a}{e*b} \quad (9)$$

Die Umkehrfunktion der Gompertz-Funktion lautet:

$$SNR(SV) = x_0 - b * \ln\left(-\ln\left(\frac{1}{a} * SV\right)\right) \quad (10)$$

Die Anpassungen der Funktionsparameter wurden mit Hilfe des Programms SigmaPlot 13.0 durchgeführt.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Messergebnisse der Sprachverständlichkeit

Aus den Rohdaten der Sprachverständlichkeit wurden Mittelwerte für jede Hörbedingung errechnet (siehe Tabelle 23, Anhang 7.2). Wie zu erwarten, steigt die Sprachverständlichkeit sowohl mit größerem SNR als auch bei breiterem dargebotenen Frequenzspektrum, also größerer Bandbreite des Sprachmaterials, an.

#### 3.2 Diskriminationsfunktionen

##### 3.2.1. SNR-abhängige Diskriminationsfunktionen

Für jede Filterbandbreite wurde zunächst aus den Rohdaten die Diskriminationsfunktion, also die Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit des SNR ermittelt.

In den Abbildungen 3 - 5 sind die mit logistischer Fittingmethode erstellten Sprachverständlichkeitsfunktionen der breitbandigen Sprachpräsentation, sowie bei unterschiedlichen Hoch- und Tiefpassfilterungen in Abhängigkeit des SNR dargestellt, die Funktionsparameter sind in Tabelle 3 aufgeführt.

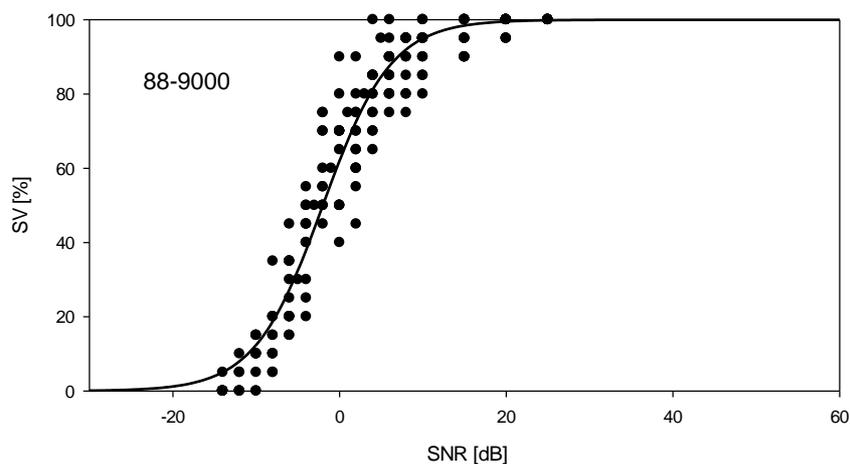


Abb. 3: Logistische Diskriminationsfunktion der Breitbandpräsentation in Abhängigkeit des SNR, die SRT befindet sich bei -2,0 dB SNR, die maximale Steigung (am Wendepunkt  $x_0$ ) beträgt 6,1 %/dB,  $R^2 = 0,9369$

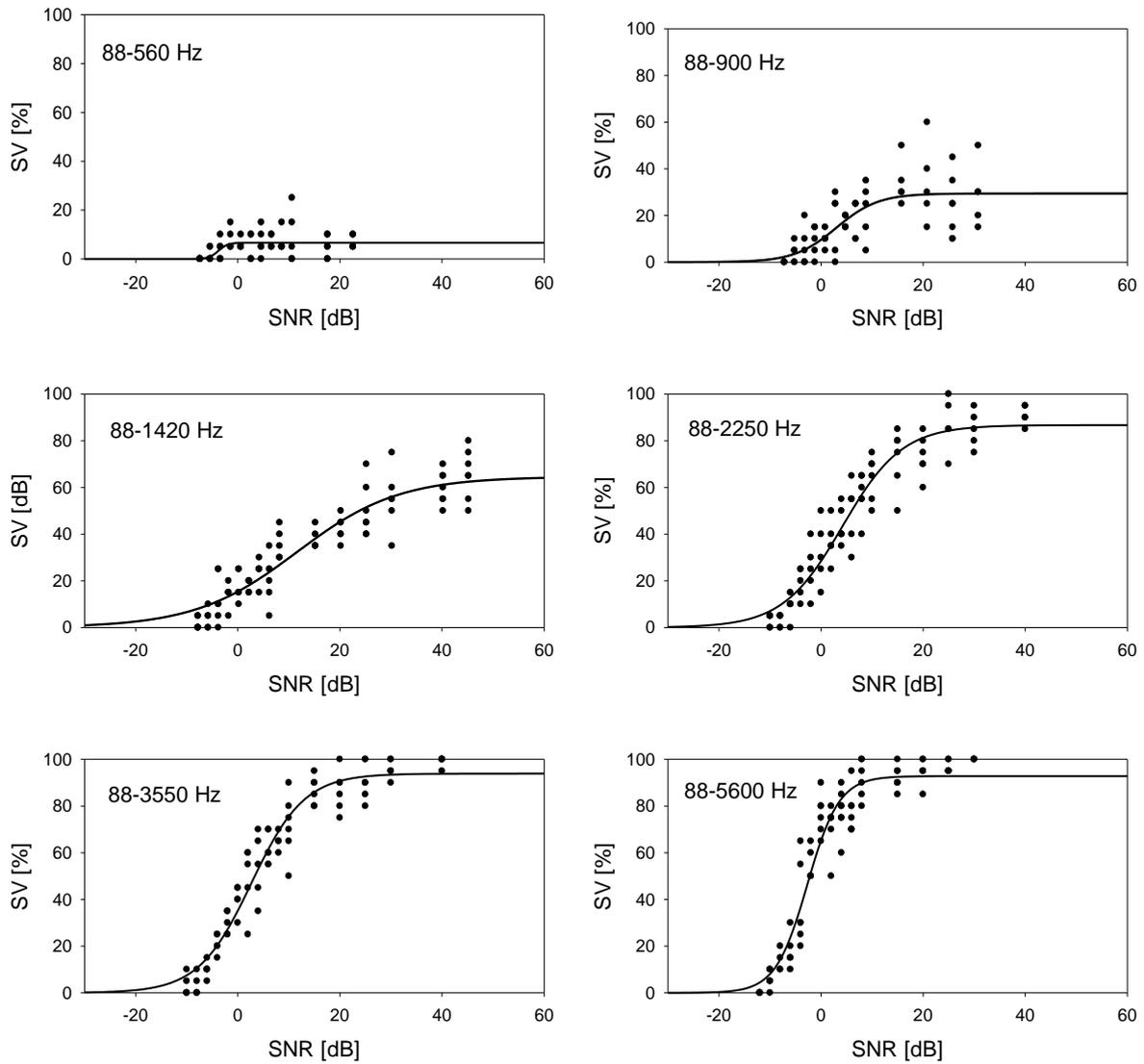


Abb. 4: Logistische Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Tiefpassfilterungen.

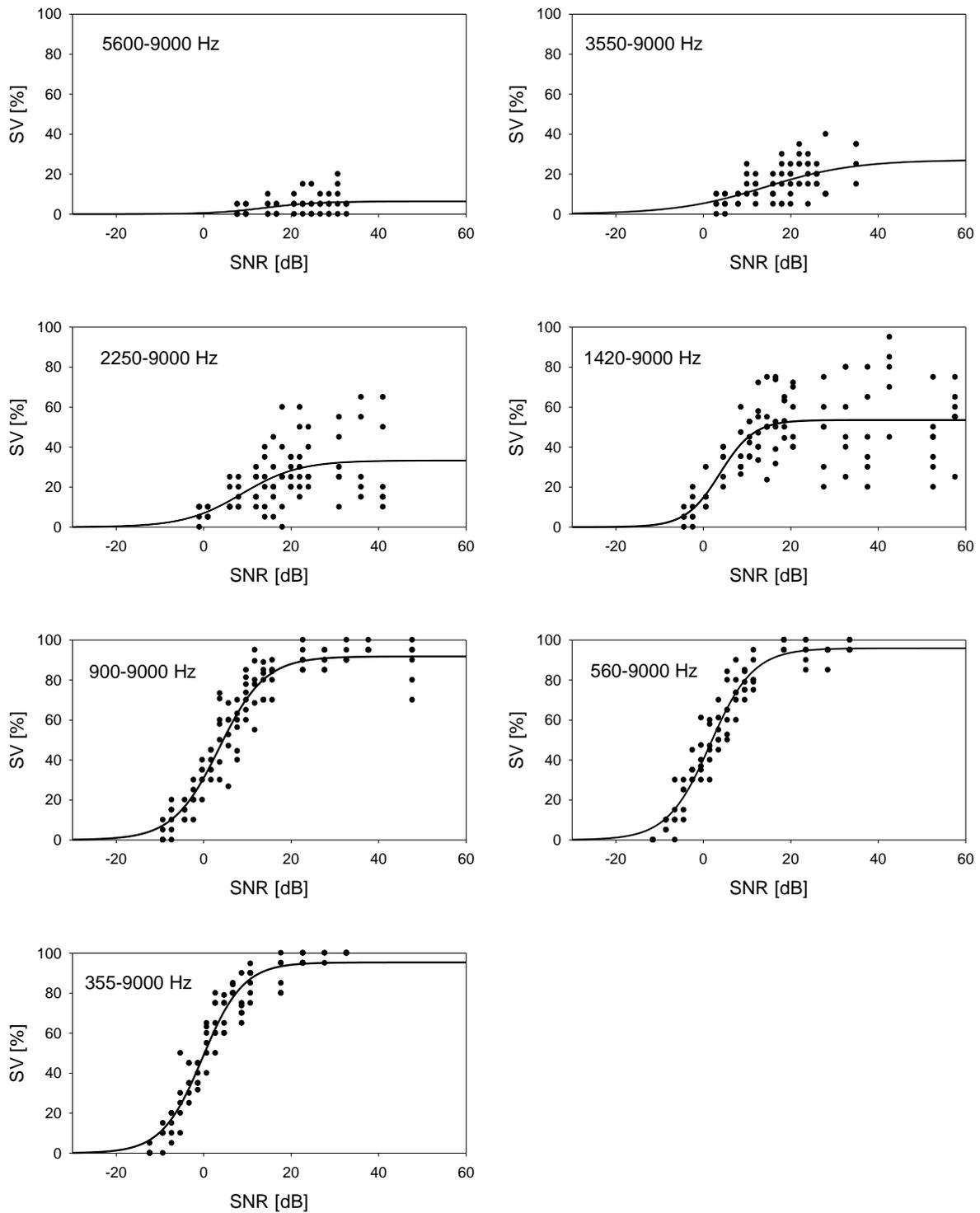


Abb. 5: Logistische Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Hochpassfilterungen.

In den Abbildungen 6 - 8 sind die mit der Gompertz-Funktion gefitteten Diskriminationsfunktionen für die Breitbandbedingung sowie die Hochpass- und Tiefpassfilterung in Abhängigkeit des SNR dargestellt, die Funktionsparameter sind in Tabelle 4 aufgeführt.

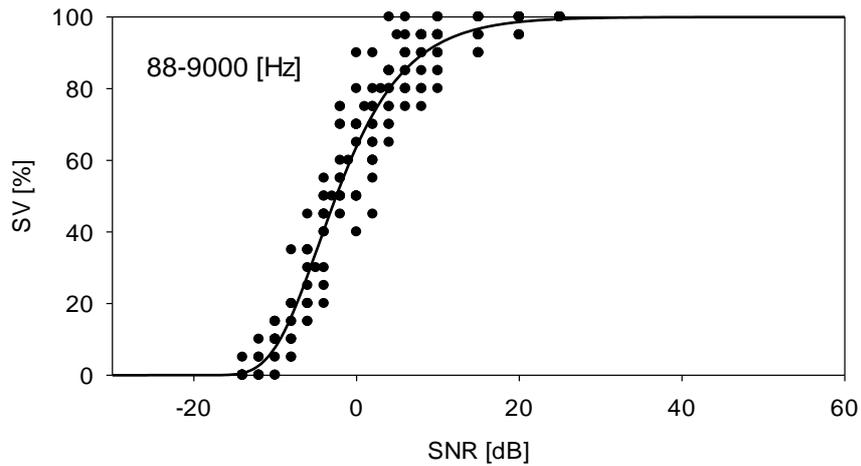


Abb. 6: Mit der Gompertz-Funktion als Modellfunktion erstellte Diskriminationsfunktion der Breitbandpräsentation in Abhängigkeit des SNR [dB], die SRT befindet sich bei -2,5 dB SNR mit einer Steigung von 6 %/dB, die maximale Steigung (am Wendepunkt  $x_0$ ) beträgt 6,4 %/dB,  $R^2 = 0,9431$ .

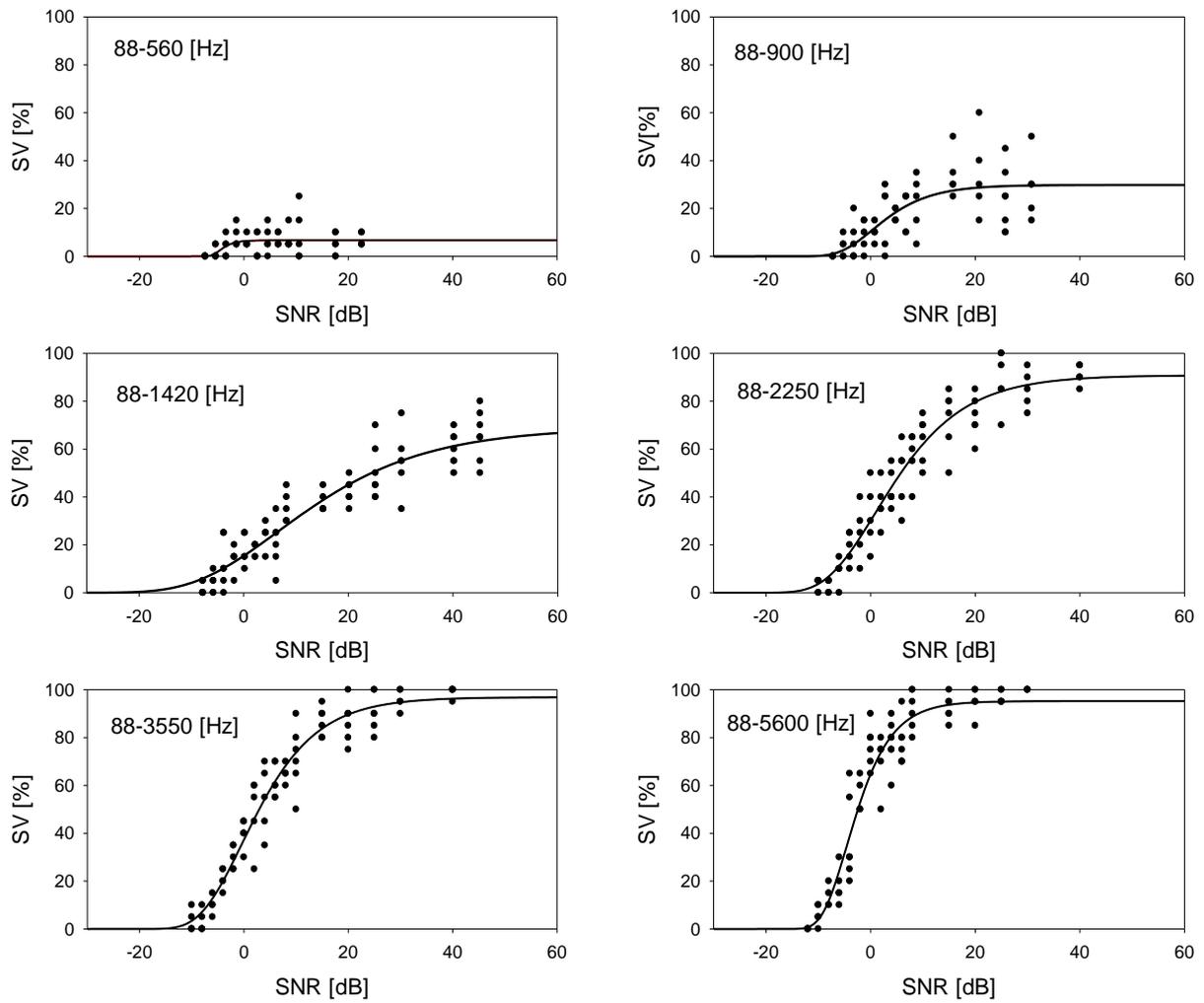


Abb. 7: Mit der Gompertz-Funktion als Modellfunktion erstellte Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV in Abhängigkeit des SNR für die verwendeten Tiefpassfilterungen.

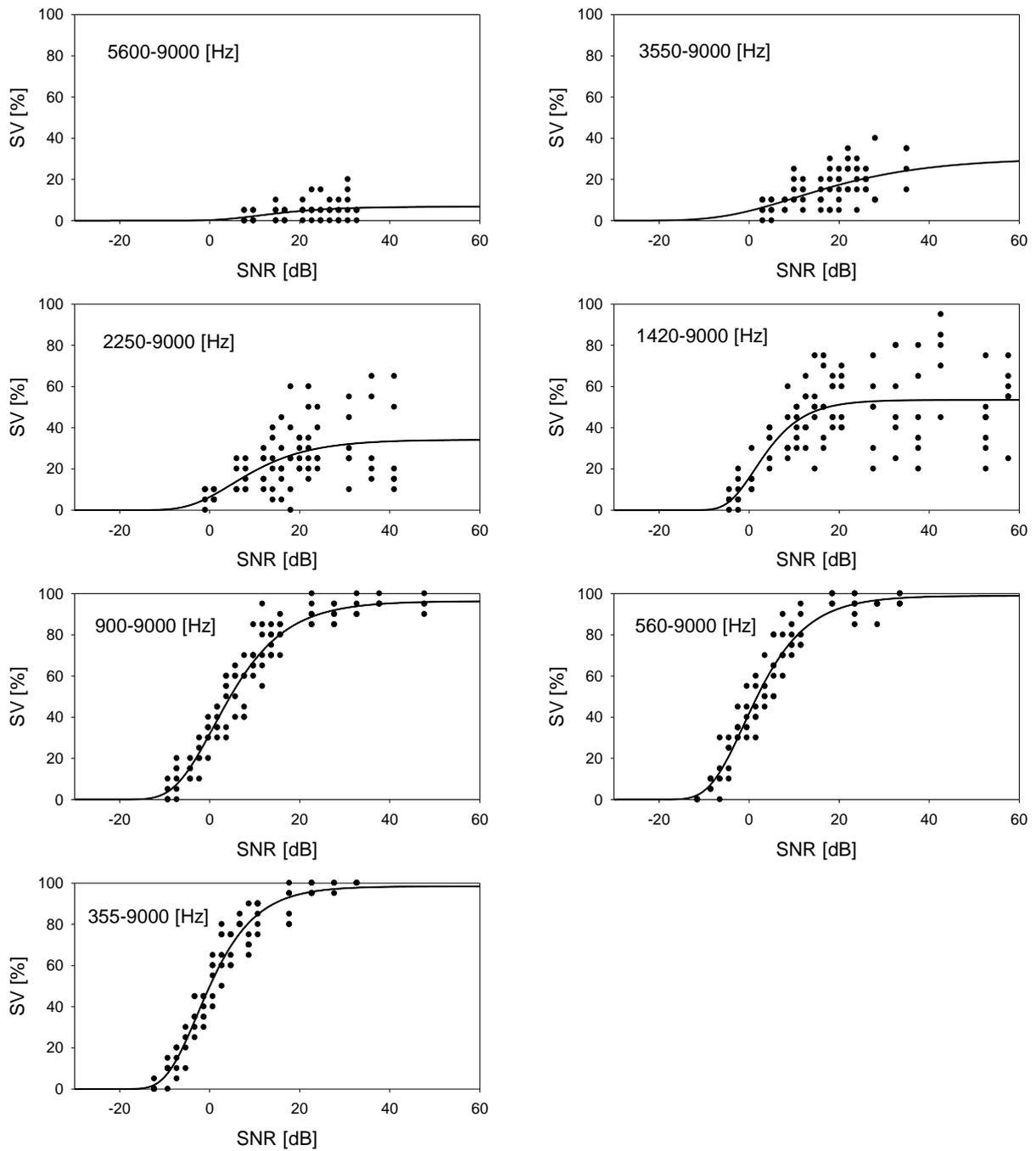


Abb. 8: Mit der Gompertz-Funktion als Modellfunktion erstellte Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des SNR [dB] für die verwendeten Hochpassfilterungen.

In den Abbildungen 3 - 8 ist zu erkennen, dass die SV innerhalb jeder Filterbandbreite mit steigendem SNR ansteigt bis sie ein Maximum erreicht. Bei geringem SNR fällt die SV in allen Frequenzbändern auf 0 ab. Die Streuung der Messwerte zeigt sich bei mittlerer SV erwartungsgemäß größer als bei sehr hoher oder sehr niedriger SV.

Für jede Filterbandbreite beinhaltet die Diskriminationsfunktion den Wendepunkt  $x_0$  als einen Parameter der Funktion. Der Wert des SNR, bei dem eine SV von 50% resultiert, entspricht der Sprachverständlichkeitsschwelle SRT (Speech Recognition Threshold) (1, S.28). Unter der Bedingung, dass eine maximale Verständlichkeit von 100% erreicht wurde (hier für die Breitbandbedingung), gibt bei der logistischen Fitfunktion das SNR des Wendepunkts die SRT an. Bei der Gompertz-Funktion befindet sich der Wendepunkt schon bei etwa 36,7% der unter dieser Filterbandbreite maximal möglichen Sprachverständlichkeit (48). Ihm kommt somit auch unter Bedingung einer maximalen Verständlichkeit von 100% nicht die Bedeutung der SRT zu. Falls die maximale Verständlichkeit unter 100%, aber bei mehr als 50% lag, kann die SRT aus der inversen Funktionsgleichung beider Fitfunktionen errechnet werden. Die Funktionsparameter der Diskriminationsfunktionen enthalten des Weiteren die maximalen Werte der Sprachverständlichkeit  $a$  sowie den Parameter  $b$ , aus dem sich die maximalen Steigungen (sie liegen jeweils am Wendepunkt) berechnen lassen. Tabelle 3 stellt die Werte dieser Funktionsparameter sowie die  $R^2$ -Werte der Funktionen, resultierend aus dem Fitting mit der oben genannten logistischen Funktion, für die verschiedenen Filterbandbreiten dar. Tabelle 4 führt diese Werte für die mit der Gompertz-Funktion erstellten Diskriminationsfunktionen auf.

Der Mittelwert der  $R^2$ -Werte lag mit 0,6720 bei der Fittingmethode mit der Gompertz-Funktion etwas höher als mit 0,6676 bei der logistischen Fittingfunktion. Vergleicht man die  $R^2$ -Werte mittels des Mann-Whitney-U-Tests (siehe Anhang 7.3), so ergibt sich kein signifikanter Unterschied. Die beiden Fittingfunktionen repräsentieren die Einzelwerte gleich gut. Da sich aber für niedrige SNR der Verlauf der Gompertz-Funktion visuell besser an die Messwerte anpasst, wurde für die weitere Auswertung die Gompertz-Funktion verwendet.

Bandbreite [Hz]	Maximale SV a [%]	Wendepunkt $x_0$ [dB]	SRT [dB]	Maximale Steigung [%/dB]	R <sup>2</sup>
88-9000	100,0	-2,0	-2,0	6,1	0,9369
88-560	6,6	-3,8		1,8	0,1957
88-900	29,4	3,0		1,8	0,5328
88-1420	64,6	11,6	23,8	1,6	0,8604
88-2250	86,7	4,2	6,0	3,7	0,9094
88-3550	93,9	2,6	3,3	4,5	0,9392
88-5600	92,8	-2,7	-2,3	7,5	0,925
5600-9000	6,4	14,0		0,3	0,114
3550-9000	27,1	14,1		0,7	0,3295
2250-9000	33,3	8,7		1,3	0,2936
1420-9000	53,6	3,8	16,1	3,4	0,5159
900-9000	91,8	3,5	5,2	4,4	0,9143
560-9000	95,9	1,6	2,2	4,9	0,9417
355-9000	95,4	-0,3	-1,3	5,1	0,9385

Tab. 3: Funktionsparameter und SRTs (für  $a > 50\%$ ) der logistischen SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen (Gleichung 5). Die maximale Steigung wurde mit dem Parameter b aus Gleichung 6 errechnet.

