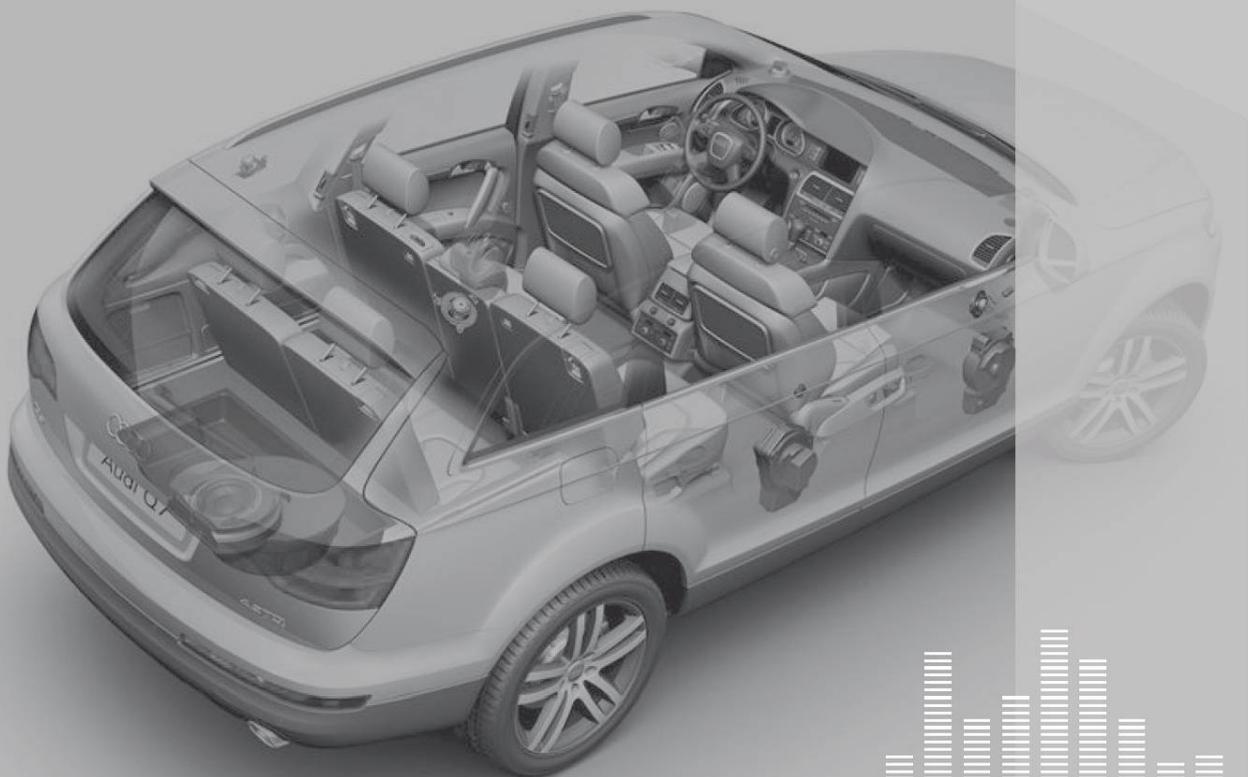




Sprachverständlichkeits- basierte Modellierung der Kommunikationsqualität im Kfz

Rosa-Linde Fischer



Audi-Dissertationsreihe, Band 46

Sprachverständlichkeitsbasierte Modellierung der Kommunikationsqualität im Kfz

Inaugural-Dissertation
in der Philosophischen Fakultät und Fachbereich Theologie
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von