Bandbreite [Hz]	Maximale SV a [%]	Wendepunkt $x_0$ [dB]	SRT [dB]	Maximale Steigung [%/dB]	R <sup>2</sup>
88-9000	100,0	-4,6	-2,5	6,4	0,9431
88-560	6,7	-4,7		1,6	0,1931
88-900	29,8	0,3		1,8	0,5301
88-1420	69,1	6,5	24,4	1,6	0,8683
88-2250	90,8	0,9	5,8	3,6	0,9164
88-3550	96,9	-0,4	2,9	4,5	0,9478
88-5600	95,2	-4,5	-2,4	7,4	0,932
5600-9000	6,8	11,0		0,3	0,1139
3550-9000	30,3	10,3		0,7	0,3323
2250-9000	34,2	4,9		1,3	0,291
1420-9000	53,5	1,2	17,5	3,3	0,5054
900-9000	96,4	0,9	4,7	4,1	0,9374
560-9000	99,0	-1,2	1,8	4,7	0,9464
355-9000	98,4	-2,7	-0,1	5,1	0,9513

Tab. 4: Funktionsparameter und SRTs (für  $a > 50\%$ ) der mit der Gompertz-Funktion (Gleichung 8) erstellten SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen. Die maximale Steigung wurde mit dem Parameter b aus Gleichung 9 errechnet.

### 3.2.2 Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen

Aus den mit der Gompertz-Funktion erstellten SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen werden SV-Werte für bestimmte SNR-Werte berechnet. Die SNRs werden so gewählt, dass der niedrigste Wert in der Breitbandbedingung erstmals zu SV-Werten größer 0% führt und das maximale SNR erstmals eine SV von 100 % ergibt. Die SNR-Bedingungen dazwischen werden gleichmäßig verteilt in 5 dB-Schritten gewählt. Damit ergeben sich folgende SNR-Werte: -10 dB, -5 dB, 0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB, 20 dB, 25 dB, 30 dB, 35 dB, 40 dB, mit denen jeweils separat die Sprachverständlichkeiten für alle Filterbedingungen (Breitband, Hochpass- und Tiefpassfilterung) ermittelt werden. Der SNR-Wert von +60 dB wird aufgrund der gemessenen Sprachdynamik (siehe Abbildung 1) als effektiv störgeräuschfreie Bedingung zusätzlich aufgenommen, um die maximalen Sprachverständlichkeiten zu ermitteln. Die so gewonnenen Werte der Sprachverständlichkeit sind in Tabelle 5 und 6 aufgeführt. Abbildung 9 zeigt sie aufgetragen gegen die Hoch- bzw. Tiefpass-Grenzfrequenz  $f_i$ .

SV [%]	SNR [dB]												
	Bandbreite [Hz]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	60
<b>88-355</b>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>88-560</b>		0	1,9	6,3	6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
<b>88-900</b>		0,1	2,8	10,4	18,7	24,2	27,2	28,6	29,3	29,5	29,7	29,7	29,8
<b>88-1420</b>		4,1	8,8	15,4	23,1	31,0	38,5	45,1	50,6	55,0	58,5	61,2	66,7
<b>88-2250</b>		3,7	13,9	30,1	47,5	62,1	72,7	79,7	84,1	86,8	88,5	89,4	90,7
<b>88-3550</b>		3,4	16,2	37,3	58,2	73,8	83,8	89,7	93,0	94,8	95,7	96,3	96,8
<b>88-5600</b>		4,0	31,5	64,8	83,3	90,9	93,7	94,7	95,1	95,2	95,2	95,2	95,2
<b>88-9000</b>		7,8	34,3	63,9	82,8	92,4	96,7	98,6	99,4	99,8	99,9	100	100

Tab. 5: Tiefpassfilterung: Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit von Bandbreite [Hz] und SNR [dB], die Werte wurden den mittels der Gompertz-Funktion erstellten Diskriminationsfunktionen entnommen.

SV [%]	SNR [dB]												
	Bandbreite [Hz]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	60
<b>5600-9000</b>		0	0	0,2	1,0	2,2	3,5	4,6	5,4	5,9	6,3	6,5	6,7
<b>3550-9000</b>		1,0	2,4	4,7	7,6	10,9	14,3	17,4	20,1	22,4	24,2	25,7	28,9
<b>2250-9000</b>		0,3	2,0	6,4	12,7	19,0	24,2	27,9	30,3	31,8	32,8	33,4	34,1
<b>1420-9000</b>		0,1	3,2	15,7	31,3	42,4	48,3	51,2	52,5	53,1	53,3	53,4	53,5
<b>900-9000</b>		3,0	13,5	31,9	51,7	67,8	79,1	86,2	90,5	93,0	94,5	95,3	96,3
<b>560-9000</b>		4,3	19,1	41,9	63,1	78,2	87,5	92,8	95,7	97,2	98,1	98,5	98,9
<b>355-9000</b>		5,9	24,8	49,9	70,5	83,6	90,8	94,6	96,5	97,5	98,0	98,2	98,4
<b>88-9000</b>		7,8	34,3	63,9	82,8	92,4	96,7	98,6	99,4	99,8	99,9	100	100

Tab. 6: Hochpassfilterung: Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit von Bandbreite [Hz] und SNR [dB], die Werte wurden den mittels der Gompertz-Funktion erstellten Diskriminationsfunktionen entnommen.

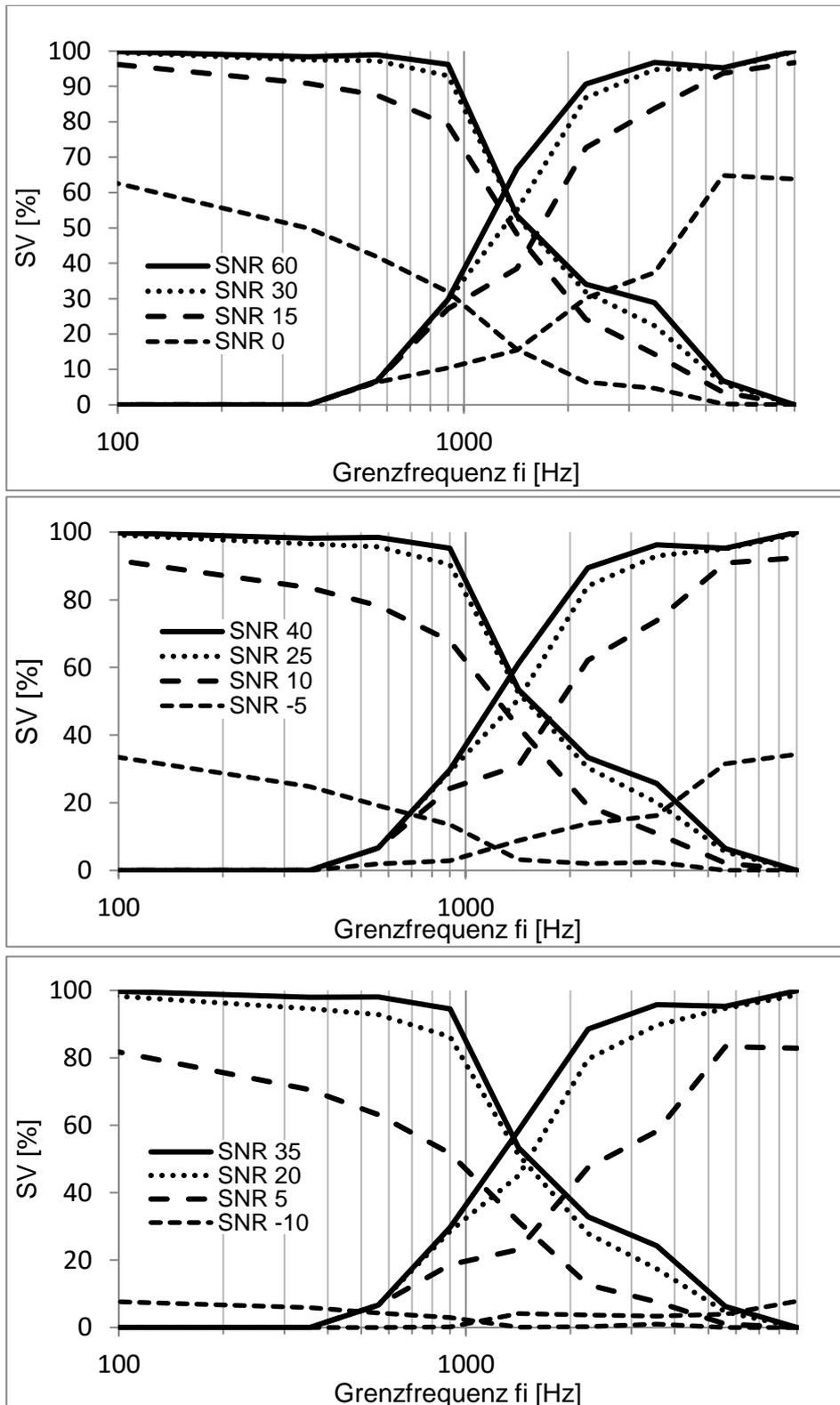


Abb. 9: Werte der Sprachverständlichkeit [%] aus Tabelle 5 und 6 aufgetragen gegen die Grenzfrequenz  $f_i$  [Hz]; bei den Hochpässen (Anstieg nach links) entspricht  $f_i$  der unteren Grenzfrequenz, die obere Grenzfrequenz ist stets 9000 Hz; bei den Tiefpässen (Anstieg nach rechts) entspricht  $f_i$  der oberen Grenzfrequenz, die untere Grenzfrequenz liegt stets bei 88 Hz.

Anschließend werden mittels dieser Werte frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen für die entsprechenden SNR-Werte erstellt. Hierfür wird als Modellfunktion der Sprachverständlichkeit die häufig verwendete logistische Funktion gewählt:

$$SV(f_i) = \frac{a}{1 + e^{\frac{x_0 - f_i}{b}}} \quad (11)$$

Dabei bestimmt der Funktionsparameter  $a$  die maximale Sprachverständlichkeit,  $x_0$  die Frequenz des Wendepunktes und  $b$  die Steilheit der Funktion. Bei den frequenzabhängigen Tiefpassdiskriminationsfunktionen stellt  $f_i$  die Obergrenze des dargebotenen Frequenzbandes dar. Die Untergrenze ist fix bei 88Hz angesetzt. Bei den frequenzabhängigen Hochpassdiskriminationsfunktionen stellt  $f_i$  die Untergrenze des präsentierten Bandes dar. Die Obergrenze ist hier fix bei 9000 Hz.

Die Funktionsparameter werden mit dem Programm SigmaPlot 13.0 angepasst. Die 24 entstehenden frequenzabhängigen Diskriminationsfunktionen sind in Abbildung 10 dargestellt. Die zugehörigen Funktionsparameter und  $R^2$ -Werte finden sich in Tabelle 7.

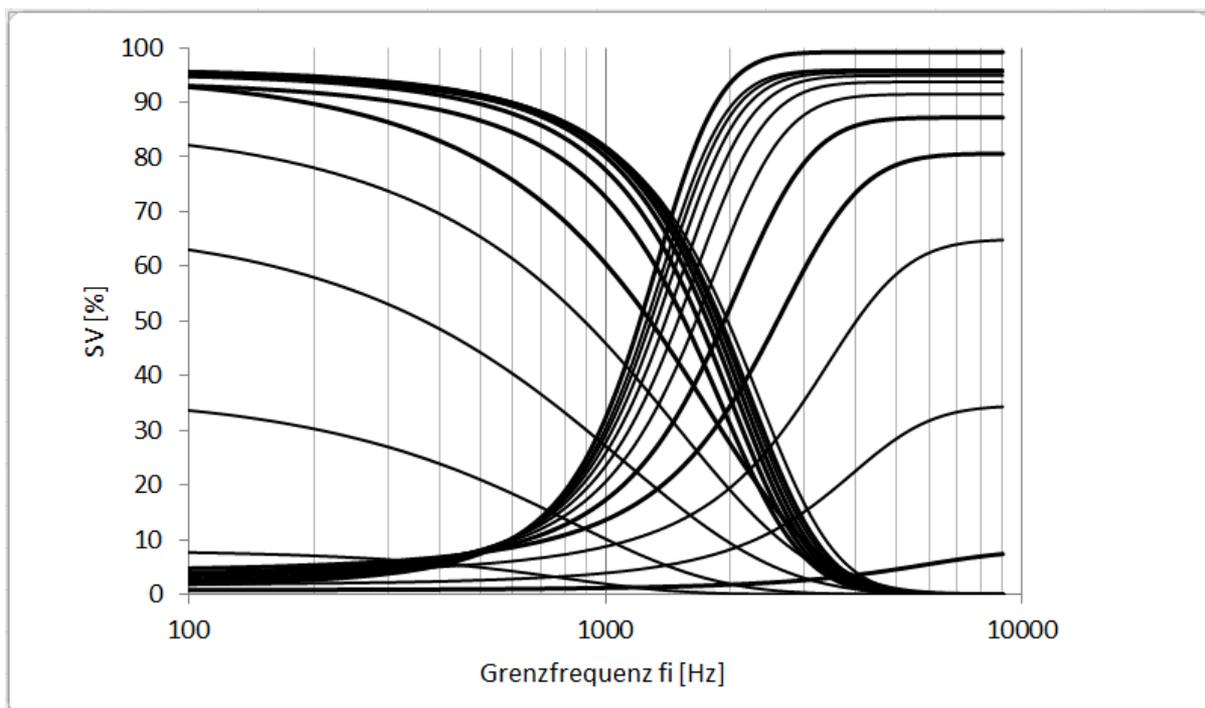


Abb. 10: Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen, erstellt mit der logistischen Fittingmethode

<b>Tiefpässe</b>				
	R <sup>2</sup>	maximale Sprachverständlichkeit a [%]	Steilheitsparameter b	Wendepunkt x <sub>0</sub> [Hz]
bei SNR= -10	0,76	8,1	1966,1	4485
bei SNR= -5	0,97	34,5	1107,8	3279
bei SNR= 0	0,97	64,9	979,3	2820
bei SNR= 5	0,97	80,6	761,8	2214
bei SNR= 10	0,98	87,2	547,6	1766
bei SNR= 15	0,98	91,5	456,7	1565
bei SNR= 20	0,99	93,7	399,9	1439
bei SNR= 25	0,99	94,9	359,9	1354
bei SNR= 30	0,99	95,5	331,5	1297
bei SNR= 35	0,99	95,8	311,2	1258
bei SNR= 40	0,99	95,9	296,6	1230
bei SNR= 60	0,99	99,2	281,0	1206
<b>Hochpässe</b>				
	R <sup>2</sup>	a	b	x <sub>0</sub>
bei SNR= -10	0,97	10,6	-364,3	453
bei SNR= -5	0,99	79,3	-557,7	-69
bei SNR= 0	0,996	226,8	-864,8	-724
bei SNR= 5	0,997	151,0	-895,8	261
bei SNR= 10	0,99	128,6	-840,4	901
bei SNR= 15	0,98	100,0	-559,0	1548
bei SNR= 20	0,97	100,0	-542,9	1677
bei SNR= 25	0,96	100,0	-545,8	1760
bei SNR= 30	0,95	100,0	-558,3	1817
bei SNR= 35	0,94	100,0	-574,8	1860
bei SNR= 40	0,94	100,0	-592,1	1892
bei SNR= 60	0,92	100,0	-642,8	1966

Tab. 7: Parameter der frequenzabhängigen Diskriminationsfunktionen, erstellt mit der logistischen Fittingmethode

### 3.3 Relative Transferfunktion

Die frequenzabhängigen Diskriminationsfunktionen werden verwendet, um den Zusammenhang von AI-Werten und Werten der Sprachverständlichkeit, die relative Transferfunktion, herzustellen (3). 32 Wertepaare, die diesen Zusammenhang beschreiben, konnten bestimmt werden:

Die frequenzabhängige Hochpassdiskriminationsfunktion für ein maximal hohes SNR, in unserem Fall 60dB,  $f(x)$  sowie die frequenzabhängige Tiefpassdiskriminationsfunktion für ebenfalls 60dB  $g(x)$  erreichen jeweils eine maximale SV von 100%. Diesem Wert der SV wird bei der Erstellung der relativen Transferfunktion ein AI-Wert von 1 zugeordnet. Die beiden Diskriminationsfunktionen werden daher im Folgenden  $SV_{HP}(SNR_{AI1})$  und  $SV_{TP}(SNR_{AI1})$  genannt. Der x-Wert des Schnittpunktes dieser Funktionen, die sogenannte Crossover Frequenz, stellt diejenige Frequenz dar, oberhalb und unterhalb derer sich jeweils genau 50% der Sprachinformation befinden. An dieser Stelle ist demzufolge der AI 0,5 und die dazugehörige SV, in diesem Fall 67,56% ist einem AI von 0,5 zuzuordnen. Dies ergibt das erste Wertepaar der relativen Transferfunktion. Das nächste Wertepaar wird festgelegt, indem nun eine frequenzabhängige Hochpass- und Tiefpassdiskriminationsfunktion  $h(x)$  und  $i(x)$  mit einer maximalen Sprachverständlichkeit von 67,56%, dem Wert der einem AI von 0,5 entspricht, aus SV Werten bei entsprechend niedrigerem SNR erstellt werden (3). Diese werden im Folgenden als  $SV_{TP}(SNR_{AI0,5})$  und  $SV_{HP}(SNR_{AI0,5})$  bezeichnet. Es wird erneut die Crossover Frequenz bestimmt und die zu dieser gehörige SV von 12,66% ermittelt. Diese entspricht nun einem AI-Wert von 0,25 und somit ergibt sich das zweite Wertepaar, das den Verlauf der relativen Transferfunktion festlegt. Abbildung 11 stellt das erklärte Vorgehen anschaulich dar. Dieses Verfahren, mit dem durch Halbieren korrespondierende SV-Werte zu kleineren AI-Werten errechnet werden können, wird für die AI-Werte 0,125 und 0,0625 wiederholt und ergibt SV-Werte von 2,26% und 0,77%. Somit werden mithilfe der Funktionen  $k(x)$ ,  $l(x)$ ,  $m(x)$  und  $n(x)$  zwei weitere Wertepaare für die relative Transferfunktion ermittelt. Die genannten Wertepaare finden sich in Tabelle 8.

Diskriminationsfunktion	AI	SV [%]
$SV_{HP}(SNR_{AI1})$	0,5	67,56
$SV_{TP}(SNR_{AI1})$		
$SV_{TP}(SNR_{AI0,5})$	0,25	12,66
$SV_{HP}(SNR_{AI0,5})$		
$SV_{TP}(SNR_{0,25})$	0,125	2,26
$SV_{HP}(SNR_{AI0,25})$		
$SV_{TP}(SNR_{AI0,125})$	0,0625	0,77
$SV_{HP}(SNR_{AI0,125})$		

Tab. 8: Wertepaare für die graphische Methode nach French und Steinberg (3): Werte der SV [%] korrespondierend zu einem AI von 0,5; 0,25; 0,125 und 0,0625.

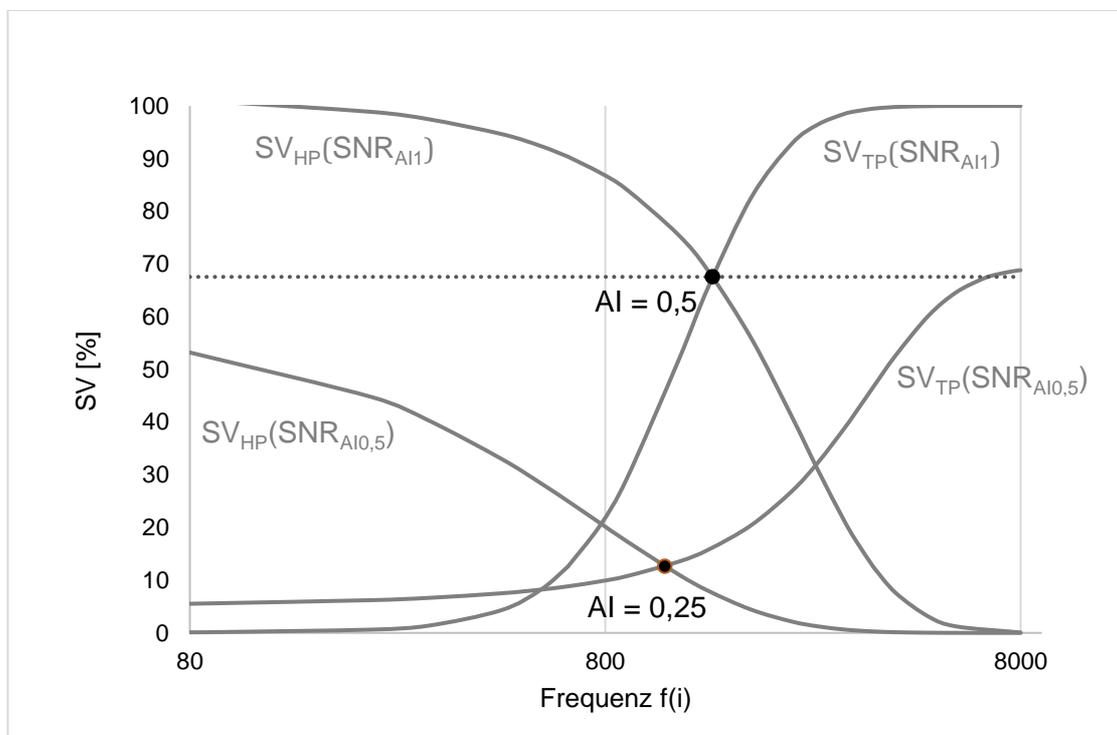


Abb. 11: Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen  $SV_{HP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{TP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{HP}(SNR_{AI0,5})$  und  $SV_{TP}(SNR_{AI0,5})$  zur Ermittlung der SV korrespondierend zu 0,5 AI und 0,25 AI nach der Methode von French und Steinberg (3).

SV-Werte für AI-Werte von größer als 0,5 werden mithilfe der Werte von kleiner 0,5 AI indirekt errechnet. Sprachverständlichkeit ist keine additive Größe, daher ist die Summe der Sprachverständlichkeit eines präsentierten Hochpasses und des dazu komplementären Tiefpasses größer als die Sprachverständlichkeit bei Breitbandpräsentation (3). Der Artikulationsindex dagegen ist additiv, sodass sich bei bekanntem AI-Wert eines präsentierten Tiefpasses auf den AI-Wert des komplementären Hochpasses schließen lässt und umgekehrt. Abbildung 12 zeigt

dieses Vorgehen exemplarisch für einen SV-Wert zu einem AI von 0,75. So wird ein SV-Wert zu 0,75 AI errechnet, indem zunächst der Punkt  $S_1$  auf der Kurve  $SV_{TP}(SNR_{AI1})$  ermittelt wird, der einem AI von 0,25 entspricht. Da der AI additiv ist, lässt sich folgern, dass dem entsprechenden Punkt  $S_2$  auf der komplementären Hochpassfunktion  $SV_{HP}(SNR_{AI1})$  ein AI von 0,75 zuzuordnen ist. Der y-Wert dieses Schnittpunkts  $S_2$  ergibt nun für den AI-Wert 0,75 den korrespondierenden SV-Wert von 90,34%. Auf diese Art und Weise werden nun noch mehr korrespondierende SV-Werte für AI-Werte größer 0,5 und damit weitere Punkte, die den Verlauf der relativen Transferfunktion festlegen, ermittelt.

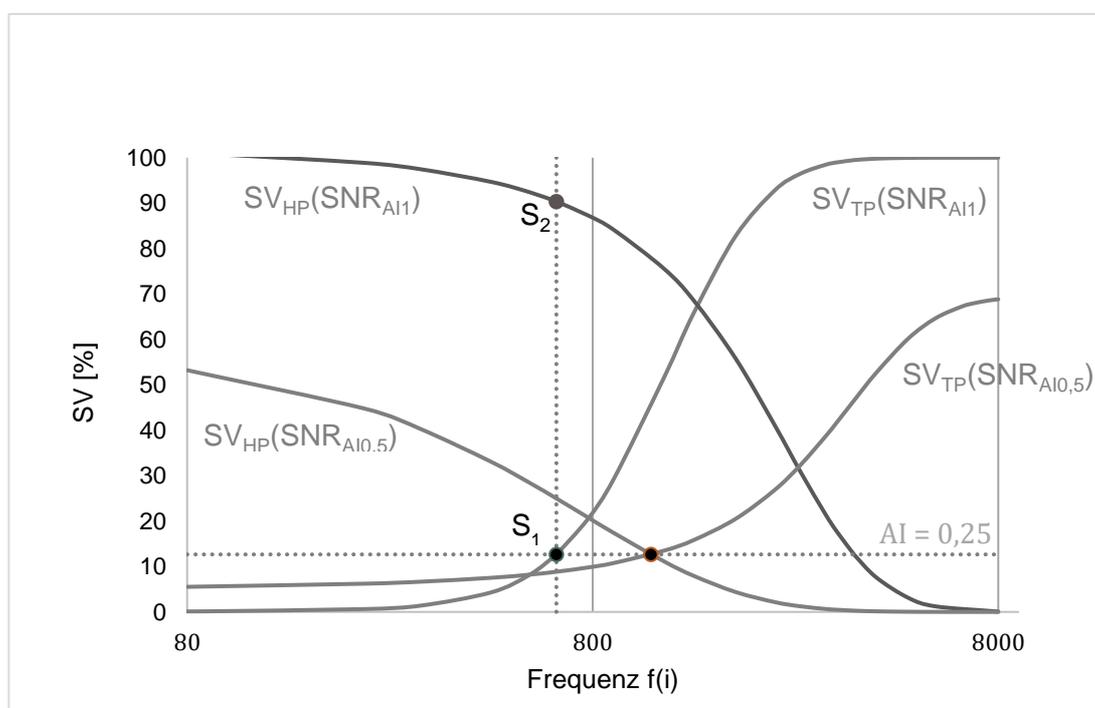


Abb. 12: Frequenzabhängige Diskriminationsfunktionen  $SV_{HP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{TP}(SNR_{AI1})$ ,  $SV_{HP}(SNR_{AI0.5})$  und  $SV_{TP}(SNR_{AI0.5})$  zur Ermittlung der SV korrespondierend zu 0,75 AI nach der Methode von French und Steinberg (3).

Es wurden verschiedene Möglichkeiten, die ermittelten Punkte in einer Funktion zu beschreiben, untersucht. Sehr gut passend zeigte sich eine logistische Funktion der Form

$$SV(AI) = \frac{a}{1 + e^{\frac{x_0 - AI}{b}}} \quad (12)$$

Hierbei bestimmt  $a$  den Maximalwert der Sprachverständlichkeit,  $b$  die Steilheit der Kurve und  $x_0$  den AI-Wert des Wendepunkts. Die Parameter werden wiederum mit

SigmaPlot 13.0 angepasst und sind in Tabelle 9 angegeben. Es konnte ein exzellentes Fittingergebnis mit einem  $R^2$  Wert von 0,9956 erzielt werden. Somit ergibt sich als relative Transferfunktion

$$SV(AI) = \frac{0,9935}{1 + e^{\frac{0,4474 - AI}{0,0725}}} \quad (13)$$

a	0,9935
b	0,0725
$x_0$	0,4474
$R^2$	0,9956

Tab. 9: Funktionsparameter der relativen Transferfunktion (Gleichung 12).

Die Steigung am Wendepunkt errechnet sich mit Gleichung 6 und den Werten aus Tabelle 9 zu:

$$m = \frac{a}{4b} = \frac{0,9935}{4 \cdot 0,0725} = 3,4 \frac{SV}{AI} \triangleq 3,4 \frac{\%SV}{\%AI} \quad (14)$$

Um den Steigungswert  $m$  vergleichbar mit den Literaturangaben zu machen, wird die linearisierte Steigung der Diskriminationsfunktion zwischen 20 und 80 %SV berechnet und in %SV pro  $1/30$  AI, also  $\%SV/0,0\bar{3}AI$  umgerechnet.

$$m_{lin} = \frac{dy}{dx} = \frac{0,80 - 0,20}{0,550 - 0,347} \frac{SV}{AI} = \frac{0,60}{0,203} \frac{SV}{AI} = 2,96 \frac{SV}{AI} \triangleq 9,9 \frac{\%SV}{1/30AI} \quad (15)$$

Abbildung 13 zeigt die ermittelten SV- vs. AI-Werte sowie den Verlauf der relativen Transferfunktion  $SV(AI)$ .

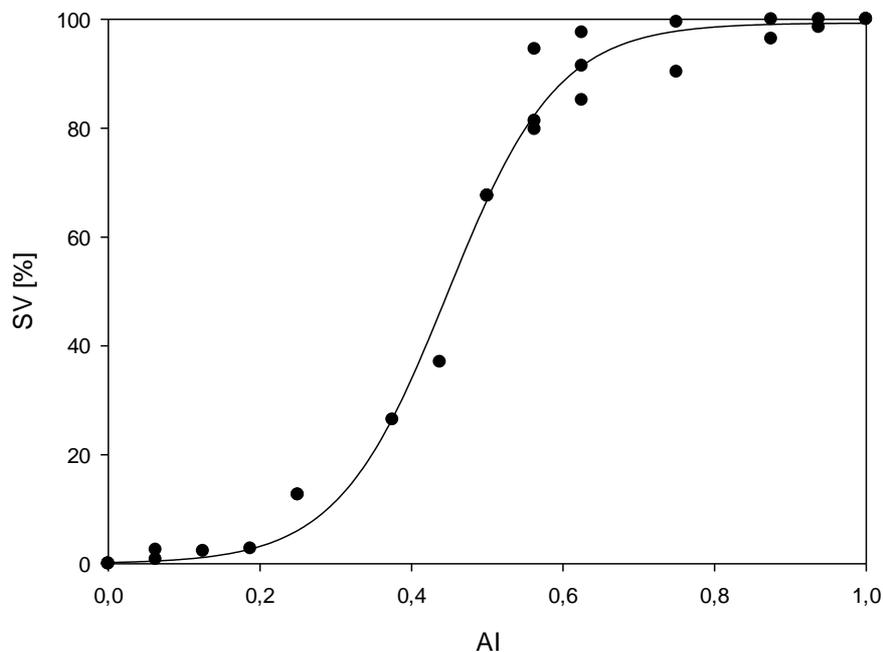


Abb. 13: Relative Transferfunktion für die Sprachverständlichkeit SV [%] in Abhängigkeit des AI für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests.

Diese relative Transferfunktion ist nun repräsentativ für einsilbige Wörter in deutscher Sprache bei normalhörenden, muttersprachlich deutschen Erwachsenen. Speziell passend ist sie für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests, da sie basierend auf Messungen mit diesem Test erstellt wurde.

### 3.4 Frequenz-Wichtigkeits-Funktionen

Im Weiteren wird nun die Frequenz-Wichtigkeits-Funktion (Wichtigkeitsfunktion  $I(i)$ , Band-Importance-Funktion, BIF) für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests erstellt.

#### 3.4.1 Wichtigkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Filtergrenzfrequenz und des SNR

Es werden für 21 Grenzfrequenzen  $f_i$ , die 20 Terzbänder festlegen, Werte der Sprachverständlichkeit aus jeder frequenzabhängigen Diskriminationsfunktion (siehe Kapitel 3.2.2) berechnet und mit der Umkehrfunktion der relativen Transferfunktion (Gleichung 16) in frequenzabhängige AI-Werte umgewandelt. Es werden wiederum die zuvor ermittelten Funktionsparameter aus Tabelle 9 verwendet.

$$AI(SV, f_i) = -(b * \ln\left(\frac{a}{SV(f_i)} - 1\right) - x_0) \quad (16)$$

Die ermittelten AI-Werte sind in Tabelle 10 und in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt. Bei den Hochpassfilterungen ist der resultierende AI-Wert gegen die untere Grenzfrequenz des präsentierten Bandes  $i$  aufgetragen, die Obergrenze ist fix bei 9000 Hz. Bei den Tiefpassfilterungen ist die Grenzfrequenz  $f_i$  die Obergrenze des Bandes, die Untergrenze ist fix bei 88 Hz. Im Anschluss werden mittels dieser Werte 24 kumulative Wichtigkeitsfunktionen für 12 verschiedene SNRs erstellt, für jedes SNR jeweils aus Hochpass- und Tiefpassmessungen. Hierfür wird als Modellfunktion eine logistische Funktion verwendet:

$$AI(f_i) = \frac{a}{1 + e^{\frac{x_0 - f_i}{b}}} \quad (17)$$

Dabei bestimmt der Funktionsparameter  $a$  den in diesem Frequenzband maximal erreichbaren AI,  $x_0$  die Frequenz des Wendepunktes und  $b$  die Steilheit der Funktion. Die Funktionsparameter werden mit dem Programm SigmaPlot 13.0 angepasst. Tabelle 11 führt die entsprechenden Funktionsparameter auf.

<b>AI</b>	<b>SNR [dB]</b>											
<b>f<sub>o</sub>[Hz]</b>	<b>-10</b>	<b>-5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
<b>88</b>	0,10	0,16	0,21	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16
<b>112</b>	0,10	0,16	0,22	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17
<b>142</b>	0,10	0,16	0,22	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17
<b>180</b>	0,10	0,17	0,22	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18
<b>225</b>	0,10	0,17	0,22	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19
<b>280</b>	0,10	0,17	0,23	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21
<b>355</b>	0,11	0,18	0,23	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23
<b>450</b>	0,11	0,18	0,24	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25
<b>560</b>	0,11	0,19	0,25	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
<b>710</b>	0,12	0,20	0,26	0,29	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32
<b>900</b>	0,12	0,21	0,27	0,31	0,32	0,34	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37
<b>1120</b>	0,13	0,22	0,29	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,40	0,41	0,42	0,43
<b>1420</b>	0,14	0,24	0,31	0,35	0,39	0,41	0,44	0,45	0,47	0,48	0,49	0,50
<b>1800</b>	0,15	0,26	0,33	0,39	0,43	0,47	0,50	0,52	0,54	0,56	0,57	0,60
<b>2250</b>	0,17	0,29	0,36	0,42	0,48	0,53	0,56	0,59	0,62	0,63	0,64	0,71
<b>2800</b>	10,8	0,31	0,39	0,46	0,53	0,58	0,62	0,65	0,66	0,67	0,68	0,83
<b>3550</b>	20,0	0,35	0,43	0,51	0,57	0,61	0,65	0,67	0,68	0,69	0,69	0,90
<b>4500</b>	0,22	0,37	0,46	0,54	0,59	0,62	0,65	0,67	0,68	0,69	0,69	0,92
<b>5600</b>	0,24	0,39	0,48	0,55	0,59	0,63	0,65	0,67	0,68	0,69	0,69	0,92
<b>7100</b>	0,25	0,40	0,49	0,55	0,59	0,63	0,65	0,67	0,68	0,69	0,69	0,92
<b>9000</b>	0,27	0,40	0,49	0,55	0,59	0,63	0,65	0,67	0,68	0,69	0,69	0,92

Tab. 10, Teil 1: Kumulative AI-Werte in Abhängigkeit von oberer Grenzfrequenz [Hz] und SNR [dB], errechnet mit Gleichung 16 aus SV-Werten aus den frequenzabhängigen Diskriminationsfunktionen der Tiefpassfilterung.

<b>AI</b>	<b>SNR [dB]</b>											
<b>f<sub>u</sub>[Hz]</b>	<b>-10</b>	<b>-5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>60</b>
<b>88</b>	0,27	0,40	0,49	0,56	0,65	0,64	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67
<b>112</b>	0,27	0,40	0,49	0,56	0,64	0,64	0,67	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67
<b>142</b>	0,27	0,39	0,48	0,55	0,63	0,64	0,66	0,67	0,68	0,68	0,67	0,66
<b>180</b>	0,26	0,39	0,48	0,55	0,62	0,63	0,66	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66
<b>225</b>	0,26	0,39	0,47	0,54	0,60	0,63	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65
<b>280</b>	0,26	0,38	0,46	0,53	0,59	0,62	0,64	0,65	0,66	0,66	0,65	0,65
<b>355</b>	0,25	0,37	0,45	0,52	0,57	0,61	0,63	0,64	0,65	0,64	0,64	0,64
<b>450</b>	0,24	0,36	0,44	0,50	0,56	0,59	0,62	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62
<b>560</b>	0,23	0,35	0,42	0,49	0,54	0,58	0,60	0,61	0,62	0,62	0,62	0,61
<b>710</b>	0,21	0,33	0,41	0,47	0,52	0,56	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60	0,59
<b>900</b>	0,18	0,30	0,39	0,45	0,49	0,53	0,55	0,56	0,57	0,57	0,57	0,57
<b>1120</b>	0,14	0,28	0,37	0,42	0,47	0,50	0,52	0,53	0,54	0,54	0,54	0,55
<b>1420</b>	0,09	0,24	0,34	0,40	0,43	0,47	0,48	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51
<b>1800</b>	0,02	0,19	0,30	0,36	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47
<b>2250</b>	0,00	0,13	0,26	0,32	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,40	0,42
<b>2800</b>	0,00	0,06	0,21	0,27	0,31	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
<b>3550</b>	0,00	0,00	0,15	0,21	0,24	0,19	0,20	0,21	0,22	0,24	0,25	0,27
<b>4500</b>	0,00	0,00	0,07	0,14	0,16	0,07	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13	0,16
<b>5600</b>	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
<b>7100</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>9000</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 10, Teil 2: Kumulative AI-Werte in Abhängigkeit von unterer Grenzfrequenz [Hz] und SNR [dB], errechnet mit Gleichung 16 aus SV-Werten aus den frequenzabhängigen Diskriminationsfunktionen der Hochpassfilterung.

<b>Tiefpässe</b>			
	maximaler AI a	Steilheits- parameter b	Wendepunkt $x_0$ [Hz]
bei SNR = -10	0,2730	2239,0000	1331,6016
bei SNR = -5	0,4063	1595,9089	809,2195
bei SNR = 0	0,5006	1613,7412	638,3967
bei SNR = 5	0,5596	1345,6887	655,6965
bei SNR = 10	0,5950	1011,2796	723,7909
bei SNR = 15	0,6295	884,1388	774,1827
bei SNR = 20	0,6555	801,6682	803,5781
bei SNR = 25	0,6728	737,8233	818,5136
bei SNR = 30	0,6835	688,7727	824,2699
bei SNR = 35	0,6895	651,3936	824,7165
bei SNR = 40	0,6925	622,9134	822,5902
bei SNR = 60	0,9274	766,6397	1254,8065
<b>Hochpässe</b>			
	a	b	$x_0$
bei SNR = -10	0,2742	-355,7814	1127,8446
bei SNR = -5	0,4375	-710,8217	1544,9195
bei SNR = 0	0,5773	-1337,2627	1975,1107
bei SNR = 5	0,6766	-1599,1791	2117,5789
bei SNR = 10	0,8022	-1721,7825	1868,6421
bei SNR = 15	0,7194	-1148,7287	2219,4041
bei SNR = 20	0,7459	-1155,1610	2230,8362
bei SNR = 25	0,7590	-1180,8206	2267,9752
bei SNR = 30	0,7650	-1217,3001	2314,7596
bei SNR = 35	0,7609	-1246,8479	2387,3258
bei SNR = 40	0,7552	-1275,5209	2458,9055
bei SNR = 60	0,7558	-1384,3037	2579,5951

Tab. 11: Funktionsparameter der kumulativen Wichtigkeitsfunktionen

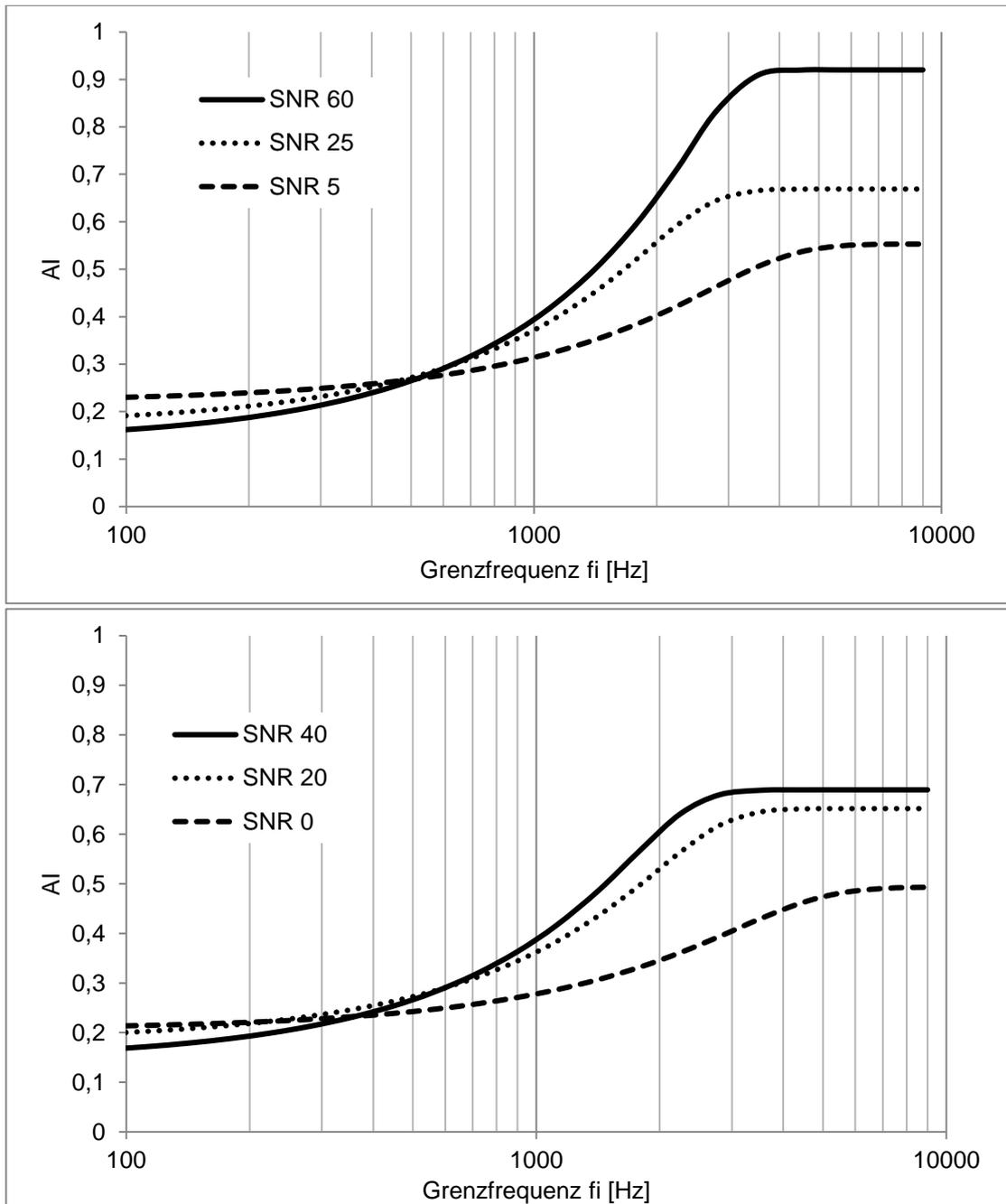


Abb. 14, Teil 1: Kumulativ aufgetragene frequenzabhängige AI-Werte bei Tiefpassfilterung (geglätteter Funktionsverlauf)

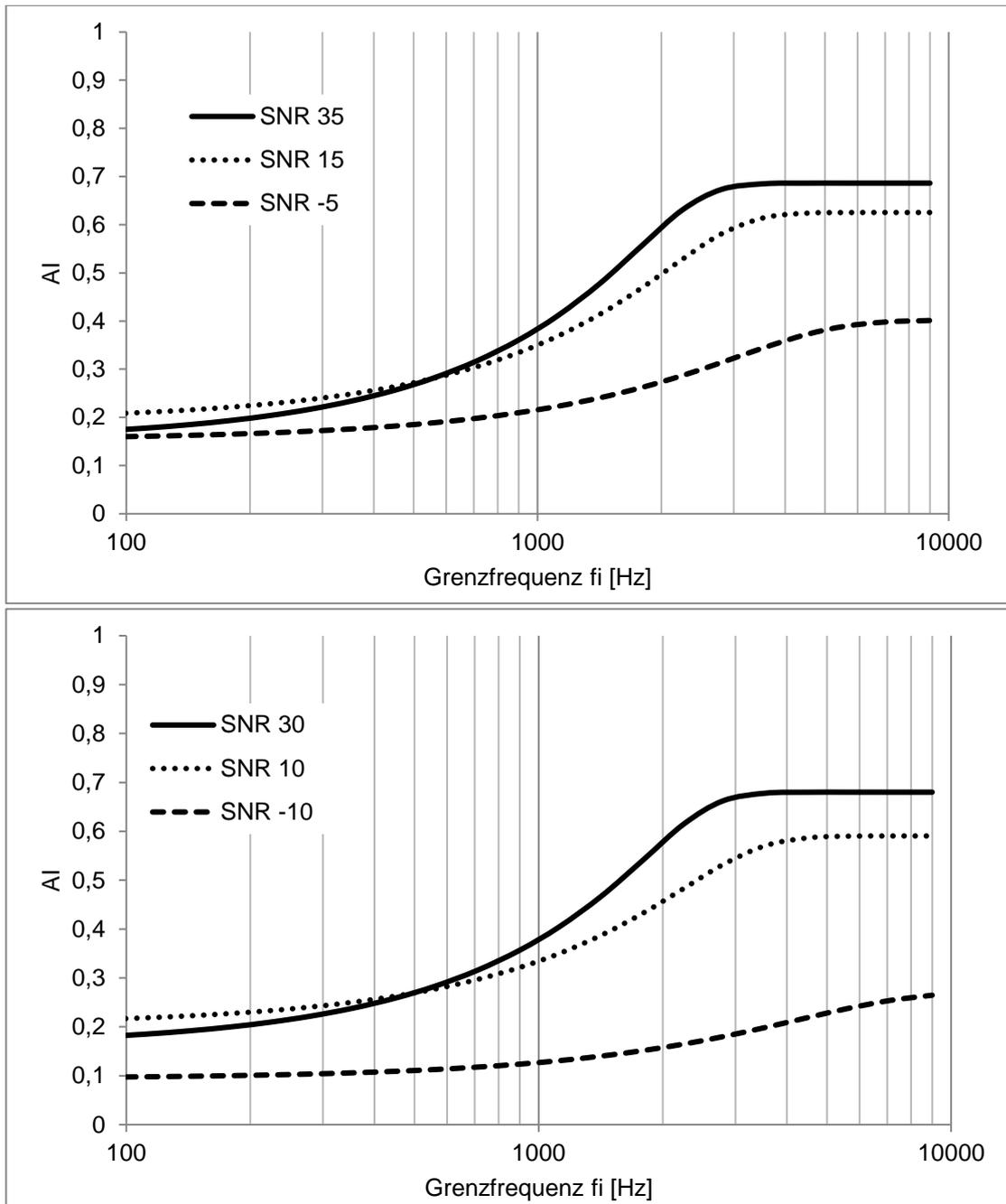


Abb. 14, Teil 2: Kumulativ aufgetragene frequenzabhängige AI-Werte bei Tiefpassfilterung (geglätteter Funktionsverlauf)