Rosa-Linde Fischer

aus

Berlin

D 29

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-820-2

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2011

Dekanin: Universitätsprofessorin Dr. Heidrun Stein-Kecks

Erstgutachterin: Universitätsprofessorin Dr. Cristina Meinecke

Zweitgutachter: Universitätsprofessor Dr. Rainer Guski

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-820-2

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	11
2. Wahrnehmung von Sprache	15
2.1 Wahrnehmung von Sprache in geräuschvoller Umgebung	15
2.2 Wahrnehmungsveränderungen durch Hörschäden	17
2.3 Qualitätswahrnehmung von Sprache	19
2.4 Zusammenfassung	20
3. Messung und Vorhersage der Wahrnehmung von Sprache	21
3.1 Quantifizierung der Wahrnehmung von Sprache	21
3.1.1 Sprachqualität	21
3.1.2 Sprachverständlichkeit	22
3.1.3 Kommunikationsqualität	22
3.2 Modellierung der Wahrnehmung von Sprache	23
3.2.1 Sprachqualität	23
3.2.2 Sprachverständlichkeit	24
3.2.2.1 Speech Intelligibility Index (SII)	25
3.2.2.2 Speech Transmission Index (STI)	26
3.2.2.2.1 Speech Transmission Index for Public Address Systems (STIPA)	27
3.2.2.3 Binaurale Sprachverständlichkeitsmodelle	28
3.3 Empirische Befunde zur Modellgüte	29
3.3.1 Sprachqualitätsmodelle	29
3.3.2 Sprachindizes	30
3.3.2.1 Zusammenhang mit der Sprachverständlichkeit	30
3.3.2.2 Zusammenhang mit der Höranstrengung	33
3.4 Zusammenfassung	33
4. Fragestellung und Übersicht der empirischen Untersuchungen	35
5. Datenbank zur Beschreibung der akustischen Bedingungen im Fahrzeug	37
5.1 Die Hörsituation im Fahrzeug	37
5.1.1 Die Störgeräuschsituation im Fahrzeug	37
5.1.2 Darstellung des Signalübertragungswegs im Fahrzeug	38
5.1.3 Die binaurale Hörsituation im Fahrzeug	40
5.1.4 Zusammenfassung	41
5.2 Erstellung der Datenbank	41
5.2.1 Binaurale Aufnahmen	41
5.2.1.1 Innenohrmikrofone - Soundman Originalkopf-Mikrofone	42
5.2.1.2 Kunstkopf - Head Acoustics Head Measurement System III	42
5.2.2 Erzeugung der Sprachsignale	42
5.2.2.1 Insassenkommunikation	43

5.2.2.2	Telefon	44
5.2.3	Versuchsplan	44
5.2.4	Durchführung	46
5.2.4.1	Aufnahme der Innenraumgeräusche	46
5.2.4.2	Aufnahme der Sprachsignale	46
5.2.5	Datenaufbereitung	47
5.2.6	Datenauswertung	47
5.2.6.1	Frequenzspektren	47
5.2.6.2	Pegel	48
5.2.6.3	Pegeldifferenzspektren	48
5.2.6.4	Modulationsspektren	48
5.3	Ergebnisse	48
5.3.1	Störgeräuschaufnahmen	48
5.3.1.1	Einfluss der Geschwindigkeit	48
5.3.1.2	Einfluss der Karosserie	50
5.3.1.2.1	Baureihe	50
5.3.1.2.2	Kabinenzustand	50
5.3.1.3	Einfluss der Sitzposition	53
5.3.1.3.1	Beifahrersitz und Rückbank	53
5.3.1.3.2	Fahrer- und Beifahrersitz	54
5.3.2	Sprachaufnahmen	58
5.3.2.1	Einfluss der Signalquelle	58
5.3.2.1.1	Sprachwiedergabesysteme	58
5.3.2.1.2	Fahrer als Sprecher	59
5.3.2.2	Einfluss der Karosserie	62
5.3.2.2.1	Baureihe	62
5.3.2.2.2	Kabinenzustand	63
5.3.2.3	Einfluss der Sitzposition	65
5.3.2.3.1	Entertainmentwiedergabe auf Beifahrerplatz und Rückbank	65
5.3.2.3.2	Insassenkommunikation zwischen Fahrer und Personen in der zweiten bzw. dritten Sitzreihe im SUV	66
5.4	Zusammenfassung	68
6.	Experiment 1 - Evaluation der Sprachindizes für Störgeräusche im Kfz	71
6.1	Hypothesen	72
6.2	Methode	75
6.2.1	Personen	75
6.2.2	Versuchsaufbau	75
6.2.2.1	Apparatur	75
6.2.2.2	Stimuli	76
6.2.3	Versuchsplan	77
6.2.4	Durchführung	78
6.2.5	Modellierung der Sprachverständlichkeit durch die Sprachindizes	80
6.2.6	Datenauswertung und Statistik	81
6.3	Ergebnisse 1	81
6.3.1	Tonaudiometrie	81