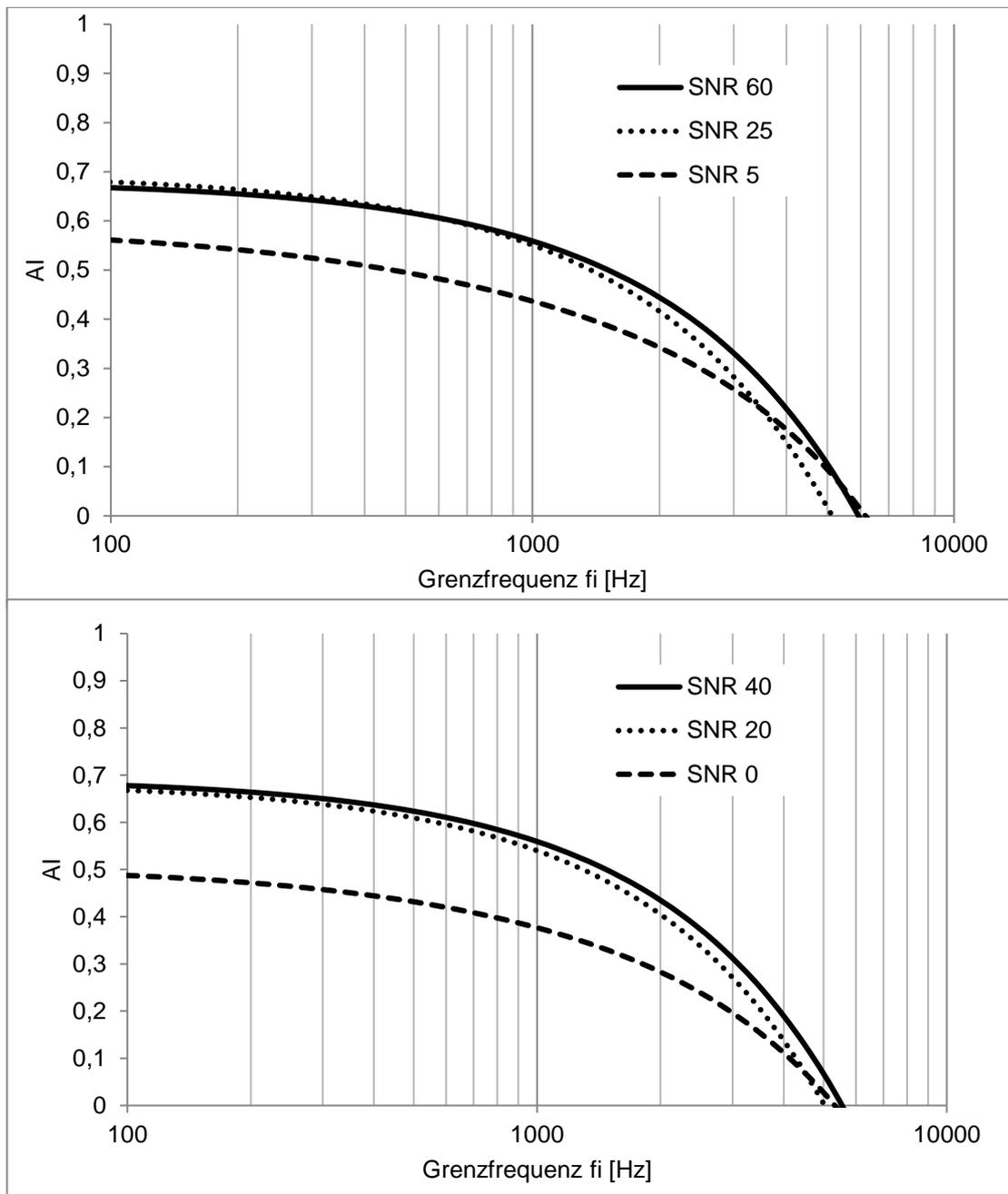


Abb. 15, Teil 1: Kumulativ aufgetragene frequenzabhängige AI-Werte bei Hochpassfilterung (geglätteter Funktionsverlauf)

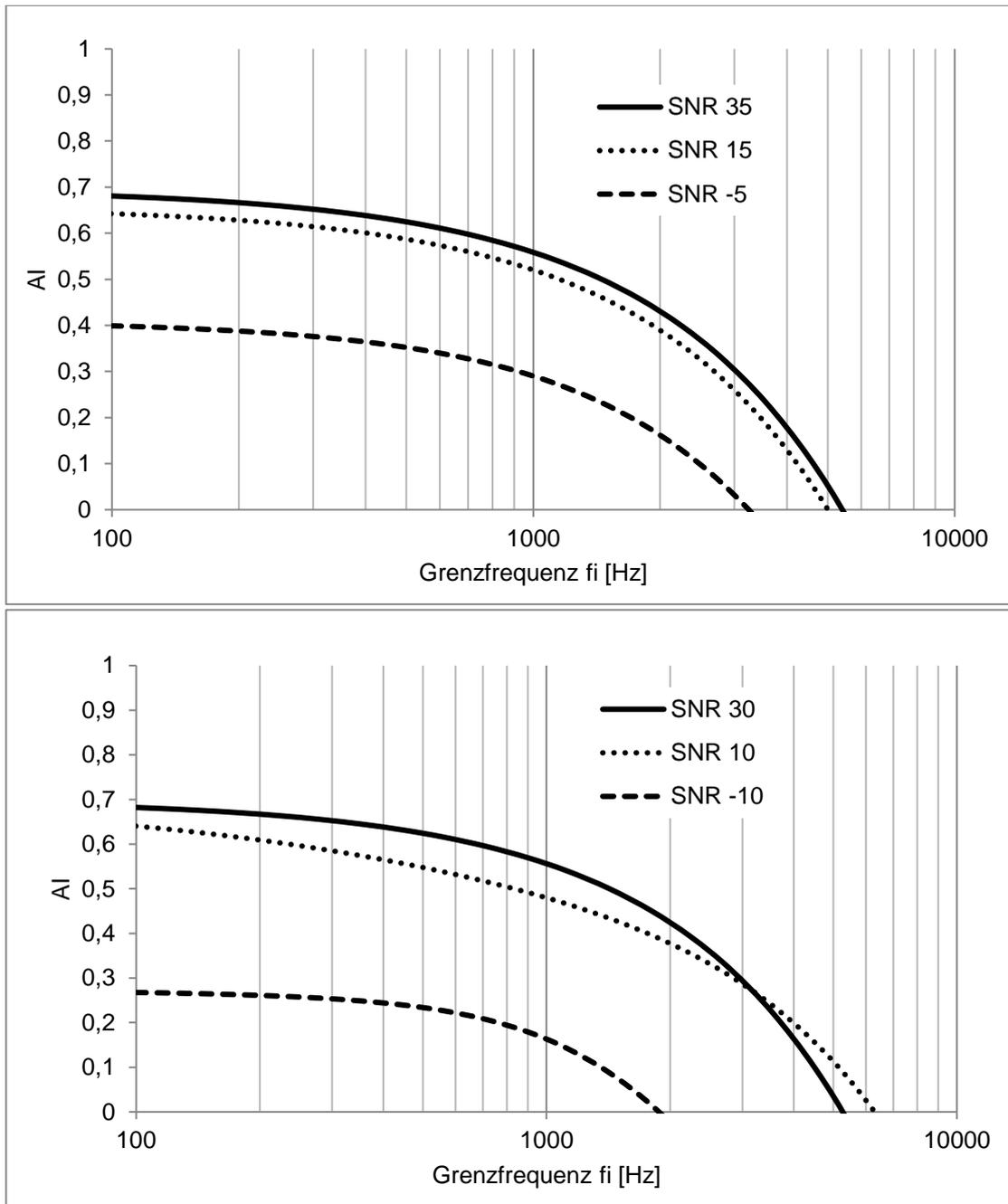


Abb. 15, Teil 2: Kumulativ aufgetragene frequenzabhängige AI-Werte bei Hochpassfilterung (geglätteter Funktionsverlauf)

Der AI steigt in beiden Filterarten erwartungsgemäß bei Verbreiterung der Bandbreite an. Die Differenz der AI-Werte zwischen zwei Grenzfrequenzen ist proportional zur Wichtigkeit  $I$  des zwischen diesen Grenzfrequenzen liegenden Bandes (3, 7). Somit können nun aus den oben erwähnten gefitteten Funktionen (Gleichung 17, Parameter in Tabelle 11) entsprechende Differenzen für  $i = 20$  Terzbänder zwischen 88 und 9000 Hz errechnet werden. Für jedes Terzband sind dann 24 Wichtigkeitswerte aus AI-Differenzen bei den 24 verschiedenen Kombinationen aus Filter- und SNR-Bedingungen vorhanden. Die Wichtigkeit  $I$  in Abhängigkeit des Frequenzbandes  $i$  wird in jedem SNR im Verhältnis zum bei betrachtetem SNR maximalen AI - erreichbar bei Breitbandbedingung - angegeben. Die Wichtigkeitswerte der Hoch- und Tiefpässe desselben SNR werden anschließend arithmetisch gemittelt. Es entsteht für jede der 12 SNR-Bedingungen eine nicht-kumulative Wichtigkeitsfunktion (Band-Importance-Function) aufgetragen nach Mittenfrequenz der Terzbänder. Die Einzelwerte der Bandwichtigkeit in Abhängigkeit der Filter- und SNR-Bedingung sind Tabelle 12 zu entnehmen.

I(i)	-10dB		-5dB		0dB		5dB	
	HP	TP	HP	TP	HP	TP	HP	TP
88-112	0,003	0,004	0,004	0,006	0,004	0,006	0,003	0,007
112-142	0,004	0,005	0,005	0,007	0,005	0,008	0,004	0,009
142-180	0,006	0,007	0,007	0,009	0,006	0,010	0,005	0,011
180-225	0,008	0,008	0,008	0,011	0,007	0,012	0,007	0,014
225-280	0,011	0,010	0,010	0,014	0,009	0,015	0,008	0,017
280-355	0,018	0,013	0,015	0,019	0,012	0,020	0,011	0,023
355-450	0,027	0,017	0,021	0,024	0,016	0,025	0,015	0,029
450-560	0,040	0,020	0,027	0,028	0,019	0,029	0,018	0,034
560-710	0,071	0,027	0,041	0,039	0,028	0,040	0,025	0,046
710-900	0,118	0,035	0,058	0,049	0,037	0,051	0,033	0,058
900-1120	0,165	0,040	0,076	0,057	0,045	0,058	0,040	0,067
1120-1420	0,220	0,055	0,114	0,076	0,065	0,077	0,057	0,088
1420-1800	0,184	0,070	0,150	0,092	0,087	0,093	0,075	0,104
1800-2250	0,089	0,081	0,159	0,101	0,105	0,101	0,091	0,108
2250-2800	0,029	0,095	0,140	0,108	0,123	0,106	0,110	0,108
2800-3550	0,006	0,117	0,101	0,117	0,144	0,114	0,137	0,107
3550-4500	0,001	0,125	0,046	0,103	0,130	0,100	0,138	0,083
4500-5600	0,000	0,109	0,014	0,071	0,087	0,068	0,107	0,049
5600-7100	0,000	0,097	0,003	0,047	0,052	0,045	0,077	0,027
7100-9000	0,000	0,065	0,000	0,022	0,020	0,021	0,038	0,010

Tab. 12, Teil 1: Wichtigkeit I der  $i = 20$  Terzbänder für SNR von -10 bis 5 dB.

I(i)	10dB		15dB		20dB		25dB	
	HP	TP	HP	TP	HP	TP	HP	TP
88-112	0,004	0,008	0,003	0,009	0,003	0,009	0,003	0,009
112-142	0,005	0,010	0,004	0,011	0,004	0,011	0,004	0,011
142-180	0,006	0,013	0,005	0,014	0,005	0,014	0,005	0,015
180-225	0,007	0,016	0,006	0,017	0,006	0,017	0,006	0,018
225-280	0,009	0,020	0,007	0,021	0,007	0,022	0,007	0,022
280-355	0,012	0,027	0,010	0,029	0,010	0,030	0,010	0,031
355-450	0,016	0,035	0,014	0,038	0,013	0,039	0,013	0,041
450-560	0,019	0,041	0,017	0,044	0,017	0,047	0,016	0,049
560-710	0,027	0,057	0,024	0,062	0,024	0,065	0,024	0,069
710-900	0,035	0,072	0,034	0,078	0,033	0,083	0,033	0,088
900-1120	0,042	0,082	0,043	0,089	0,042	0,095	0,041	0,100
1120-1420	0,059	0,106	0,064	0,114	0,064	0,121	0,062	0,127
1420-1800	0,076	0,119	0,089	0,126	0,089	0,131	0,086	0,134
1800-2250	0,090	0,116	0,112	0,117	0,112	0,116	0,109	0,115
2250-2800	0,106	0,103	0,136	0,097	0,135	0,091	0,133	0,085
2800-3550	0,131	0,086	0,159	0,074	0,159	0,063	0,159	0,055
3550-4500	0,132	0,053	0,137	0,039	0,138	0,031	0,141	0,024
4500-5600	0,105	0,024	0,082	0,015	0,083	0,010	0,087	0,007
5600-7100	0,079	0,009	0,042	0,005	0,043	0,003	0,046	0,002
7100-9000	0,042	0,002	0,013	0,001	0,014	0,000	0,015	0,000

Tab. 12, Teil 2: Wichtigkeit I der  $i = 20$  Terzbänder für SNR von 10 bis 25 dB.

I(i)	30dB		35dB		40dB		60dB	
Terzband	HP	TP	HP	TP	HP	TP	HP	TP
88-112	0,003	0,009	0,003	0,009	0,003	0,011	0,003	0,006
112-142	0,004	0,011	0,003	0,012	0,003	0,014	0,003	0,007
142-180	0,005	0,015	0,004	0,015	0,004	0,018	0,004	0,009
180-225	0,005	0,018	0,005	0,018	0,005	0,021	0,005	0,012
225-280	0,007	0,023	0,007	0,023	0,006	0,026	0,006	0,015
280-355	0,010	0,032	0,009	0,033	0,009	0,035	0,009	0,021
355-450	0,013	0,042	0,012	0,043	0,012	0,044	0,012	0,028
450-560	0,016	0,051	0,015	0,053	0,015	0,051	0,014	0,035
560-710	0,023	0,072	0,022	0,074	0,021	0,070	0,020	0,051
710-900	0,032	0,092	0,030	0,096	0,029	0,088	0,028	0,069
900-1120	0,040	0,105	0,038	0,109	0,037	0,101	0,034	0,085
1120-1420	0,060	0,132	0,058	0,135	0,055	0,135	0,051	0,119
1420-1800	0,084	0,136	0,081	0,137	0,078	0,157	0,072	0,143
1800-2250	0,106	0,112	0,103	0,108	0,099	0,139	0,092	0,140
2250-2800	0,130	0,078	0,128	0,073	0,125	0,072	0,117	0,118
2800-3550	0,158	0,047	0,158	0,041	0,157	0,017	0,152	0,085
3550-4500	0,144	0,019	0,148	0,015	0,152	0,002	0,155	0,041
4500-5600	0,093	0,005	0,098	0,004	0,104	0,000	0,116	0,013
5600-7100	0,051	0,001	0,056	0,001	0,062	0,000	0,076	0,004
7100-9000	0,018	0,000	0,020	0,000	0,023	0,000	0,032	0,001

Tab. 12, Teil 3: Wichtigkeit I der  $i = 20$  Terzbänder für SNR von 30 bis 60 dB.

Die Bandwichtigkeiten für die verschiedenen SNR-Bedingungen sind in Abbildung 16 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Bereiche größter Wichtigkeit zwischen 1500 und 4000 Hz erreicht werden. Zu beiden Seiten des Maximums fallen die Wichtigkeitskurven ab.

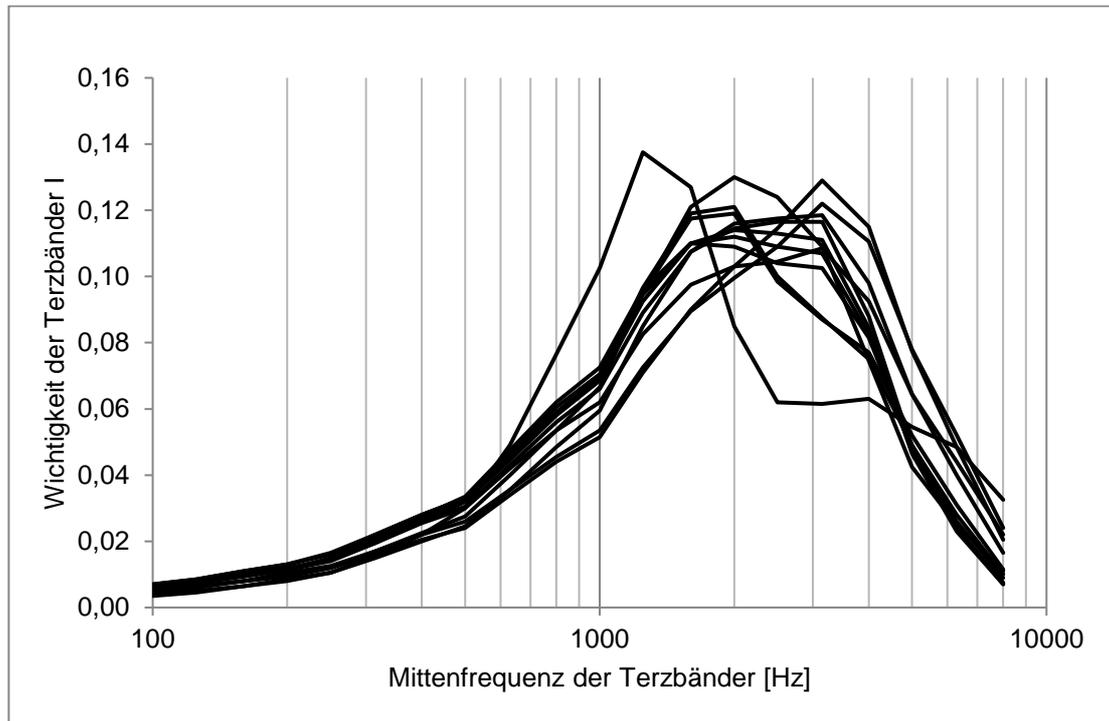


Abb. 16: SNR-spezifische Bandwichtigkeiten jeweils gemittelt aus den Wichtigkeitswerten für Hochpass- und Tiefpassfilterung aus Tabelle 12, aufgetragen nach der Mittenfrequenz  $f_{mi}$  der 20 Terzbänder. Der Funktionsverlauf bei einem SNR von -10 dB weicht erheblich von denen mit höherem SNR ab.

### 3.4.2 Wichtigkeitsfunktionen für das AI- und SII-Verfahren

Die Wichtigkeitsfunktionen  $I(f_{mi})$ , die gleichermaßen im AI- und SII-Verfahren verwendet werden können, werden aus dem Mittelwert der Hochpass- und Tiefpassmessungen der SNR-spezifischen Einzelfunktionen ermittelt. Es werden Wichtigkeitsfunktionen für verschiedene Bandbreiten der Frequenzbänder berechnet. Die Wichtigkeitsfunktion des Freiburger Einsilbertest zur AI- oder SII-Berechnung wird im Folgenden in Oktav- und Terzbändern sowie in Form von 20 Bändern gleicher Wichtigkeit angegeben. Weitere Wichtigkeitsfunktionen können für beliebige andere Frequenzbandbreiten bei Bedarf mit der in Abschnitt 3.4.2.3 angegebenen Gleichung 21 nach derselben Methodik erstellt werden.

### 3.4.2.1 Wichtigkeitsfunktion für Terzbänder

Zunächst wird eine Wichtigkeitsfunktion für Terzbänder ermittelt. Die Werte der Wichtigkeiten der einzelnen Terzbänder für verschiedene Kombinationen aus Filter- und SNR-Bedingungen (siehe Tabelle 12) werden für jedes Terzband arithmetisch gemittelt (7) und als nicht-kumulative Wichtigkeitsfunktion  $I(f_{mi})$  gegen die Mittenfrequenz der Terzbänder  $f_{mi}$  aufgetragen (Abbildung 17). Tabelle 13 zeigt die daraus resultierenden Wichtigkeiten der Terzbänder für das AI- und SII-Verfahren.

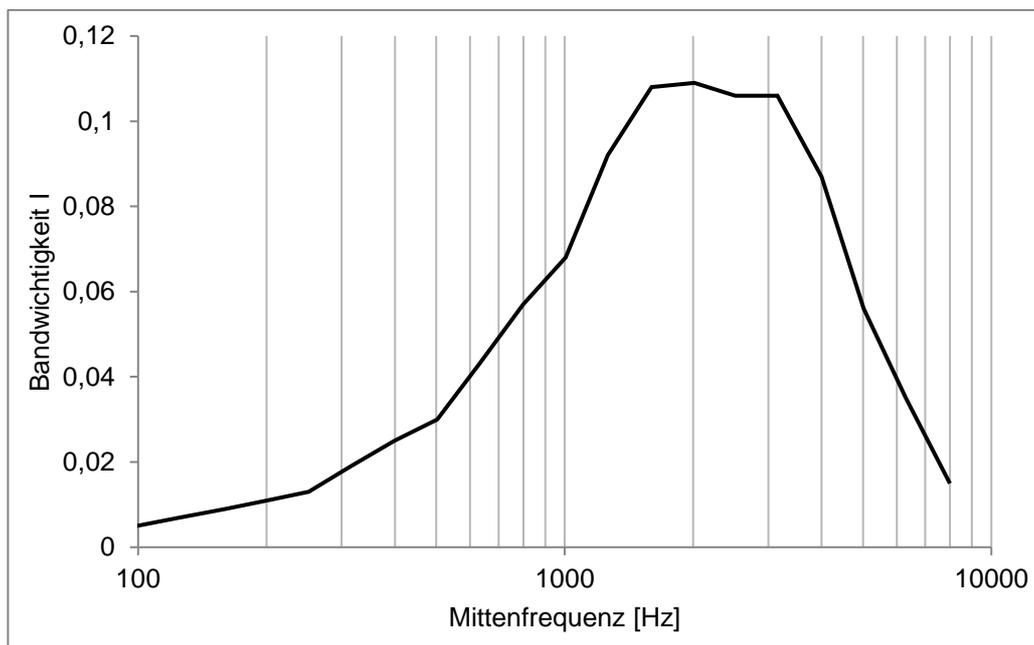


Abb.17: Wichtigkeitsfunktion  $I(f_{mi})$  für den Freiburger Einsilbertest, gemittelt über verschiedene Hörbedingungen, aufgetragen nach Mittenfrequenz  $f_{mi}$  [Hz] der  $i$  Terzbänder.

Mittenfrequenz $f_{m_i}$ [Hz]	Bandwichtigkeit $I(f_{m_i})$	Kumulierte Bandwichtigkeit $I(f_{m_i})$
100	<b>0,005</b>	0,005
125	<b>0,007</b>	0,012
160	<b>0,009</b>	0,021
200	<b>0,011</b>	0,032
250	<b>0,013</b>	0,045
315	<b>0,019</b>	0,064
400	<b>0,025</b>	0,088
500	<b>0,030</b>	0,118
630	<b>0,043</b>	0,161
800	<b>0,057</b>	0,217
1000	<b>0,068</b>	0,285
1250	<b>0,092</b>	0,378
1600	<b>0,108</b>	0,486
2000	<b>0,109</b>	0,595
2500	<b>0,106</b>	0,701
3150	<b>0,106</b>	0,807
4000	<b>0,087</b>	0,894
5000	<b>0,056</b>	0,951
6300	<b>0,035</b>	0,985
8000	<b>0,015</b>	1

Tab. 13: Wichtigkeiten  $I(f_{m_i})$  der  $i$  Terzbänder nach Mittenfrequenz  $f_{m_i}$  [Hz] und deren kumulierte Werte über alle Terzbänder. Bei der Berechnung der Bandwichtigkeiten wurden intern mehr Nachkommastellen berücksichtigt, die aus Gründen der Übersichtlichkeit in den Tabellen 12 und 13 nicht aufgeführt werden.

Die Werte der kumulierten Bandwichtigkeit für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests aus Tabelle 13 geben den Verlauf der kumulativen Wichtigkeitsfunktion (Band-Importance-Function) an. Diese lässt sich nahezu perfekt durch eine sigmoide Funktion mit 5 Parametern darstellen. Sie wird in Abhängigkeit der oberen Grenzfrequenzen  $f_{io}$  ermittelt:

$$I(f_{io}) = I_0 + \frac{a}{\left(1 + e^{\frac{-(f_{io} - f_0)}{b}}\right)^c} \quad (18)$$

Tabelle 14 gibt die an die Messwerte angepassten Funktionsparameter für Gleichung 18 an.

a	1,1938
b	1449,5709
c	35,9094
f <sub>0</sub>	-4183,8504
l <sub>0</sub>	-0,1927
r	1

Tab. 14: Funktionsparameter für Gleichung 18.

Somit ergibt sich für den frequenzabhängigen Verlauf der kumulativen Bandwichtigkeit in Abhängigkeit von  $f_{i0}$  mit Gleichung 18:

$$I(f_{i0}) = -0,1927 + \frac{1,1938}{\left(1 + e^{\frac{-(f_{i0} + 4183,8504)}{1449,5709}}\right)^{35,9094}} \quad (19)$$

Die Funktion der Gleichung 19 ordnet einem Frequenzband mit der fixen Untergrenze 88 Hz, der eine Wichtigkeit von 0 zugeordnet wird, und der Obergrenze  $f_{i0}$  eine Bandwichtigkeit zu. Abbildung 18 zeigt den kumulativen Verlauf der Bandwichtigkeit  $I$  in Abhängigkeit von  $f$ . Damit können für jedes beliebige Frequenzband zwischen  $f_{iu}$  und  $f_{i0}$  innerhalb der Gesamtbandbreite von 88 – 9000 Hz die bandspezifische Wichtigkeit als Differenz von  $I(f_{i0})$  und  $I(f_{iu})$  berechnet werden.

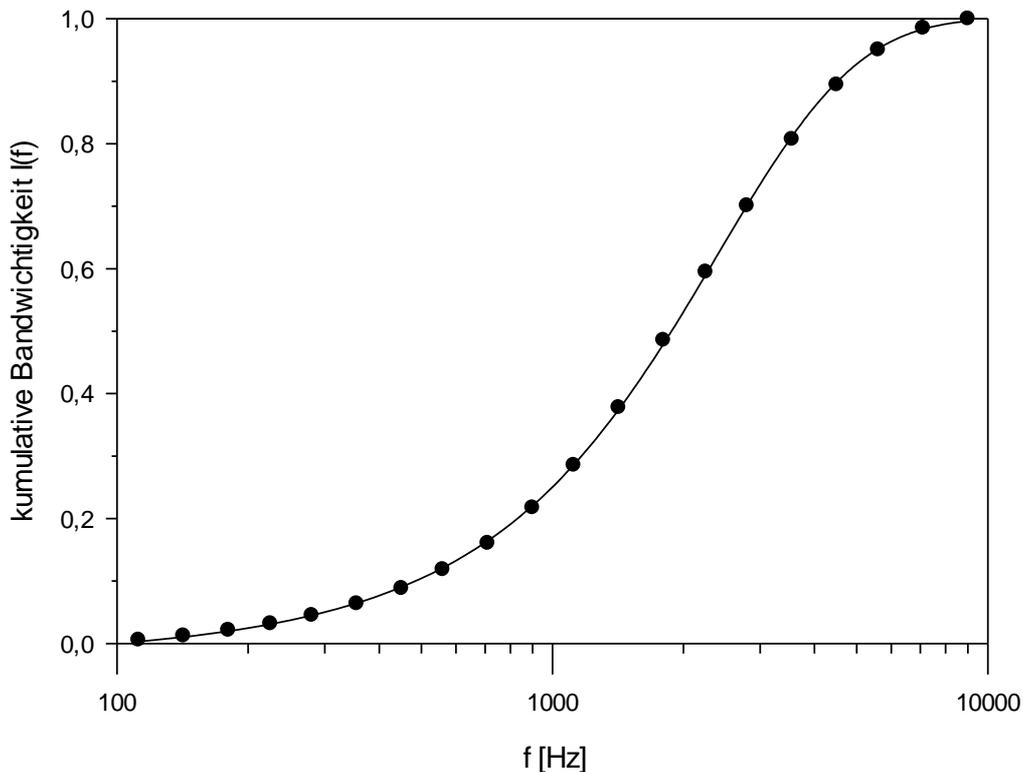


Abb. 18: Kumulative Bandwichtigkeitsfunktion  $I(f)$  nach Gleichung 19 für den Freiburger Einsilbertest. Angezeigt sind die Bandwichtigkeiten an den oberen Bandgrenzfrequenzen  $f_{i0}$ , die Untergrenze des ersten Bandes ist 88Hz.

### 3.4.2.2 Bänder gleicher Wichtigkeit

Das AI- bzw. SII-Verfahren enthält auch eine besondere Variante der AI- bzw. SII-Berechnung, bei der 20 Bänder gleicher Wichtigkeit zugrunde gelegt werden. Diese weisen variable Bandbreiten auf, die in jedem Frequenzband zu einem AI von je 0,05 führen. Die Frequenzgrenzen dieser Bänder gleicher Wichtigkeit können für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests mit der Umkehrfunktion der Gleichung 18 ermittelt werden:

$$f_g(I) = f_0 - b * \ln\left(\left(\frac{a}{I-I_0}\right)^{\frac{1}{c}} - 1\right) \quad (20)$$

Mit Gleichung 20 können die unteren und oberen Grenzfrequenzen  $f_u$  und  $f_o$  für alle Werte der Wichtigkeit zwischen 0 und 1 mit den Funktionsparametern aus Tabelle 14 berechnet werden. Zunächst wird für das niedrigste Terzband ( $i = 1$ ) die untere Grenzfrequenz  $f_{1u}$  auf 88 Hz festgelegt und mit Gleichung 20 die obere Grenzfrequenz

$f_{1o}$  berechnet, bei der die eine Wichtigkeit von  $I = 0,05$  erreicht wird. Die obere Grenzfrequenz des vorhergehenden Frequenzbandes  $f_{1o}$  stellt gleichzeitig die untere Grenzfrequenz  $f_{2u}$  für das nächsthöhere Frequenzband mit derselben Wichtigkeit von 0,05 dar. Mit diesem Schema werden nun die Grenzfrequenzen aller weiteren Frequenzbänder ermittelt, die jeweils eine Steigerung der Wichtigkeit um 0,05 beinhalten.

Tabelle 15 zeigt die Grenzfrequenzen der Bänder gleicher Wichtigkeit und Abbildung 19 stellt sie anschaulich dar.

Nummer i	Untergrenze $f_{iu}$ [Hz]	Obergrenze $f_{io}$ [Hz]	Bandbreite [Hz]	Bandwichtig- keit I
1	88	300	212	0,05
2	300	485	185	0,05
3	485	661	176	0,05
4	661	831	170	0,05
5	831	999	168	0,05
6	999	1166	168	0,05
7	1166	1336	170	0,05
8	1336	1510	174	0,05
9	1510	1689	180	0,05
10	1689	1878	188	0,05
11	1878	2078	200	0,05
12	2078	2293	215	0,05
13	2293	2529	236	0,05
14	2529	2792	263	0,05
15	2792	3094	302	0,05
16	3094	3454	359	0,05
17	3454	3904	450	0,05
18	3904	4520	617	0,05
19	4520	5542	1022	0,05
20	5542	11138	5596	0,05

Tab. 15: Untere und obere Grenzfrequenzen sowie Bandbreiten [Hz] der 20 Bänder gleicher Wichtigkeit in Höhe von 0,05 für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests

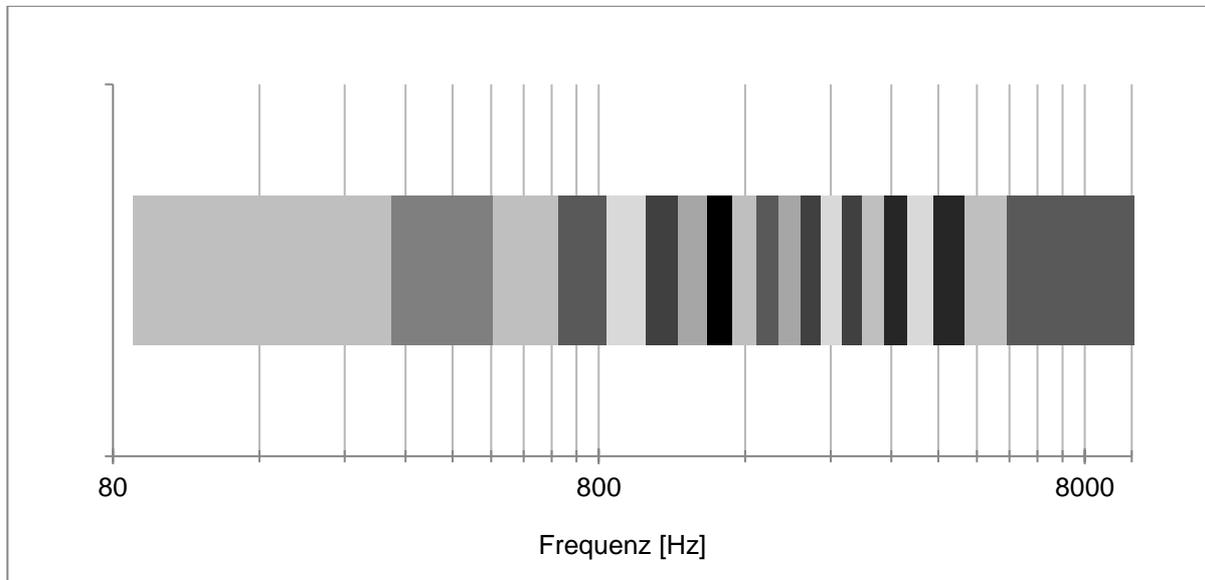


Abb. 19: Bandbreiten der Bänder gleicher Wichtigkeit von 0,05. Je schmaler die Frequenzbänder sind, desto größer ist in den dort gelegenen Frequenzen die absolute Wichtigkeit.

### 3.4.2.3 Wichtigkeitsfunktion für Bänder mit beliebigen unteren und oberen Grenzfrequenzen $f_{iu}$ und $f_{io}$

Um die Wichtigkeit eines Bandes  $i$  mit flexibler Unter- und Obergrenze  $f_{iu}$  und  $f_{io}$  für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests bestimmen zu können, benötigt man nun noch die Wichtigkeitsfunktion  $I(f)$ . Die Wichtigkeit eines Bandes wird quantifiziert durch die Differenz der Wichtigkeiten bei der oberen Grenzfrequenz  $f_{io}$  und der Wichtigkeit bei der unteren Grenzfrequenz  $f_{iu}$ . Somit ergibt sich die Wichtigkeit  $I(f_i)$  eines Frequenzbandes  $f_i$  zwischen  $f_{iu}$  und  $f_{io}$  zu:

$$I(f_i) = \left( I_0 + \frac{a}{\left(1 + e^{\left(-\frac{f_{io} - f_0}{b}\right)^c}\right)} \right) - \left( I_0 + \frac{a}{\left(1 + e^{\left(-\frac{f_{iu} - f_0}{b}\right)^c}\right)} \right) \quad (21)$$

Die Werte der Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $f_0$  und  $I_0$  finden sich in Tabelle 14.

Mit Gleichung 21 lassen sich mit den entsprechenden Grenzfrequenzen Wichtigkeitswerte für beliebige Frequenzbänder für das AI- und SII-Verfahren bestimmen, beispielsweise aufgeteilt nach Oktavbändern, Terzbändern oder nach kritischen Bändern.

### 3.4.2.4 Wichtigkeitswerte für Oktav- und Terzbänder

Tabelle 16 zeigt die mit Gleichung 21 berechnete Wichtigkeit I für Oktav- und Terzbänder nach den Normfrequenzen für akustische Messungen nach DIN EN ISO 266 (22). Abbildung 20 stellt die Werte der Wichtigkeit graphisch dar.

Mittenfrequenz [Hz]	Wichtigkeit I	
	I (Oktaven)	I (Terzen)
100		0,005
125	0,022	0,007
160		0,010
200		0,011
250	0,045	0,014
315		0,020
400		0,026
500	0,100	0,031
630		0,043
800		0,056
1000	0,204	0,066
1250		0,082
1600		0,111
2000	0,333	0,108
2500		0,113
3150		0,110
4000	0,251	0,087
5000		0,053
6300		0,031
8000	0,048	0,013

Tab. 16: Wichtigkeit von Oktav- und Terzbändern als bandspezifische Sprachinformationsanteile zur Verwendung im AI- und SII-Verfahren.

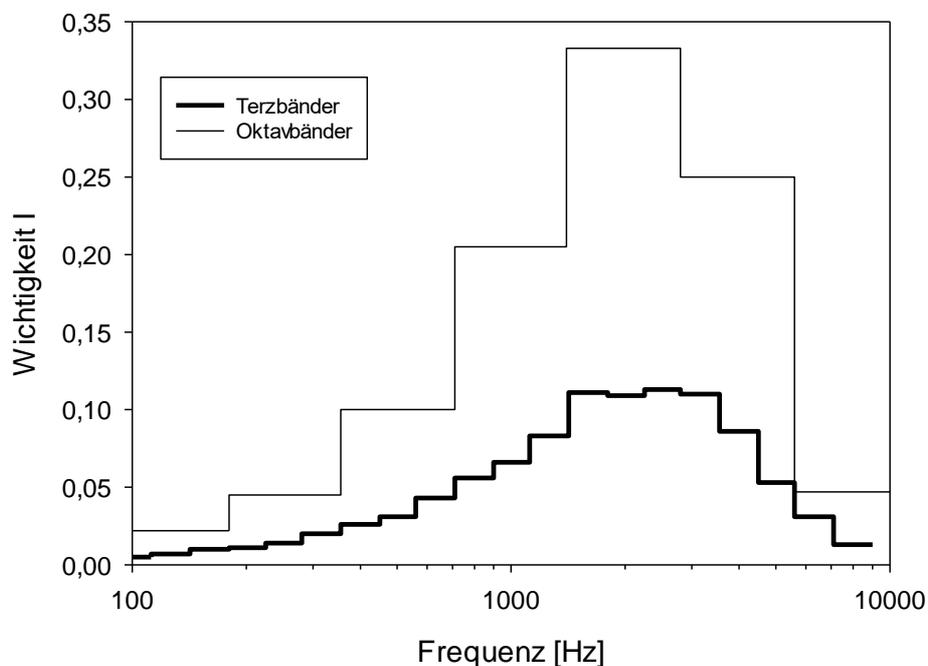


Abb. 20: Frequenzverteilung der Wichtigkeit (Sprachinformationsanteile) für Oktav- und Terzbänder.

### 3.5 Absolute Transferfunktion

Die relative TF basiert auf dem physikalischen SNR der Sprachverständlichkeitsmessungen, die absolute TF dagegen auf der tatsächlichen effektiven Maskierung der Sprachsignale in Relation zur Sprachdynamik. Dazu wird zu den verwendeten SNR ein Korrekturwert  $K$  ermittelt, der die Höhe des verwendeten Rauschpegels so an die Sprachdynamik anpasst, dass für ein effektives SNR von 0 dB nicht nur der mittlere Sprachpegel  $L_{eq}$ , sondern auch die Sprachpegelspitzen gerade vollständig maskiert werden. Bei vollständiger Maskierung ist keine Sprachinformation mehr erkennbar (Sprachverständlichkeit 0%) und folglich beträgt der AI dann auch 0. Geht man von einer typischen Sprachdynamik von 30 dB aus, wären die Information übertragenden Sprachelemente (Laute, Silben) mit den geringsten Pegeln dann bei einem effektiven SNR ab +30 dB potentiell vollständig hörbar und der AI erreicht den Wert von 1. Zur Unterscheidung von dem SNR, das sich auf die unmittelbare, bei der Messung eingestellte physikalische Pegeldifferenz von Sprach- und Störgeräuschpegel ohne Bezug zum Testergebnis bezieht, wird das korrigierte effektive SNR als Differenz der Sprachpegelspitzenwerte (Speech Peaks)

zum diese vollständig perzeptiv maskierenden Störgeräuschpegel (N) mit der Bezeichnung SP/N (effective-speech-peak-to-noise-ratio) angegeben.

$$SP/N = SNR + K \quad (22)$$

Zur Bestimmung von K sowie der absoluten Transferfunktion wird wie von Studebaker et al. beschrieben iterativ der K-Wert bestimmt, für den der mittlere Fehler der berechneten AI mit Gleichung 1 im Vergleich zu den Werten der AI aus den erhobenen Messwerten der SV und der aus dem gewählten K errechneten absoluten Transferfunktion am kleinsten wird (36):

Aus den Diskriminationsfunktionen in Kapitel 3.2 ergibt sich ein Schätzwert für K (nach dem SNR für 0% Verständlichkeit in der Breitbandbedingung) von -10 bis -15 dB. Es wurden daher zunächst mit einem Schätzwert von K = -14dB alle SNR in SP/N umgerechnet und mit SP/N statt SNR die Größe des AI in Abhängigkeit der akustischen Bedingungen nach Gleichung 1 berechnet. Mit den AI-Werten und den zugehörigen Sprachverständlichkeitsergebnissen wird eine vorläufige absolute TF für K = -14dB berechnet. Hierfür wird wie auch später für die endgültige absolute TF aus Gründen der Vergleichbarkeit das von Studebaker et al. vorgeschlagene Verfahren gewählt (8, 10, 16, 36, 37), das als Modellfunktion eine Variation der Fletcher und Galt Funktion (49) verwendet:

$$SV(AI) = (1 - 10^{(-\frac{AI}{Q})})^N \quad (23)$$

Mit der Umkehrfunktion dieser vorläufigen absoluten TF(K = 14) werden die absoluten AI-Werte aus den Sprachverständlichkeitsergebnissen berechnet:

$$AI(SV) = -Q \log(1 - SV^{\frac{1}{N}}) \quad (24)$$

Im nächsten Schritt wird der mittlere quadratische Fehler (RMS) aus den Differenzen zwischen den AI-Werten aus der direkten AI-Berechnung mit Gleichung 1 und aus der Berechnung mit der inversen vorläufigen absoluten Transferfunktion nach Gleichung 24 aus den Messwerten der SV für K = -14dB berechnet. Dann wird iterativ K variiert und es werden weitere vorläufige absolute Transferfunktionen für verschiedene K-

Werte ermittelt und die RMS-Werte bestimmt. Tabelle 17 zeigt die Funktionsparameter der vorläufigen absoluten Transferfunktionen sowie die RMS-Werte in Abhängigkeit von K. Die RMS-Werte in Abhängigkeit von K ergeben als Funktionsverlauf eine Parabel (Abbildung 21), deren Minimum kurvenanalytisch mit -14,7 dB bestimmt werden kann.

K	Q	N	R	RMS
-13,0	0,6595	2,5479	0,9229	0,0195015
-13,9	0,6456	2,8420	0,9244	0,0189903
-14,0	0,6442	2,8764	0,9245	0,0189596
-14,5	0,6375	3,0524	0,9248	0,0188602
-14,7	0,6350	3,1250	0,9248	0,0188583
-14,8	0,6337	3,1617	0,9247	0,0188561
-14,9	0,6326	3,1984	0,9247	0,0188753
-15,0	0,6314	3,2353	0,9246	0,0188867
-15,7	0,6228	3,5131	0,9237	0,0191098
-16,0	0,6194	3,6377	0,9230	0,0192730

Tab. 17: Funktionsparameter und RMS-Werte der vorläufigen absoluten Transferfunktionen.

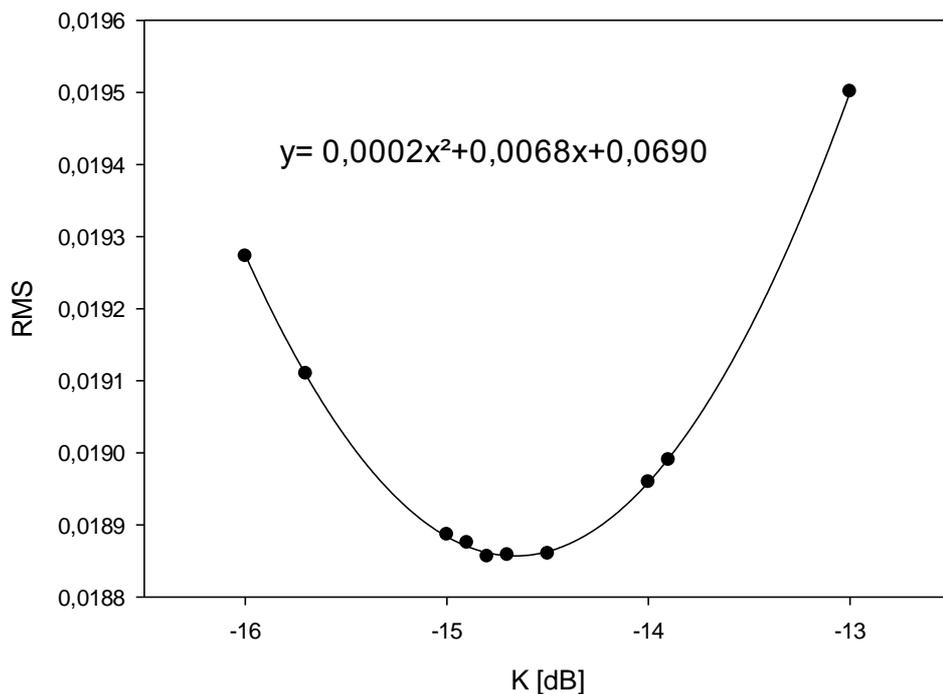


Abb. 21: RMS-Werte in Abhängigkeit von K [dB]. Die Fitfunktion als Polynom 2. Ordnung hat bei -14,7dB ihr Minimum.

Für den Freiburger Einsilbertest mit dem hier verwendeten sprechersimulierenden Rauschen ergibt sich ein Wert für K von -14,7 dB. Die absolute Transferfunktion für den Freiburger Einsilbertest ist diejenige unter den vorläufigen absoluten Transferfunktionen passend zu einem K-Wert von -14,7dB.

Die Funktionsparameter Q und N wurden mit dem Programm SigmaPlot 13.0 an die Messwerte der Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit des AI angepasst. Tabelle 18 zeigt die Funktionsparameter, Abbildung 22 den Verlauf der absoluten Transferfunktion und die gemessenen Werte der SV.

Q	0,6350
N	3,1250
r	0,9248

Tab. 18: Funktionsparameter der absoluten Transferfunktion.

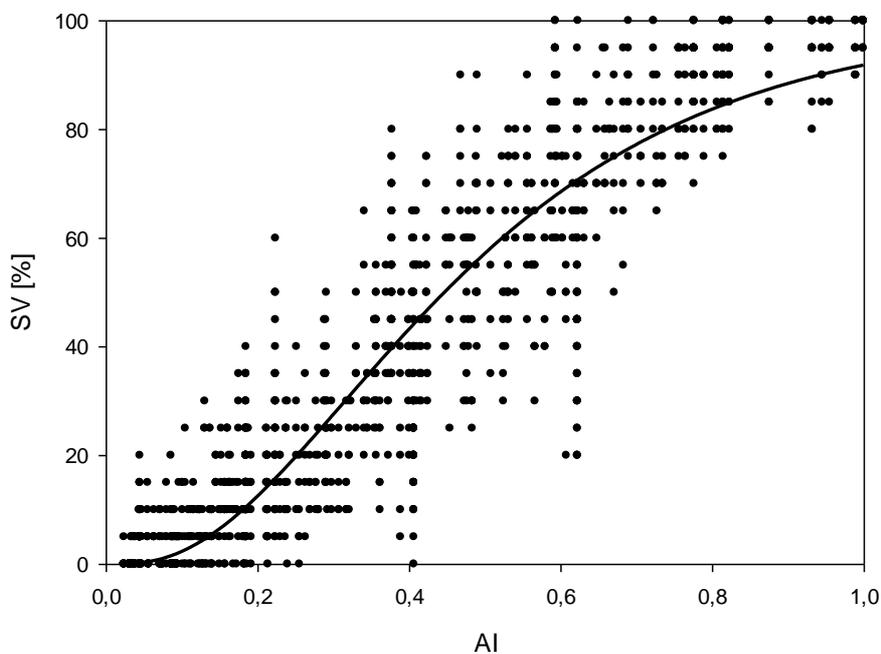


Abb. 22: Absolute Transferfunktion mit den gemessenen Werten der Sprachverständlichkeit für den Freiburger Einsilbertest.