6.3.2	Güte der Sprachindizes in den Validierungs- und Mischbedingungen	82
6.3.3	Güte der Sprachindizes im Fahrzeug	84
6.3.3.1	Normalhörende	84
6.3.3.2	Hörgeschädigte	86
6.3.4	Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte der Sprachindizes	87
6.3.4.1	Normalhörende	87
6.3.4.2	Hörgeschädigte	88
6.3.5	Auswirkungen von Geschwindigkeit und Sitzposition auf die empirischen SRTs	88
6.3.5.1	Normalhörende	88
6.3.5.2	Hörgeschädigte	89
6.4	Ergebnisse 2	89
6.4.1	Güte des $BSIM_T$ in den Validierungs- und Mischbedingungen	89
6.4.2	Güte des $BSIM_T$ im Fahrzeug	90
6.4.2.1	Normalhörende	90
6.4.2.2	Hörgeschädigte	92
6.4.3	Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte des $BSIM_T$	92
6.4.3.1	Normalhörende	93
6.4.3.2	Hörgeschädigte	93
6.5	Diskussion	94
6.5.1	Vergleich der Ergebnisse der Validierungsbedingungen mit den Daten aus Beutelmann und Brand (2006)	94
6.5.2	Vergleich der Modellgüte des SII und des BSIM in der Validierung I- und den Mischbedingungen	95
6.5.3	Modellgüte des $BSIM_T$	96
6.5.3.1	Vergleich der Modellgüte in der Validierung I mit den Mischbedingungen	97
6.5.4	Modellgüte des $BSIM_T$ in den Hauptbedingungen	97
6.5.5	Vergleich der Modellgüte des SII und BSIM in den Hauptbedingungen	98
6.5.6	Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte des SII und des BSIM	99
6.5.7	Auswirkungen von Geschwindigkeit und Sitzposition auf die empirischen SRTs	101
6.5.8	Zusammenfassung	102
7.	Experiment 2 - Evaluation der Sprachindizes für Sprachsignale im Kfz	103
7.1	Fragestellung und Hypothesen	103
7.2	Methode	105
7.2.1	Personen	105
7.2.2	Versuchsaufbau	105
7.2.2.1	Apparatur	105
7.2.2.2	Stimuli	105
7.2.3	Versuchsplan	106
7.2.4	Durchführung	106
7.2.5	Modellierung der Sprachverständlichkeit	107
7.2.6	Datenauswertung und Statistik	107
7.3	Ergebnisse	108
7.3.1	Güte der Sprachindizes im Fahrzeug	108

7.3.2	Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte der Sprachindizes	109
7.3.2.1	Fahrer als Sprecher im Vergleich zum Entertainmentsystem	109
7.3.2.2	Sitzplatz	110
7.3.2.3	Sprachwiedergabesysteme als Signalquelle	111
7.3.3	Auswirkung von Signalquelle und Sitzplatz auf die empirischen SRTs	111
7.3.3.1	Fahrer als Sprecher im Vergleich zum Entertainmentsystem	111
7.3.3.2	Sitzplatz	112
7.3.3.3	Sprachwiedergabesysteme als Signalquelle	112
7.4	Diskussion	113
7.4.1	Güte der Sprachindizes im Fahrzeug	113
7.4.2	Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte des SII_T und des $BSIM_T$	114
7.4.3	Auswirkung von Signalquelle und Sitzplatz auf die empirischen SRTs	116
7.4.4	Zusammenfassung	118

8. Experiment 3 - Sprachindizes und Kommunikationsqualität im Kfz **119**

8.1	Fragestellung und Hypothesen	121
8.2	Methode	123
8.2.1	Personen	123
8.2.2	Versuchsaufbau	123
8.2.2.1	Apparatur	123
8.2.2.2	Stimuli	125
8.2.3	Versuchsplan	125
8.2.4	Durchführung	126
8.2.5	Modellierung der Sprachverständlichkeit	127
8.2.6	Bestimmung der Messpunkte für die Kommunikationsqualität . . .	127
8.2.6.1	Normalhörende	128
8.2.6.2	Hörgeschädigte	128
8.2.7	Datenauswertung und Statistik	128
8.3	Ergebnisse	129
8.3.1	Tonaudiometrie	129
8.3.2	Methodische Betrachtungen	130
8.3.2.1	Mittelwerte der Items in Abhängigkeit des SNR	130
8.3.2.1.1	Normalhörende	130
8.3.2.1.2	Hörgeschädigte	130
8.3.2.2	Beiträge der Items zur Kommunikationsqualität	131
8.3.2.2.1	Normalhörende	132
8.3.2.2.2	Hörgeschädigte	132
8.3.2.3	Qualitativer Vergleich der SNR- und SRT-basierten Kom- munikationsqualität im Kfz	133
8.3.2.3.1	Normalhörende	133
8.3.2.3.2	Hörgeschädigte	134
8.3.3	Zusammenhänge der Items der Kommunikationsqualität	135
8.3.3.1	Normalhörende	135
8.3.3.2	Hörgeschädigte	136
8.3.4	Veränderung der Kommunikationsqualität, der Sprachverständ- lichkeit und des $BSIM_T$ in Abhängigkeit des SNR	136
8.3.4.1	Normalhörende	137
8.3.4.2	Hörgeschädigte	138