Der Steigungsverlauf ergibt sich durch Differenzierung von Gleichung 23 nach AI:

$$\frac{dSV(AI)}{dAI} = \frac{N \cdot \ln(10) \cdot \left(1 - \frac{1}{10^{\frac{AI}{Q}}}\right)^{N-1}}{\frac{AI}{10^{\frac{AI}{Q}} \cdot Q}} \quad (25)$$

Mit den Funktionsparametern aus Tabelle 18 liegt die maximale Steigung in Höhe von 1,598 SV/AI (entspricht 5,33 %SV/0,03AI) am Wendepunkt bei AI = 0,314. Bei AI = 0,446 wird die SRT erreicht. Dort weist die absolute Transferfunktion eine Steigung von 1,405 SV/AI auf.

Die absolute Transferfunktion kann nun für die AI-abhängige Sprachverständlichkeitsvorhersage für deutschsprachige Einsilber im stationären Rauschen, insbesondere für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests, verwendet werden.

## 4. Diskussion

Die vorliegende Untersuchung hat sich zum Ziel gesetzt, die frequenzabhängige Sprachinformationsverteilung für den Freiburger Einsilbertest zu erstellen und eine Transferfunktion zur Schätzung der Sprachverständlichkeit aus Angaben zur Hörbarkeit von Sprachinformation, wie sie mit dem AI-Verfahren gewonnen werden können, zu berechnen.

### 4.1 Vergleich der Diskriminationsfunktionen

In dieser Studie wurden für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests Diskriminationsfunktionen für unterschiedliche Hörbarkeitsbedingungen gemessen. Einerseits wurde die Sprachverständlichkeit unter Verwendung eines optimal maskierenden, selbst hergestellten sprechersimulierenden stationären Rauschens durch Variation des SNR unterschiedlich stark maskiert. Andererseits wurde durch verschiedene Bandfilterungen frequenzspezifische Sprachinformation herausgefiltert. Aus den resultierenden Werten der Bandbreiten- und SNR-abhängigen Sprachverständlichkeit wurden mit verschiedenen Fittingmethoden für die jeweiligen Filterbandbreiten SNR-abhängige Diskriminationsfunktionen erstellt.

Für die Breitbandbedingung ohne Filterung (88 – 9000 HZ) wurde mit den normalhörenden Probanden eine maximale Sprachverständlichkeit von 100 % ermittelt. Aus den Tabellen 5 und 6 wird deutlich, dass bei Verringerung der Bandbreite die maximal erzielbare Sprachverständlichkeit im Vergleich zur Breitbandbedingung abnimmt. Durch herausgefilterte Frequenzbereiche fehlt dem Hörer die darin enthaltene frequenzspezifische Sprachinformation, was zu einer unvollständigen Sprachverständlichkeit auch bei sehr hohem SNR führt. Über die Höhe der Abnahme der Sprachverständlichkeit durch Fehlen bestimmter Frequenzbereiche lässt sich auf die Wichtigkeit der entsprechenden Sprachfrequenzbereiche für die Sprachverständlichkeit rückschließen. In dieser Arbeit wurde die Sprachverständlichkeit in 5 %-Schritten gemessen, die sich durch 20 Wörter pro Testliste ergeben. Bei sehr schmaler Bandbreite liegt die maximal erreichbare Sprachverständlichkeit unter 10 %, also unter zwei richtig erkannten Wörtern. Somit

werden bei den sehr schmalen Bandbreiten methodische Grenzen der Messgenauigkeit erreicht. Hier ist die Sprachverständlichkeit mit dieser Methode nur noch eingeschränkt messbar.

Die Lage der Wendepunkte der Diskriminationsfunktionen variiert je nach Filterbandbreite zwischen -3,8 dB SNR und 14,1 dB SNR bei den logistisch gefitteten Diskriminationsfunktionen sowie zwischen -4,7 dB SNR und 11,0 dB SNR bei den mit der Gompertz-Funktion erstellten Funktionen. Hierbei ist, wie im Ergebnisteil schon erwähnt, zu beachten, dass bei der logistischen Funktion der Wendepunkt bei einer SV von 50 % erreicht wird, bei der Gompertz-Funktion jedoch schon bei einer SV von etwa 36,7 %. Daher liegen die Wendepunkte der Gompertz-Funktionen bei gleicher Bandbreite bei kleineren SNR als die der logistischen Funktionen. Mit einer Verschmälerung der Bandbreite der Hochpassfilterung, die im Wesentlichen die Hörbarkeit von stimmlosen Konsonanten variiert, verschieben sich die Wendepunkte der Diskriminationsfunktionen bei beiden Fittingmethoden hin zu höheren SNR. Dies erklärt sich dadurch, dass durch zunehmende Verringerung der Bandbreite kontinuierlich Sprachinformation verloren geht und deshalb das Sprachmaterial schwieriger zu verstehen wird. Dieser Zusammenhang ist bei Tiefpassfilterung, die sich insbesondere auf die Hörbarkeit von stimmhaften Konsonanten und von Vokalen auswirkt, nicht so stringent festzustellen. Für die geringsten Bandbreiten 88-560Hz und 88-900Hz liegen die Wendepunkte bei viel kleineren SNR, die sonst nur von sehr breitbandiger Filterung mit sehr viel hörbarer Sprachinformation erreicht werden. Hier scheint das Fitting der äußerst flach verlaufenden Diskriminationsfunktionen mit einer maximalen Verständlichkeit von 6,6 bzw. 6,7 % und 29,4 bzw. 29,8 % keine plausiblen Ergebnisse mehr zu liefern. Welchen Einfluss hierbei die Art der Sprachlaute ausübt, kann Thema von weiteren Untersuchungen werden. Bisher sind dazu keine spezifischen Informationen in der Literatur zu finden.

Der Wendepunkt der Diskriminationsfunktion stellt bei logistischer Fittingmethode die SRT dar. Für den Freiburger Einsilbertest wurde in dieser Studie für die Breitbandbedingung eine SRT von -2,0 dB ermittelt. Bei der mit der Gompertz-Funktion gefitteten Diskriminationsfunktion für die Breitbandbedingung ergibt sich für die 50 %ige Verständlichkeit an der SRT ein fast identischer  $SNR_{50}$  von -2,5 dB SNR.

Für die Breitbandbedingung wurde für den Freiburger Einsilbertest mit der logistischen Diskriminationsfunktion eine maximale Steigung von 6,1 %/dB errechnet. Mit der Gompertz-Funktion ergab sich eine maximale Steigung von 6,4 %/dB. Die maximale Steigung der logistisch gefitteten Funktionen bei unterschiedlichen Filterbedingungen variiert zwischen 0,3 %/dB und 7,5 %/dB. Die Werte der maximalen Steigung der mit der Gompertz-Funktion erstellten Funktionen bewegen sich zwischen 0,3 %/dB und 7,4 %/dB. Für beide Funktionen verhält sich die maximale Steigung proportional zur Filterbandbreite und zur maximalen Sprachverständlichkeit. Sie lässt sich zusammen mit der Lage der SRT als Schwierigkeitsmaß der Sprachverständlichkeit deuten, indem bei einer hohen Steigung schon eine geringe Steigerung der Hörbarkeit von Sprachinformation durch eine geringe Vergrößerung des SNR zu einem relevanten Anstieg der Testergebnisse führt.

Die mit der logistischen Fittingmethode erzielten Bestimmtheitsmaße  $R^2$  reichen von 0,94 bei den breiten Filterbandbreiten bis zu 0,11 bei der sehr schmalen Bandbreite von 5600-9000 Hz. Mit der Gompertz-Funktion ergaben sich sehr ähnliche  $R^2$ -Werte von 0,95 bis 0,11. Je breiter das präsentierte Frequenzband ist, desto höhere  $R^2$ -Werte resultieren. Auch hier scheinen wieder die oben erwähnten methodischen Grenzen der Messgenauigkeit bei schmaler Filterbandbreite ins Gewicht zu fallen. Für die Breitbandbedingung konnte mit beiden Fittingmethoden ein sehr gutes Fitting mit einem  $R^2$ -Wert von 0,94 beziehungsweise 0,95 erzielt werden. Ein praxisrelevanter Unterschied in den Bestimmtheitsmaßen konnte zwischen beiden Fittingmethoden nicht festgestellt werden. Beide mathematischen Ansätze erscheinen deshalb in gleicher Weise zur Berechnung von Diskriminationsfunktionen anwendbar zu sein. Die Gompertz-Funktion wurde hier erstmals zur Berechnung von Diskriminationsfunktionen verwendet. Hieraus ergibt sich eine Frage für weitere Untersuchungen, ob sich aus den unterschiedlichen mathematischen Ansätzen unterschiedliche neuropsychologische Prozesse bei der Sprachverarbeitung von isoliert präsentierten Einzelworten im auditorischen System ableiten lassen.

Abbildung 3 zeigt die logistische, Abbildung 6 die mittels der Gompertz-Funktion erstellte SNR-abhängige Diskriminationsfunktion für die Breitbandbedingung. Diese werden im Folgenden mit Diskriminationsfunktionen anderer Sprachmaterialien verglichen.

Die maximale Steigung der Diskriminationsfunktion des Freiburger Einsilbertests zeigt sich mit maximal 6,1 %/dB (logistisch) beziehungsweise 6,4 %/dB (Gompertz) typisch für Einzelworttests, aber eher flach im Vergleich zu Satztests. Dies passt gut zu den Eigenschaften des Sprachmaterials als isoliert präsentierte Einsilber. Die Steigung der Diskriminationsfunktion im Störschall hängt unter anderem von der Schwierigkeit des Sprachmaterials ab (siehe Tabelle 19). Generell weisen hohe Steigungsmaße auf ein leicht zu identifizierendes bzw. vorherzusagendes Sprachmaterial hin, niedrige Steigungen auf einen hohen Schwierigkeitsgrad. Sprachmaterial mit mehr Kontext (Mehrsilber oder Sätze) führen zu größeren Steigungen der Diskriminationsfunktionen (9), da kognitive Prozesse und vermehrte Nutzung von Top-Down-Informationen zusätzlich zur Hörbarkeit zum Sprachverstehen beitragen können (siehe auch Kapitel 1.2). Dadurch kann die phonetische Mehrinformation durch eine Erhöhung des SNR und damit der Hörbarkeit von Sprachinformation um beispielsweise 1 dB besser genutzt werden und somit wird die Diskriminationsfunktion steiler. Folglich haben Sprachmaterialien mit wenig Kontext flachere Diskriminationsfunktionen als solche mit viel Kontext. In der Literatur finden sich beispielsweise für Sprachmaterialien mit viel Kontext Steigungen von 20 %/dB bzw. 10 %/dB für englische fließende Konversation (7, 37). Für englischen Fließtext in Form des Connected Speech Test wurde eine Steigung von 12 %/dB ermittelt (8). Es wurde eine Steigung von 19 %/dB für schwedische Sätze (50) errechnet. Der deutsche Göttinger Satztest erreicht bei Präsentation im Störgeräusch eine Steigung von 19,1 %/dB (51) und der ebenfalls deutsche Oldenburger Satztest 17,1 %/dB (52). Für den englischsprachigen Satztest SPIN wurde für die Sätze, in denen der Kontext viel Rückschluss auf das Zielwort ermöglichte, ein Wert von 8-10 %/dB (16) beziehungsweise 10 %/dB (37) und für die Sätze mit schlechterer kontextueller Einbettung derselben Zielwörter ein Wert von 5-6 %/dB gefunden (16).

Zweisilber, deren beiden Silben gleichermaßen betont werden (genannt Spondeus), erreichen eine Steigung von 11,8 %/dB (53). Mit zwei Silben haben sie mehr Laute und damit Kontext als Einsilber oder gar sinnlose Silben, aber weniger als ganze Sätze oder Fließtext, bei denen zusätzlich zum Kontext durch die Laute innerhalb eines Wortes noch der bedeutungstragende semantische Kontext zwischen den Wörtern bei einer sinnvollen Satzaussage ausgenutzt werden kann. Daraus resultiert die mittlere Steilheit der Diskriminationsfunktion.

Einsilber sind dagegen durch die geringe Anzahl von Sprachlauten ein Sprachmaterial mit wenig Kontext innerhalb der Testwörter und haben daher verhältnismäßig flache Diskriminationsfunktionen. Für englische Einsilber wurden Steigungen der Diskriminationsfunktion von 9,98 %/dB (36) und 5,8 %/dB für den CID-W22 (53), von 6,6 %/dB (10) und 5,5 %/dB (53) für den NU-6 und von 5,3 %/dB für die PB-50 Words ermittelt (53). In dieser Arbeit wird für die bedeutungsvollen deutschen Einsilber des Freiburger Einsilbertests (Substantive) ein Wert von 6,1 %/dB beziehungsweise 6,4 %/dB errechnet. Für sinnlose Silben, ein Sprachmaterial ohne nutzbaren Kontext, fanden French und Steinberg eine Steigung von 4 %/dB (3). Das hier für diese Arbeit selbst entwickelte sprechersimulierende Störgeräusch führt also zu ähnlichen Diskriminationsfunktionen der Sprachverständlichkeit von Einsilbern im Störgeräusch, wie bei Einsilbern der englischen Sprache. Damit kann ein sinnvoller Vergleich der pegel- und frequenzabhängigen Sprachinformationsverteilung zwischen den Freiburger Einsilbern und Einsilbern der englischen Sprache durchgeführt werden.

Außer der Studie von French und Steinberg aus dem Jahr 1947 haben alle oben genannten Untersuchungen die Gemeinsamkeit, dass sie im stationären Störschall durchgeführt wurden und das Spektrum des Störgeräuschs näherungsweise dem des Sprachsignals entspricht. Dies ist entscheidend, da ein sprechersimulierendes Rauschen die Sprachverständlichkeit mehr beeinflusst und dadurch die Diskriminationsfunktion steiler verläuft als bei einem nicht dem mittleren Sprachspektrum entsprechenden Störgeräusch (54). Auch dies spricht dafür, dass die Parameter der Diskriminationsfunktionen in Tabelle 19 sinnvoll miteinander verglichen werden können.

Das SNR, bei dem 50% der Sprache korrekt erkannt werden kann, ist definiert als die Sprachverständlichkeitsschwelle (SRT, Speech Reception Threshold) (1, S.161). Nicht nur die Steigungen der Diskriminationsfunktionen, sondern auch die Lage der SRTs von unterschiedlichen Sprachmaterialien gibt, bei gleicher Kalibrierung ( $L_{eq}$  oder Spitzenpegel), Auskunft über deren Schwierigkeit in Bezug auf die Sprachverständlichkeit. Je höher die SRT, desto schwerer verständlich ist das Sprachmaterial, da für eine Verständlichkeit von 50 % mehr Hörbarkeit benötigt wird. Die Art der Kalibrierung ist deshalb wichtig, weil sich das tatsächliche physikalische SNR durch diese erheblich von seinem numerischen Wert unterscheiden kann. Hier spielt der Pegelunterschied zwischen dem  $L_{eq}$ , auf Basis dessen die Kalibrierung

heutzutage meist erfolgt, und dem Spitzenpegel von Sprachsignalen, mit dem bis zur Einführung digitaler Schallpegelmessers in den Normenwerken zur Sprachaudiometrie die Kalibrierung durchgeführt wurde, eine entscheidende Rolle. Bei den Freiburger Einsilbern liegen die Spitzenpegel (1%-Perzentile) rund 7 dB höher als der  $L_{eq}$  (55). Beim stationären sprechersimulierenden Rauschen beträgt dieser Unterschied nur etwa 1 dB (siehe auch Abbildung 1 und 2). Dasselbe SNR von 0 dB bedeutet bei gleichen  $L_{eq}$  einen Unterschied von +6 dB zwischen den Spitzenpegeln, bei gleichen Spitzenpegeln einen Unterschied von -6 dB der  $L_{eq}$ . In diesem Sinne könnten SRT-Unterschiede zwischen Spitzenpegel-kalibrierten Tests wie dem originalen Freiburger Einsilbertest (56) und  $L_{eq}$ -kalibrierten wie dem Oldenburger und Göttinger Satztest von etwa 5 dB allein auf die Kalibrierunterschiede zurückzuführen sein.

In dieser Arbeit ergibt sich für normalhörende Probanden für den Freiburger Einsilbertest im stationären sprechersimulierenden Rauschen eine  $L_{eq}$ -basierte SRT von -2,0 dB SNR (logistische Fitfunktion) beziehungsweise -2,5 dB SNR (Gompertz-Funktion). Für Sprachmaterialien mit viel Kontext werden niedrigere SRT angegeben. So wurden für ebenfalls  $L_{eq}$ -kalibrierte Satztests wie den Göttinger Satztest -6,23 dB SNR (51) sowie für den Oldenburger Satztest -7,1 dB SNR (52) ermittelt. Für den englischen Connected Speech Test (CST) ergab sich bei  $L_{eq}$ -Kalibrierung eine SRT von -5,5 dB SNR (8) und für anderen englischen Fließtext  $L_{eq}$ -kalibriert ein Wert von -9 dB SNR (37). Für schwedische Sätze wurde – allerdings nicht  $L_{eq}$ -kalibriert und daher nicht gut mit den anderen Untersuchungen vergleichbar - eine SRT von -8,15 dB SNR (50) ermittelt. Für englische Sätze ergaben sich jeweils bei  $L_{eq}$ -Kalibrierung Werte von -9 dB SNR (37) und -5,5 dB SNR (16). Bei nur schwacher inhaltlicher Einbettung steigt die  $L_{eq}$ -basierte SRT für englische Sätze auf 0 dB SNR (16). Für englische spondeische Wörter mit mittlerer Menge an Kontext, wurde eine  $L_{eq}$ -basierte SRT von -5,7 dB SNR ermittelt (53). Die im Vergleich zur hiesigen Studie niedrigeren SRT bei Sprachmaterial mit mehr Kontext lassen sich dadurch erklären, dass Sprachmaterial mit mehr Kontext generell leichter zu verstehen ist. Jedoch finden sich in der Literatur auch höhere Werte der SRT von beispielsweise +6,7 dB SNR bei  $L_{eq}$ -Kalibrierung für fließende Konversation (7), die ja ein Sprachmaterial mit viel Kontext darstellt und somit leicht verstehbar sein sollte. Dieses Ergebnis lässt sich mit der Überlegung von leichtem oder schwerem Sprachmaterial in Bezug auf viel oder wenig Kontext beziehungsweise mit der Art der Kalibrierung nicht erklären. Die Lage der SRT und

somit die „Schwierigkeit“ eines Sprachmaterials scheint hier noch von anderen Faktoren abzuhängen.

Für Sprachmaterialien mit wenig Kontext, englische Einsilber, gut vergleichbar mit dem Freiburger Einsilbertest wurden bei  $L_{eq}$ -Kalibrierung Werte der SRT von -6,5 dB SNR (10) sowie -6,0 dB SNR (36) ermittelt. In weiteren Messungen englischer Einsilbertests ergaben sich bei  $L_{eq}$ -Kalibrierung SRTs von 0,5 dB SNR (53) sowie 0,9 dB SNR (53). Für englische Ziffern wurde bei  $L_{eq}$ -Kalibrierung eine SRT von -1,2 dB SNR (53) errechnet. Die für den  $L_{eq}$ -kalibrierten Freiburger Einsilbertest ermittelte SRT von -2,0 dB SNR beziehungsweise -2,5 dB SNR ist diesen Werten recht ähnlich.

Kontext	Sprachmaterial	Eigenname Test	Maximale Steigung [%/dB]	SRT [dB SNR]	Autor, Jahr
viel	Fließende Konversation, englisch		20	6,7	Studebaker, 1987 (7)
viel	Deutsche Sätze	Göttinger Satztest	19,2	-6,23	Kollmeier, 1997 (51)
viel	Schwedische Sätze		19,1	-8,15 *	Hagerman, 1982 (50)
viel	Deutsche Sätze	Oldenburger Satztest	17,1	-7,1	Wagener, 1999 (52)
viel	Englischer Fließtext	CST	12	-5,5	Sherbecoe, 2002 (8)
viel	Englischer Fließtext		10	-9	DePaolis, 1996 (37)
viel	Englische Sätze	SPIN	8,6	-9	DePaolis, 1996 (37)
viel	Englische Sätze, starke kontextuelle Einbindung	SPIN PH	8-10	-5,5	Bell, 1992 (16)
mittel	Englische Sätze, schwache kontextuelle Einbindung	SPIN PL	5-6	0	Bell, 1992 (16)
mittel	Englische spondeische Wörter	CID-W1	11,8	-5,7	Wilson, 2008 (53)
wenig	Englische Einsilber	W-22	9,98	-6	Studebaker, 1991 (36)
wenig	Englische Einsilber	NU-6	6,6	-6,5	Studebaker, 1993 (10)
<b>wenig</b>	<b>Deutsche Einsilber</b>	<b>Freiburger Einsilbertest</b>	<b>6,1 / 6,4</b>	<b>-2,0 / -2,5</b>	<b>Aktuelle Studie</b>
wenig	Englische Einsilber	W-22	5,8	0,5	Wilson, 2008 (53)
wenig	Englische Ziffern		5,6	-1,2	Wilson, 2008 (53)
wenig	Englische Einsilber	NU-6	5,5	0,5	Wilson, 2008 (53)
wenig	Englische Einsilber	PB-50	5,3	0,9	Wilson, 2008 (53)

Tab. 19: Maximale Steigung [%/dB] und SRT [dB SNR] der Diskriminationsfunktionen verschiedener Sprachmaterialien im Störgeräusch. Die Werte aus der Literatur wurden entweder direkten Angaben entnommen oder aus graphisch vorliegenden Funktionsverläufen geschätzt. Die mit einem \* markierte SRT wurde nicht  $L_{eq}$ -kalibriert bestimmt, sie ist daher nicht gut mit denen der anderen  $L_{eq}$ -kalibriert durchgeführten Studien vergleichbar. Für den Freiburger Einsilbertest sind die Funktionsparameter sowohl der logistischen (linker Wert) als auch der Gompertz-Fitfunktion angegeben.

## 4.2 Vergleich der Frequenz-Wichtigkeitsfunktionen

In dieser Studie wurden für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests zunächst für verschiedene SNR-Bedingungen Wichtigkeitsfunktionen (Band-Importance-Functions) ermittelt (Abbildung 16). Diese verlaufen trotz verschiedener SNR-Bedingung recht ähnlich. Abbildung 23 vergleicht den Verlauf der Wichtigkeitsfunktion für vier SNR-Gruppen jeweils gemittelt aus den Hoch- und Tiefpasswerten von jeweils drei SNRs. Das Maximum der Bandwichtigkeit liegt bei der Gruppe der niedrigsten SNRs sowie bei der der höchsten SNRs bei etwa 1500-2000 Hz, bei der zweitniedrigsten SNR-Gruppe etwas höher bei etwa 3000 Hz und bei der zweithöchsten SNR-Gruppe verläuft es flacher über einen Bereich von etwa 1500-3000 Hz. Insgesamt zeigt sich aber ein nur sehr geringer Unterschied im Verlauf der Wichtigkeitsfunktion bei Veränderung des SNR und damit der Hörbarkeit und Schwierigkeit.

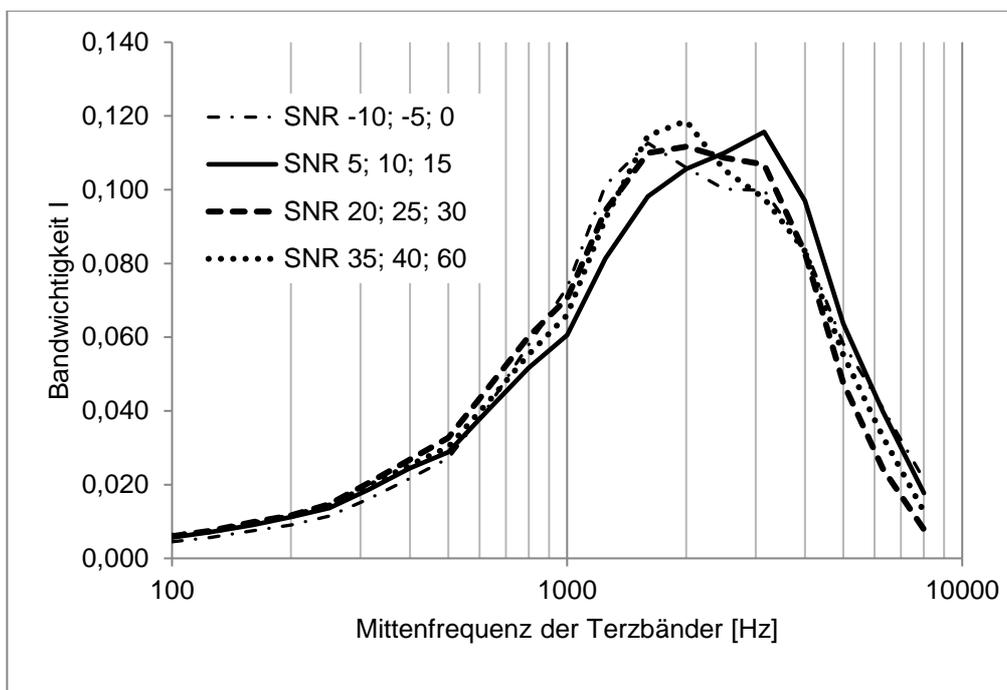


Abb. 23: Wichtigkeitsfunktionen für vier SNR-Gruppen, gemittelt jeweils aus den Hochpass- und Tiefpasswerten für drei SNR-Bedingungen.

In dieser Studie wurde für den Freiburger Einsilbertest anschließend eine Gesamt-Wichtigkeitsfunktion erstellt, die die AI bzw. SII Berechnung passend für verschiedene SNR-Bedingungen ermöglicht (Abbildung 17). Sie wurde durch arithmetisches Mitteln

der Werte für die oben genannten SNR-Bedingungen jeweils aus Hochpass- und Tiefpassmessung erstellt. Somit gingen Wichtigkeitswerte gemessen bei -10 dB bis 40 dB, was unter Breitbandbedingung SV-Werte von 0 bis 100 % ergab, sowie ein zusätzlicher Wert gemessen bei 60 dB, was bei der gegebenen Sprachdynamik einem beinahe nicht mehr vorhandenen Störgeräusch entspricht, in die Berechnung mit ein. Durch den sehr ähnlichen Verlauf der Wichtigkeitsfunktionen bei unterschiedlicher SNR-Bedingung kommt der Auswahl der in die Berechnung der Gesamt-Wichtigkeitsfunktion eingehenden SNR-Bedingungen jedoch eine nur nachrangige Bedeutung zu. Die Gesamt-Wichtigkeitsfunktion zeigt sich eingipfelig. Die für die Sprachverständlichkeit aufgrund ihres hohen Informationsgehaltes wichtigsten Frequenzbänder befinden sich im Bereich zwischen etwa 1500 und 4000 Hz. Zu beiden Seiten dieses Maximums fällt die Bandwichtigkeit ab. Die Frequenz oberhalb und unterhalb derer sich gleich viel Sprachinformation befindet, die sogenannte Crossover Frequenz, befindet sich bei 1451 Hz.

Sprachmaterialien mit mehr Kontext und mehr phonetischer Information weisen oftmals niedrigere Crossover Frequenzen auf als solche mit wenig phonetischer Information (7, 57). Tabelle 20 zeigt einige Werte der Crossover Frequenzen. Für Sprachmaterialien mit mehr Kontext wurden teils niedrige Crossover Frequenzen von zum Beispiel 1189 Hz für fließende Konversation (7) oder 725 Hz für synthetische Sätze (58) gefunden. Jedoch zeigte sich für englischen Fließtext, ebenfalls ein Sprachmaterial mit viel Kontext, eine höhere Crossover Frequenz von 1619 Hz (8). Bei englischen Sätzen, bei denen dasselbe Zielwort einmal stark, einmal dagegen nur schwach kontextuell eingebettet präsentiert wird, zeigte sich eine um etwa 180 Hz niedrigere Crossover Frequenz bei mehr Kontext (16). Für sinnlose Silben, also ohne Kontext, fanden French und Steinberg eine Crossover Frequenz von 1930 Hz. Für Einsilber konnte ein Wert von 1675 Hz (57), 1450 Hz (35) sowie 1454 Hz für den englischen Einsilbertest NU6 (10) gefunden werden. Für den englischen Worttest CID W-22 wurde eine Crossover Frequenz von 1314 Hz ermittelt (36). Die in dieser Studie ermittelte Crossover Frequenz von 1451 Hz für die deutschen Einsilber des Freiburger Einsilbertests, zeigt sich recht ähnlich den bisher für englische Einsilber ermittelten Werten.

Es ist allerdings weiterhin zu beachten, dass sowohl die Wichtigkeitsverteilungen als auch die Wichtigkeitsfunktionen zusätzlich zum Kontext auch von den akustischen Eigenschaften der Sprecherstimme abhängen, die hier nicht weiter untersucht wurden.

Einige der in Tabelle 20 aufgeführten Studien wurden nicht mit sprechersimulierendem Rauschen oder in Ruhe durchgeführt. Der Einfluss dieses Faktors auf die Wichtigkeitsfunktion ist jedoch im Vergleich zum Einfluss auf die Diskriminationsfunktion geringer. Daher ist ein Vergleich der Crossover Frequenzen und generell der Wichtigkeitsfunktionen dennoch sinnvoll möglich.

Kontext	Sprachmaterial	Crossover Frequenz [Hz]	Autor, Jahr
viel	Synthetische Sätze	725	Speaks, 1967 (58)
viel	Englische fließende Konversation	1189	Studebaker, 1987 (7)
viel	SPIN-PH (englische Sätze, starke kontextuelle Einbettung des Zielworts)	1350	Bell, 1992 (16)
viel	CST (englischer Fließtext)	1619	Sherbecoe, 2002 (8)
mittel	SPIN-PL (englische Sätze, schwache kontextuelle Einbettung des Zielworts)	1530	Bell, 1992 (16)
wenig	CID W-22 (englische Einsilber)	1314	Studebaker, 1991 (36)
wenig	PB-50 (englische Einsilber)	1450	Black, 1959 (35)
<b>wenig</b>	<b>Freiburger Einsilber</b>	<b>1451</b>	<b>Aktuelle Studie</b>
wenig	NU 6 (englische Einsilber)	1454	Studebaker, 1993 (10)
wenig	CID W-22 (englische Einsilber)	1675	Hirsh, 1954 (57)
kein	Sinnlose Silben	1930	French, 1947 (3)

Tab. 20: Die Crossover Frequenz [Hz] des Freiburger Einsilbertests im Vergleich mit Werten verschiedener Sprachmaterialien.

Abbildung 24 vergleicht die hier ermittelte Wichtigkeitsfunktion für den deutschsprachigen Freiburger Einsilbertest mit denen für englischsprachige Einsilber (NU6, CID W-22, PB-50). Die für den Freiburger Einsilbertest erstellte Wichtigkeitsfunktion stellt sich eingipfelig mit einem Maximum im Frequenzbereich von etwa 1500 - 4500 Hz dar. Es wird deutlich, dass sich auch bei den englischsprachigen Einsilbern das Maximum der Sprachinformation im mittleren Frequenzbereich bei etwa

2000 Hz befindet. Jedoch zeigen die Wichtigkeitsfunktionen der englischsprachigen Einsilber im Vergleich zum Freiburger Einsilbertest gering höhere Bandwichtigkeiten in den tieferen Frequenzen im Bereich von 250 Hz bis 500 Hz und geringere Werte im höheren Frequenzbereich ab 2000 Hz. Solche Unterschiede könnten sprecher- oder artikulationsbedingt sein. Im Gesamten zeigen sich die Wichtigkeitsfunktionen jedoch recht ähnlich.

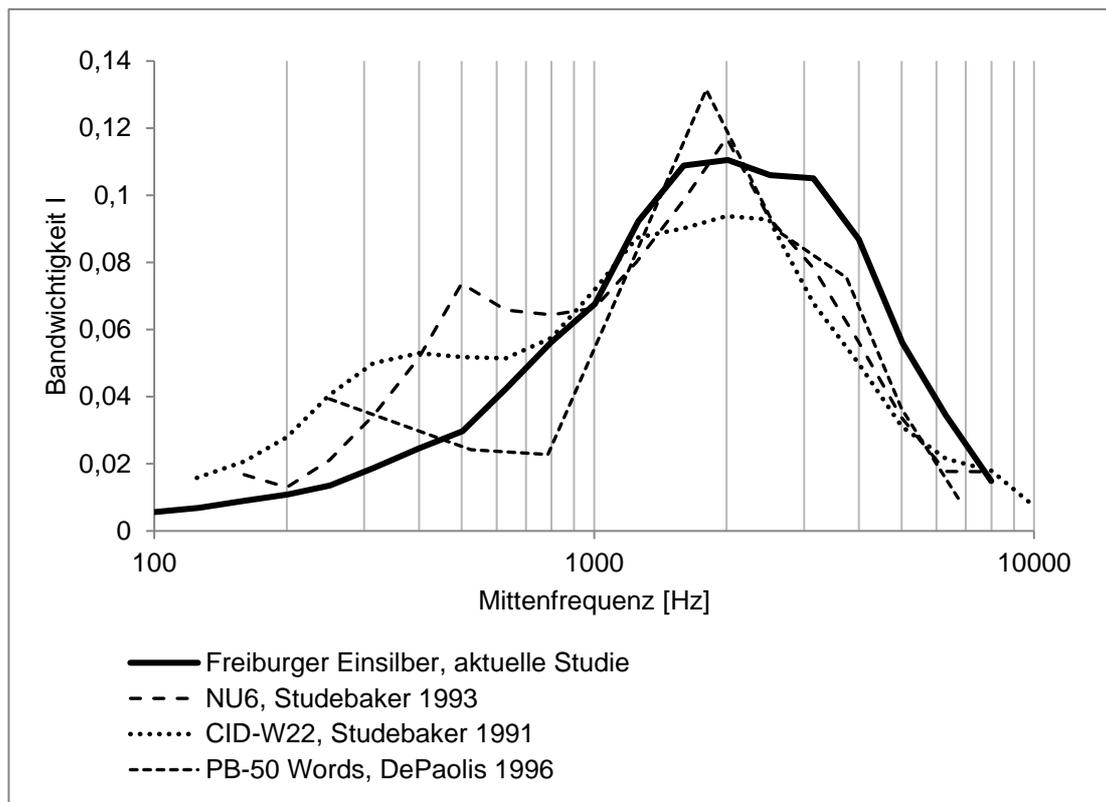


Abb. 24: Wichtigkeitsfunktionen verschiedener Einsilbertests im Vergleich

Vergleicht man die für den Freiburger Einsilbertest erstellte Wichtigkeitsfunktion mit der verschiedener anderer Sprachmaterialien (Abbildung 25), so fällt auf, dass sich der Verlauf der Funktionen teilweise deutlich unterscheidet. Für sinnlose Silben, ein Sprachmaterial ohne Kontext, ergibt sich eine Wichtigkeitsfunktion, die ebenfalls eingipflig mit einem Maximum um 2000 Hz verläuft (3). Sie verläuft insgesamt sehr ähnlich wie die des Freiburger Einsilbertests. Dagegen zeigt sich bei fließender Konversation (7) oder Fließtext (8), die Sprachmaterialien mit viel Kontext darstellen, ein weiterer deutlicher Anstieg der Bandwichtigkeit bei etwa 500 Hz. Die Menge des Kontexts beziehungsweise der insgesamt verfügbaren Sprachinformation scheint entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Wichtigkeitsfunktion zu haben. Das

bestätigt sich auch bei klinischen sprachaudiometrischen Messungen bei Patienten mit Hochtonhörverlusten. Hierbei reduziert sich die Verständlichkeit der Einsilber stärker als die von Sätzen, da bei Letzteren neben dem Kontexteffekt auch die Hörbarkeit des größeren Anteils an tieferfrequenter Sprachinformation die Worterkennung in Satztests gegenüber einzelpräsentierten Einsilbern verbessern könnte.

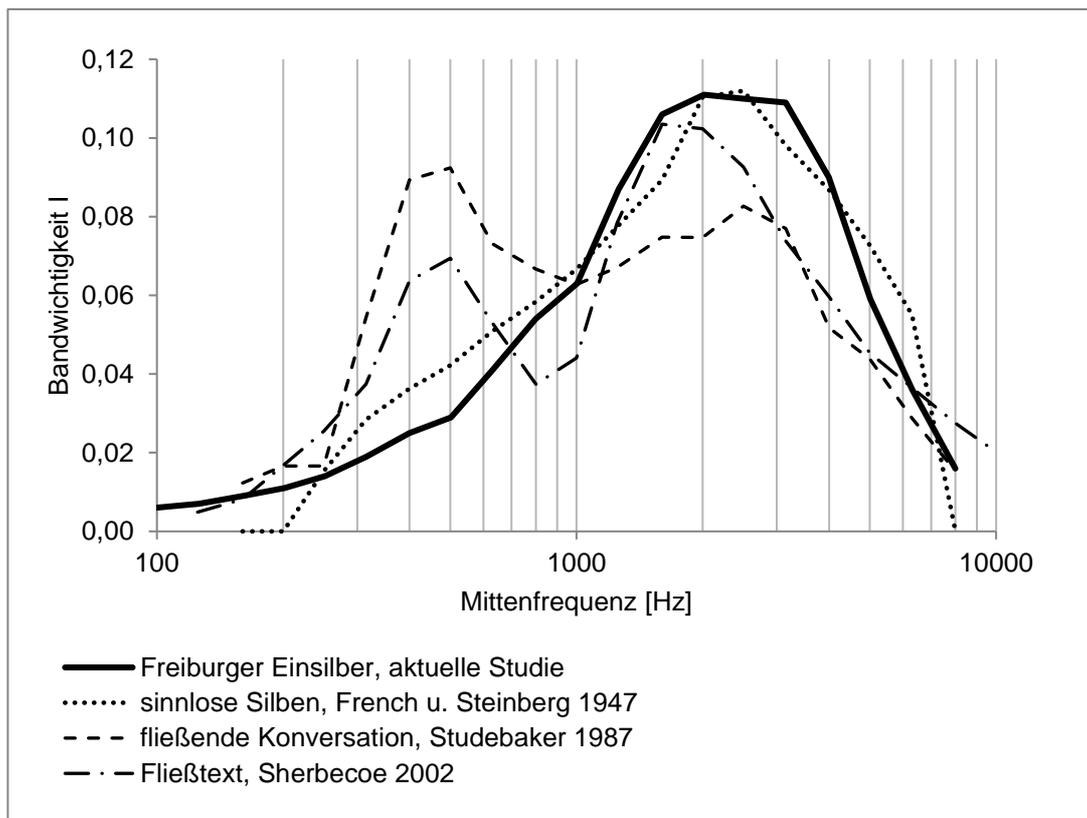


Abb. 25: Vergleich der Wichtigkeitsfunktionen verschiedener Sprachmaterialien mit der des Freiburger Einsilbertests: sinnlose Silben (3), fließende Konversation (7), Fließtext (8)

Für die Vorhersagegenauigkeit der Verständlichkeit ist die Auswahl einer passenden Bandwichtigkeitsfunktion aufgrund der deutlichen Unterschiede je nach gewähltem Sprachmaterial entscheidend.

#### 4.3 Vergleich der Transferfunktionen

In dieser Untersuchung wurde für den Freiburger Einsilbertest nach der Methode von French und Steinberg (3) zunächst eine relative Transferfunktion (Gleichung 13) und ähnlich der Methode von Studebaker (36) im Anschluss eine absolute Transferfunktion

(Gleichung 23 mit Werten aus Tabelle 18) erstellt. Die maximale Steigung der relativen Transferfunktion beträgt  $11,4 \%SV/0,0\bar{3}AI$  am Wendepunkt. Betrachtet man den Teil der Funktion von 20 % bis 80 % SV, so ergibt sich aus den Funktionswertepaaren für diesen Bereich durchschnittlich eine Steigung von  $8,5 \%SV/0,0\bar{3}AI$ . Die Steigung der absoluten Transferfunktion beträgt am Wendepunkt  $5,5 \%SV/0,0\bar{3}AI$  und gemittelt über den Bereich von 20-80 % SV  $3,8\%SV/0,0\bar{3}AI$ . In dieser gemittelten Form lässt sich die Steigung gut mit Transferfunktionen für andere Sprachmaterialien vergleichen. Alle im Folgenden angegebenen Steigungen von Transferfunktionen aus anderen Studien beziehen sich auf den annähernd linearen Bereich von 20-80 % SV und wurden aus publizierten Daten entnommen, errechnet oder geschätzt. Sie werden zu Vergleichszwecken jeweils in  $\%SV/0,0\bar{3}AI$  umgerechnet und angegeben. Bei den unten aufgeführten Studien wurde ab 1991 die Unterscheidung zwischen relativer und absoluter Transferfunktion getroffen. Bei früheren Studien war dies noch nicht der Fall. Sinngemäß entsprechen die vor 1991 angegebenen Transferfunktionen eher einer relativen Transferfunktion. Deshalb werden die entsprechenden Werte in Tabelle 21 für Vergleichszwecke in der Spalte der relativen Transferfunktion aufgeführt. Sofern eine absolute Transferfunktion vorhanden ist, wird diese jeweils zum Vergleich verwendet, da sie für die Vorhersage der Sprachverständlichkeit besser geeignet ist.

In der Vergangenheit wurde festgestellt, dass Sprachmaterialien mit mehr Kontext, innerhalb eines Wortes durch mehr phonetische Information in Form mehrerer Silben und bei Sätzen zwischen den Wörtern, oftmals steilere Transferfunktionen aufweisen als solche mit weniger Kontext oder generell weniger Sprachinformation (37). So wurde für fließende Konversation für den annähernd linearen Teil der Transferfunktion von 20 bis 80 % SV eine durchschnittliche Steigung von etwa  $18 \%SV/0,0\bar{3}AI$  gefunden (7). Für den Fließtext des englischsprachigen Connected Speech Test CST wurde eine Steigung der absoluten Transferfunktion von  $10,6 \%SV/0,0\bar{3}AI$  ermittelt (8). Für die englischen SPIN-Sätze mit starkem Kontexteffekt ergab sich eine Steigung der absoluten Transferfunktion von  $10,5 \%SV/0,0\bar{3}AI$  (16). Diese Sprachmaterialien weisen viel Kontext und eine verhältnismäßig steile Transferfunktion auf. Für englische Sätze, bei denen die Zielwörter nur schwach kontextuell eingebunden waren, ergab sich eine Steigung der absoluten Transferfunktion von  $6,5 \%SV/0,0\bar{3}AI$ . Bei Einzelworttests, wie z. B. dem Diagnostic Rhyme Test DRT, bei dem einzelne Wörter aus zwei gegebenen Alternativen auszuwählen sind, beträgt die Steigung  $6,5$

$\%SV/0,0\bar{3}AI$  (34). Eine mittelstarke kontextuelle Einbindung ergab also mittlere Werte der Steilheit der Transferfunktion. Einsilbige Wörter mit minimalem Kontext, der hier nur noch über die Lautfolge wirken kann, weisen noch flachere Transferfunktionen auf. So wurden für den englischen Wörtest NU6 eine Steigung von  $6,4 \%SV/0,0\bar{3}AI$  (10) und für die englischen PB-Words Steigungen von  $4,9 \%SV/0,0\bar{3} AI$  (35) beziehungsweise  $4,3 \%SV/0,0\bar{3}AI$  (37) errechnet. Die Steigung von  $5,5 \%SV/0,0\bar{3}AI$  für den Freiburger Einsilbertest ist damit den für andere Einsilber errechneten Werten recht ähnlich. Der für die englischen Einsilber des CID-W22 errechnete Wert von  $8,3 \%SV/0,0\bar{3} AI$  erscheint dagegen verhältnismäßig hoch. French und Steinberg ermittelten 1947 für sinnlose Silben eine Transferfunktion mit einer Steigung von  $5,3\%SV/0,0\bar{3}AI$ . Bei dieser Studie und der von Black aus dem Jahr 1959 ist bezüglich der Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu beachten, dass sie nicht mit einem sprechersimulierenden Rauschen durchgeführt wurden, was durch die unterschiedliche Maskierungswirkung Einfluss auf die Steilheit der Transferfunktion haben kann.

Zusätzlich zur Steilheit muss auch die Lage der Funktion entlang der Abszisse beachtet werden. Die AI-Schwelle  $x_0$ , also der AI-Wert, der einer SV von 50 % zuzuordnen ist, beträgt beim Freiburger Einsilbertest 0,44 AI. Bei den oben genannten Sprachmaterialien mit mehr Kontext wird die AI-Schwelle bereits bei deutlich niedrigeren Werten von ungefähr 0,2 - 0,3 AI erreicht. Bei Materialien mit weniger Kontext liegt sie mit Werten um 0,3 AI etwas höher. Der Freiburger Einsilbertest stellt mit seiner AI-Schwelle bei 0,44 AI ein insgesamt recht schwieriges Sprachmaterial dar.

Tabelle 21 gibt einen Überblick über Steigung und AI-Schwelle verschiedener Sprachmaterialien.

Kontext	Sprachmaterial	Steigung [%SV/0,03AI]		AI-Schwelle [AI]		Autor, Jahr
		Rel. TF	Abs. TF	Rel. TF	Abs. TF	
viel	Fließende Konversation	18	-	0,23	-	Studebaker, 1987 (7)
viel	CST (englische Sätze)	-	10,6	-	0,26	Sherbecoe, 2002 (8)
viel	SPIN-PH (englische Sätze, viel Kontext)	5,5	10,5	0,42	0,20	Bell, 1992 (16)
viel	Englische Sätze	8,7	-	0,28	-	DePaolis, 1996 (37)
viel	Englischer Fließtext	6,9	-	0,40	-	DePaolis, 1996 (37)
mittel	SPIN-PL (englische Sätze, wenig Kontext)	4,9	6,5	0,42	0,31	Bell, 1992 (16)
mittel	DRT (englischer Reimtest)	6,5	6,5	0,29	0,29	Duggirala, 1988 (34)
wenig	CID W-22 (engl. Einsilber)	5,7	8,3	0,36	0,23	Studebaker, 1991 (36)
wenig	NU 6 (engl. Einsilber)	4,5	6,4	0,45	0,31	Studebaker, 1993 (10)
<b>wenig</b>	<b>Freiburger Einsilber</b>	<b>9,9</b>	<b>5,4</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>Aktuelle Studie</b>
wenig	PB 50 (engl. Einsilber)	4,9	-	0,29	-	Black, 1959 (35)
wenig	PB 50 (engl. Einsilber)	4,3	-	0,40	-	DePaolis, 1996 (37)
wenig	Sinnlose Silben	5,4	-	0,39	-	French, 1947 (3)

Tab. 21: Funktionsparameter der Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests im Vergleich mit Werten verschiedener Sprachmaterialien; die Steigung bezieht sich jeweils auf einen Bereich von 20-80% SV und wurde aus publizierten Daten anderer Studien entnommen, errechnet oder geschätzt.

Vergleicht man die absolute Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests mit den Transferfunktionen von Sprachmaterialien mit mehr Kontext (Abbildung 26), so wird klar, dass sie deutlich flacher verläuft als diese und die Sprachverständlichkeitsschwelle erst bei einem höheren AI erreicht wird. Bei gleicher Hörbarkeit lässt sich bei den Freiburger Einsilbern also eine deutlich geringere SV erzielen als bei Sprachmaterial mit viel Kontext.

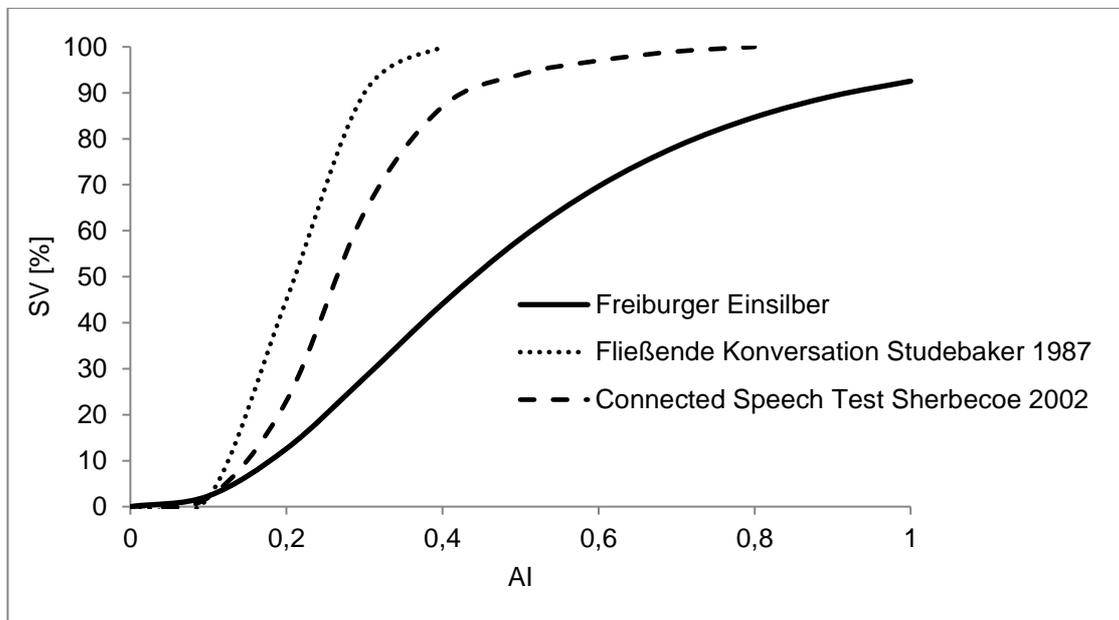


Abb. 26: Vergleich der absoluten Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests mit den Transferfunktionen anderer Sprachmaterialien mit mehr Kontext.

Vergleicht man die absolute Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests mit den Transferfunktionen anderer Einsilbertests (Abbildung 27), so wird deutlich, dass die Funktionen bezüglich der Steilheit in ihrem annähernd linearen Anteil recht ähnlich verlaufen. Die Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests erscheint jedoch entlang der AI-Achse nach rechts verschoben. Der Freiburger Einsilbertest ist also bei gleicher Hörbarkeit schwieriger zu verstehen als die anderen Einsilbertests und damit ein verhältnismäßig schwerverständliches Sprachmaterial. Insgesamt verlaufen die Transferfunktionen der verschiedenen Einsilbertests jedoch recht ähnlich.

Der Vorteil des Schwierigkeitsvergleichs mit AI-zu-SV-Transferfunktionen liegt darin, dass hier die Kalibrierung von Sprache und Störgeräusch keinen unmittelbaren Einfluss hat, wie es bei den Diskriminationsfunktionen der Fall ist. Bei diesen ist vor allem die SRT unmittelbar von der Kalibrierung beider Pegel abhängig. Da die Transferfunktionen die tatsächliche Hörbarkeit von Sprache im AI berücksichtigen, gleichen sich Kalibrierunterschiede, die zu unterschiedlichen SNR führen, bei gleicher Hörbarkeit wieder aus.

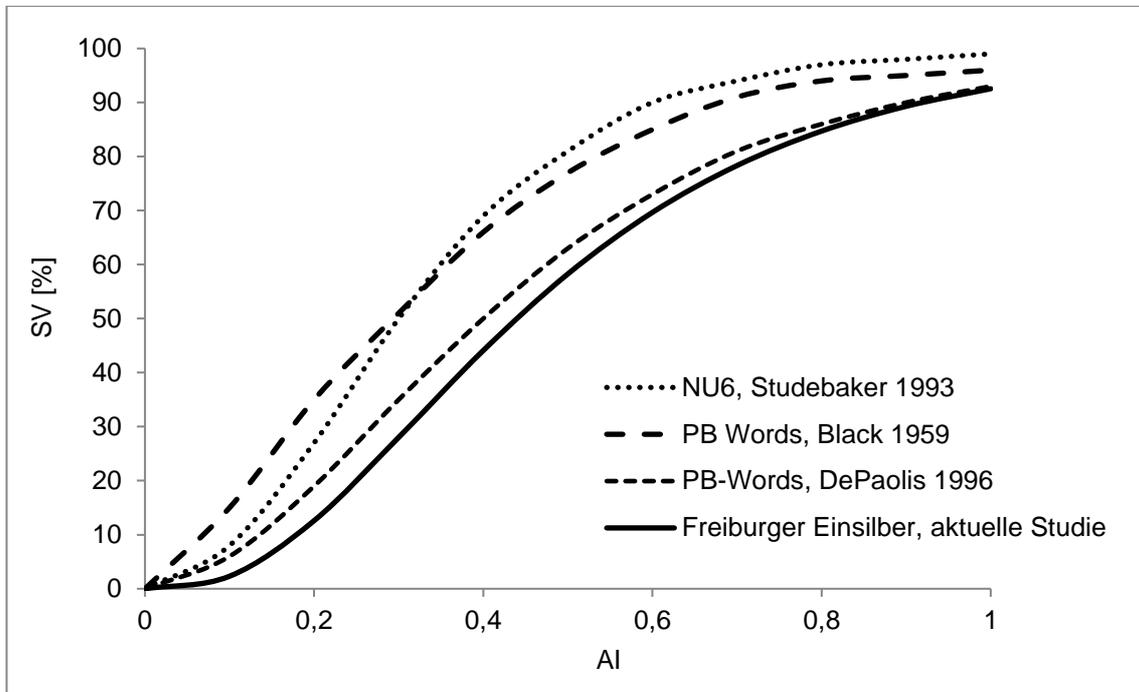


Abb. 27: Vergleich der absoluten Transferfunktion des Freiburger Einsilbertests mit denen anderer Einsilbertests der englischen Sprache

## 5. Fazit und Ausblick

Für die Anwendung des AI- bzw. SII-Verfahrens zur Schätzung der Sprachverständlichkeit des Freiburger Einsilbertests in Abhängigkeit der Hörbarkeit von Sprachinformation wurden zuerst die Diskriminationsfunktionen für die frequenzband-gefilterten Freiburger Einsilber für verschiedene Frequenzbänder als Funktion des SNR erstellt. Hieraus wurden eine Wichtigkeitsfunktion (Band-Importance-Function) für 20 Terzbänder bzw. 6 Oktavbänder sowie die Frequenzgrenzen von 20 Bändern gleicher Wichtigkeit ermittelt. Im Anschluss wurde im Abgleich mit den gemessenen Werten der Sprachverständlichkeit die absolute Transferfunktion zur Vorhersage der prozentualen Verständlichkeit aus dem AI für das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests bei Normalhörenden ermittelt. Aufbauend auf diesen Funktionen kann nun das AI- wie auch das SII-Verfahren spezifisch auf das Sprachmaterial des Freiburger Einsilbertests angewendet werden.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich weitere Forschungsfragen für neue Untersuchungen entwickeln.

Die hier entwickelte absolute Transferfunktion ermöglicht die Umrechnung von AI-Werten in prozentuale Sprachverständlichkeit. Da die ermittelte Wichtigkeitsfunktion sowohl für das AI- als auch das SII-Verfahren verwendet werden kann, besteht damit die Möglichkeit, für die hier verwendeten Hörbedingungen durch die Umrechnung von AI- in SII-Werte in einer zukünftigen Arbeit auch eine absolute Transferfunktion für die Vorhersage der Sprachverständlichkeit auf Basis des SII-Verfahrens durchzuführen.

Sowohl das AI- als auch das SII-Verfahren ermitteln Hörbarkeitsindizes auf der Basis eines Normalgehörs oder für Patienten mit einer reinen Schalleitungsstörung. In weiteren Arbeiten könnten dann Korrekturfaktoren für die Verständlichkeitsvorhersage für Patienten mit Innenohrschwerhörigkeiten entwickelt werden, da sich bei einer Innenohrschwerhörigkeit die Sprachverständlichkeit nicht nur durch den Hörverlustanteil (Anhebung der Hörschwelle), sondern auch durch den Undeutlichkeitsanteil aufgrund des Untergangs von Hörzellen und Verbreiterung der Wanderwellen ergibt. Im AI und SII werden jedoch nur die Hörbarkeitseinschränkungen berücksichtigt. Die zusätzliche Verminderung der Verständlichkeit durch den Undeutlichkeitseffekt könnte durch hörverlustspezifische Korrekturwerte einbezogen werden.

## 6. Literatur

1. Lazarus H, Sust CA, Steckel R, Kulka M, Kurtz P, Hrsg. Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2007.
2. Behrends JC. Physiologie. 3.,vollständig überarbeitete Auflage. Stuttgart: Thieme; 2017. (Duale Reihe).
3. French NR, Steinberg JC. Factors Governing the Intelligibility of Speech Sounds. *J Acoust Soc Am* 1947; 19(1):90–119.
4. Miller GA, Nicely PE. An Analysis of Perceptual Confusions Among Some English Consonants. *J Acoust Soc Am* 1955; 27(2):338–52.
5. Fairbanks G. Test of Phonemic Differentiation: The Rhyme Test. *J Acoust Soc Am* 1958; 30(7):596–600.
6. House AS, Williams CE, Heker MH, Kryter KD. Articulation-Testing Methods: Consonantal Differentiation with a Closed-Response Set. *J Acoust Soc Am* 1965; 37:158–66.
7. Studebaker GA, Pavlovic CV, Sherbecoe RL. A frequency importance function for continuous discourse. *J Acoust Soc Am* 1987; 81(4):1130–8.
8. Sherbecoe RL, Studebaker GA. Audibility-index functions for the connected speech test. *Ear and Hearing* 2002; 23(5):385–98.
9. Miller GA, Heise GA, Lichten W. The intelligibility of speech as a function of the context of the test materials. *J Exp Psychol* 1951; 41(5):329–35.
10. Studebaker GA, Sherbecoe RL, Gilmore C. Frequency-Importance and Transfer Functions for the Auditec of St. Louis Recordings of the NU-6 Word Test. *J Speech Hear Res* 1993; 36(4):799.
11. Howes D. On the Relation between the Intelligibility and Frequency of Occurrence of English Words. *J Acoust Soc Am* 1957; 29(2):296–305.
12. Stowe AN, Harris WP, Hampton DB. Signal and Context Components of Word-Recognition Behavior. *J Acoust Soc Am* 1963; 35(5):639–44.
13. Pollack I, Rubenstein H, Decker L. Intelligibility of Known and Unknown Message Sets. *J Acoust Soc Am* 1959; 31(3):273–9.
14. Savin HB. Word-Frequency Effect and Errors in the Perception of Speech. *J Acoust Soc Am* 1963; 35(2):200–6.
15. Luce PA, Pisoni DB. Recognizing spoken words: the neighborhood activation model. *Ear and Hearing* 1998; 19(1):1–36.
16. Bell TS, Dirks DD, Trine TD. Frequency-importance functions for words in high- and low-context sentences. *J Speech Hear Res* 1992; 35(4):950–9.
17. Miller GA. Some psychological studies of grammar. *American Psychologist* 1962; 17(11):748–62.

18. Rönnberg J, Lunner T, Zekveld A, Sörqvist P, Danielsson H, Lyxell B et al. The Ease of Language Understanding (ELU) model: theoretical, empirical, and clinical advances. *Front Syst Neurosci* 2013; 7:31.
19. Feldmann H. Das Gutachten des Hals-Nasen-Ohren-Arztes. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. s.l.: Thieme; 2006.
20. Königsteiner Empfehlung: Empfehlung für die Begutachtung der Lärmschwerhörigkeit (BK-Nr. 2301). 1., neue Ausg. Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung; 2012 [Stand: 24.09.2016].
21. Versorgungsmedizin-Verordnung September 2015 [Stand: 29.09.2016].
22. Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 266:1997-08, Akustik\_- Normfrequenzen (ISO\_266:1997); Deutsche Fassung EN\_ISO\_266:1997. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 1997.
23. American National Standards Institute. American National Standard Methods for the Calculation of the Articulation Index: Acoustical Society of America, 1969.
24. American National Standards Institute. American National Standard Methods for Calculation of the speech Intelligibility Index: Acoustical Society of America, 1997.
25. Hoth S. The Freiburg speech intelligibility test: A pillar of speech audiometry in German-speaking countries. *HNO* 2016; 64(8):540–8.
26. Hahlbrock K-H. Sprachaudiometrie: Grundlagen und praktische Anwendung einer Sprachaudiometrie für das deutsche Sprachgebiet ; 157 Abbildungen in 305 Einzeldarstellungen 9 Tabellen. 2., neubearb. Aufl. Stuttgart: Thieme; 1970.
27. Meier H. Deutsche Sprachstatistik. 2. erw. u. verb. Aufl. Hildesheim: Olms; 1964.
28. Steffens T. Use of Freiburg monosyllabic test words in the contemporary German language: Currentness of the test words. *HNO* 2016; 64(8):549–56.
29. Brinkmann K. Die Neuaufnahme der „Wörter für Gehörprüfung mit Sprache“. *Z Hörgeräteakustik* 1974; (13):12–40.
30. Deutsches Institut für Normung. DIN 45621-1:1995-08 Sprache für Gehörprüfung - Teil 1: Ein- und mehrsilbige Wörter; 1995.
31. Kollmeier B, Lenarz T, Winkler A, Zokoll MA, Sukowski H, Brand T et al. Hörgeräteindikation und -überprüfung nach modernen Verfahren der Sprachaudiometrie im Deutschen. *HNO* 2011; 59(10):1012–21.
32. Kollmeier B, Lenarz T, Kießling J, Müller-Deile J, Steffens T, v Wedel H et al. Zur Diskussion um den Freiburger Einsilbertest. *HNO* 2014; 62(1):49–53.
33. Sukowski H, Brand T, Wagener KC, Kollmeier B. Comparison of different speech intelligibility tests in German language (Freiburg speech test vs. Gottingen sentence test and monosyllabic rhyme test). *HNO* 2009; 57(3):239–50.
34. Duggirala V, Studebaker GA, Pavlovic CV, Sherbecoe RL. Frequency importance functions for a feature recognition test material. *J Acoust Soc Am* 1988; 83(6):2372–82.
35. Black JW. Equally Contributing Frequency Bands in Intelligibility Testing. *J Speech Hear Res* 1959; 2(1):81.

36. Studebaker GA, Sherbecoe RL. Frequency-Importance and Transfer Functions for Recorded CID W-22 Word Lists. *J Speech Hear Res* 1991; 34(2):427–38.
37. DePaolis RA, Janota CP, Frank T. Frequency Importance Functions for Words, Sentences, and Continuous Discourse. *J Speech Hear Res* 1996; 39(4):714.
38. Fletcher H, Steinberg JC. Articulation Testing Methods. *Bell System Technical Journal* 1929; 8(4):806–54.
39. Pavlovic CV, Studebaker GA. An evaluation of some assumptions underlying the articulation index. *J Acoust Soc Am* 1984; 75(5):1606–12.
40. Hirsh IJ, Davis H, Silverman SR, Reynolds EG, Eldert E, Benson RW. Development Of Materials For Speech Audiometry. *J Speech Hear Disord* 1952; 17(3):321.
41. Tillman TW, Carhart R. An expanded test for speech discrimination utilizing CNC monosyllabic words. Northwestern University Auditory Test No. 6. SAM-TR-66-55. Tech Rep SAM-TR 1966:1–12.
42. Cox RM, McDaniel DM. Intelligibility ratings of continuous discourse: Application to hearing aid selection. *J Acoust Soc Am* 1984; 76(3):758–66.
43. Kalikow DN, Stevens KN, Elliott LL. Development of a test of speech intelligibility in noise using sentence materials with controlled word predictability. *J Acoust Soc Am* 1977; 61(5):1337–51.
44. Bilger RC, Nuetzel JM, Rabinowitz WM, Rzeczkowski C. Standardization of a Test of Speech Perception in Noise. *J Speech Hear Res* 1984; 27(1):32.
45. Egan JP. Articulation testing methods. *Laryngoscope* 1948; 58(9):955–91.
46. Cox RM, Alexander GC, Gilmore C. Development of the Connected Speech Test (CST). *Ear and Hearing* 1987; 8(5 Suppl):119S-126S.
47. Deutsches Institut für Normung. DIN 45626-1:1995-08 Tonträger mit Sprache für Gehörprüfung - Teil 1: Tonträger mit Wörtern nach DIN 45621-1 (Aufnahme 1969); 1995.
48. Winsor CP. The Gompertz Curve as a Growth Curve. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1932; 18(1):1–8.
49. Fletcher H, Galt RH. The Perception of Speech and Its Relation to Telephony. *J Acoust Soc Am* 1950; 22(2):89–151.
50. Hagerman B. Sentences for Testing Speech Intelligibility in Noise. *Scandinavian Audiology* 1982; 11(2):79–87.
51. Kollmeier B, Wesselkamp M. Development and evaluation of a German sentence test for objective and subjective speech intelligibility assessment. *J Acoust Soc Am* 1997; 102(4):2412–21.
52. Wagener K, Brand T, Kollmeier B. Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache III: Evaluation des Oldenburger Satztests. *Z Audiol* 1999; 38:86–95.
53. Wilson RH, McArdle R, Roberts H. A Comparison of Recognition Performances in Speech-Spectrum Noise by Listeners with Normal Hearing on PB-50, CID W-22, NU-6, W-1 Spondaic Words, and Monosyllabic Digits Spoken by the Same Speaker. *J Am Acad Audiol* 2008; 19(6):496–506.

54. Studebaker GA, Taylor R, Sherbecoe RL. The Effect of Noise Spectrum on Speech Recognition Performance-Intensity Functions. *J Speech Hear Res* 1994; 37(2):439.
55. Steffens T. Houston, wir haben ein Problem: es fehlen 7dB! *Zeitschrift für Audiologie* 2016; (4):137.
56. Holube I, Steffens T, Winkler A. Zur Kalibrierung des Freiburger Einsilbertests. *HNO* 2019; 67(4):304–5.
57. Hirsh IJ, Reynolds EG, Joseph M. Intelligibility of Different Speech Materials. *J Acoust Soc Am* 1954; 26(4):530–8.
58. Speaks C. Intelligibility of filtered synthetic sentences. *J Speech Hear Res* 1967; 10(2):289–98.

## 7. Anhang

### 7.1 Anzahl der Messungen pro Testbedingung

n	SNR [dB]													
	Bandbreite [Hz]	-14	-12	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
88-9000	8	7	11		11		12	1	11	1	11	1	13	1
88-560						5		6		6		5		5
88-900						5		5		6		5		5
88-1420					6		5		6		5		5	
88-2250			6		5		5		5		5		5	
88-3550			5		5		5		5		5		5	
88-5600		5	5		4		5		6		5		6	
5600-9000														
3550-9000														
2250-9000												5		5
1420-9000									5		6			5
900-9000				5		6			5		5		6	
560-9000		5		5		5		5		6		6		
355-9000		5		5		5		5		6		7		6

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

Tab. 22, Teil 1: Anzahl der Messungen pro Testbedingung.

n	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
88-9000					12					11				
88-560			6					5						
88-900	5					5					7			
88-1420					6					7				
88-2250					6					6				
88-3550					6					6				
88-5600					6					7				
5600-9000		5				5		6		5		5		5
3550-9000	6		6		6		6		6		6		5	
2250-9000	6		6		6		7		6					
1420-9000		6		6		6							6	
900-9000	6							6					6	
560-9000				6					7					5
355-9000			6					7					3	

n	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	30	31	33	34	35	36	38	40	41	43	45	48	53	58
88-9000														
88-560														
88-900		5												
88-1420	6							7			7			
88-2250	5							5						
88-3550	5							6						
88-5600	4													
5600-9000		5	4											
3550-9000					4									
2250-9000		6				5			6					
1420-9000			6				6			5			8	7
900-9000			5				6					6		
560-9000				5										
355-9000			5											

Tab. 22, Teil 2: Anzahl der Messungen pro Testbedingung.

## 7.2 Messwerte der Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit von Filterbandbreite und SNR

SV [%]	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	-14	-12	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
88-9000	1	3	9		15		26	30	40	50	60	60	63	75
88-560						0		2		3		8		6
88-900						0		4		6		9		10
88-1420					2		4		13		14		18	
88-2250			3		3		9		19		25		32	
88-3550			3		3		10		21		30		40	
88-5600		0	6		14		18		38		55		77	
5600-9000														
3550-9000														
2250-9000												7		7
1420-9000									5		9			16
900-9000				3		11			14		21		32	
560-9000		0		8		13		21		35		40		
355-9000		1		9		14		27		36		39		54

SV [%]	SNR [dB]														
Bandbreite [Hz]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
88-9000	67	80	80	95	87		90		93					95	
88-560		4		7		7		7		9					
88-900		17		17		19		22							
88-1420	18		24		21		36							38	
88-2250	37		43		50		57		64					73	
88-3550	49		54		62		65		72					87	
88-5600	71		78		77		92							93	
5600-9000							2		2					4	
3550-9000		6		6			8		16		13				
2250-9000					15		16				20		23		
1420-9000				33				37		42		46		49	
900-9000	38		49		49		53		69		75		76		
560-9000	45		54		64		73		77		83				
355-9000		66		68		81		73		86					

Tab. 23, Teil 1: Messwerte der prozentualen Sprachverständlichkeit [%] in Abhängigkeit der Bandbreite [Hz] und des SNR [dB].

SV [%]	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
88-9000					99					100				
88-560			5					7						
88-900	34					34					24			
88-1420					43					50				
88-2250					73					89				
88-3550					87					91				
88-5600					95					96				
5600-9000		3				5		6		5		5		4
3550-9000	12		17		16		24		20		19		16	
2250-9000	23		27		28		34		31					
1420-9000		52		53		53							48	
900-9000	82							91					90	
560-9000				98					94					93
355-9000			89					97					98	

SV [%]	SNR [dB]													
Bandbreite [Hz]	30	31	33	34	35	36	38	40	41	43	45	48	53	58
88-9000														
88-560														
88-900		29												
88-1420	55							60			66			
88-2250	85							91						
88-3550	96							99						
88-5600	100													
5600-9000		10	4											
3550-9000					28									
2250-9000		32				36			29					
1420-9000			55				46			75			43	56
900-9000			93				96					88		
560-9000				97										
355-9000			100											

Tab. 23, Teil 2: Messwerte der prozentualen Sprachverständlichkeit [%] in Abhängigkeit der Bandbreite [Hz] und des SNR [dB].

### 7.3 Vergleich der Fittingmethoden der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen

Die Mediane der  $R^2$ -Werte, die sich durch Anpassen von einerseits der in Kapitel 3.2.1 genannten logistischen Funktion und andererseits der Gompertz-Funktion an die Messwerte der Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit der Bandbreite und des SNR ergaben, wurden mittels des Mann-Whitney Rank Sum Tests verglichen. Tabelle 24 zeigt das Ergebnis des Mann-Whitney Rank Sum Test.

Gruppe	N	Fehlend	Median	25%	75%
Logistisch	14	0	0,885	0,321	0,937
Gompertz	14	0	0,892	0,322	0,944

Tab. 24: Ergebnis des Mann-Whitney Rank Sum Test zum Vergleich der Fittingmethoden der SNR-abhängigen Diskriminationsfunktionen

Mann-Whitney U Statistik = 87,000

$T = 192,000$   $n(\text{small}) = 14$   $n(\text{big}) = 14$  ( $P = 0,629$ )

Der Unterschied der Median-Werte zwischen den beiden Gruppen ist nicht groß genug, um die Möglichkeit auszuschließen, dass der Unterschied auf die zufällige Stichprobenvariabilität zurückzuführen ist; es gibt keinen statistisch signifikanten Unterschied ( $P = 0,629$ ).

## **Danksagung**

Ich danke meinen Eltern Christine und Stefan sowie meinen Großeltern Gerda und Heinz, die mir den Weg bis hierher ermöglicht haben. Ich danke meiner Schwester Franzl fürs Zuhören, Verstehen und Beraten. Des Weiteren danke ich Hanna, Jens, Alex, Tobi und Judith für die langjährige gute Freundschaft während der Studienzeil.

Ein großer Dank gilt auch meinem Betreuer und Doktorvater PD. Dr. biol. hom. Thomas Steffens für die gute Betreuung.

## **Curriculum vitae**

Nina Bauer

Geboren 12.05.1993 in Schweinfurt

2011 Abitur am Celtis-Gymnasium Schweinfurt

2011-2018 Studium der Humanmedizin an der Universität Regensburg

2018 Staatsexamen und Erhalt der Approbation als Ärztin

Seit 2018 Promotionsstudium an der Universität Regensburg

Seit 2019 Arbeit als Assistenzärztin in der Gynäkologie und Geburtshilfe am Krankenhaus St. Barbara in Schwandorf