8.3.4.3	Korrelationen zwischen Sprachverständlichkeit bzw. Kommunikationsqualität und den Sprachindizes	139
8.3.5	SRT-basierte Qualitätsniveaus für Kommunikation im Kfz	139
8.3.5.1	Normalhörende	140
8.3.5.2	Hörgeschädigte	140
8.4	Diskussion	142
8.4.1	Methodische Betrachtungen	143
8.4.1.1	Mittelwerte der Items in Abhängigkeit des SNR	143
8.4.1.2	Beiträge der Items zur Kommunikationsqualität	143
8.4.1.3	Qualitativer Vergleich der SNR- und SRT-basierten Kommunikationsqualität im Kfz	144
8.4.2	Zusammenhänge der Items der Kommunikationsqualität	145
8.4.3	Veränderung der Kommunikationsqualität, der Sprachverständlichkeit und des $BSIM_T$ in Abhängigkeit des SNR	146
8.4.4	SRT-basierte Qualitätsniveaus für Kommunikation im Kfz	148
8.4.4.1	Normalhörende	148
8.4.4.2	Hörgeschädigte	149
8.4.5	Zusammenfassung	150
9.	Gesamtdiskussion	153
9.1	Modellgüte der Sprachindizes im Kfz	153
9.2	Zusammenhang zwischen den Sprachindizes und der Kommunikationsqualität	155
9.3	Modellgüte der Sprachindizes für Personen mit Höreinschränkungen	155
9.4	Anwendungen in der Infotainmententwicklung der Audi AG	156
10.	Zusammenfassung	161
	Literaturverzeichnis	165
	Anhang	171
A1	Experiment 1	171
A1.1	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten - Normalhörende	171
A1.2	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten - Hörgeschädigte	174
A1.3	Test der Anwendungsvoraussetzungen für das ALM zur Modellgüte des SII und des BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Normalhörende	178
A1.4	Test der Anwendungsvoraussetzungen für das ALM zur Modellgüte des SII und des BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Hörgeschädigte	179
A1.5	Test der Anwendungsvoraussetzungen für das ALM zum Vergleich der Modellgüte des SII und des BSIM über die Hauptbedingungen - Hörgeschädigte	180
A1.6	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. der Modellgüte des $BSIM_T$ - Normalhörende	181

A1.7	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. der Modellgüte des $BSIM_T$ - Hörgeschädigte	182
A1.8	Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM zur Modellgüte des $BSIM_T$ mit dem BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Normalhörende	183
A1.9	Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM zur Modellgüte des $BSIM_T$ mit dem BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Hörgeschädigte	183
A2	Experiment 2	184
A2.1	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. der Modellgüte des SII_T und des $BSIM_T$ - Normalhörende	184
A2.2	Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM zur Modellgüte des SII_T und $BSIM_T$ bzgl. der Signalquellen - Normalhörende	185
A2.3	Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM über die empirischen SRTs bzgl. der Signalquellen - Normalhörende	186
A3	Experiment 3	187
A3.1	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Normalhörende	187
A3.2	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Hörgeschädigte	190
A3.3	Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM über die SNRs bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Normalhörende	193
A3.4	Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM über die SNRs bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Normalhörende	194

1. Einleitung

Die Ausweitung des menschlichen Lebensraums auf das Auto trägt zur Entstehung eines Bedürfnisses nach guter Kommunikation im Fahrzeug bei. Damit geht der Wunsch einher, diesen auch beruflich oder in der Freizeit zur Informationsaufnahme und zum Austausch zu nutzen. Die Weiterentwicklung der elektronischen Medien ermöglicht inzwischen auch deren Nutzung im Automobil. Gerade die Premiumhersteller der Automobilindustrie, wie die Audi AG, zeichnen sich durch ein breites und qualitativ hochwertiges Angebot an Infotainmentsystemen aus. Dieses steht grundsätzlich den Home-Entertainmentsystemen in Leistung und Funktionen in keinsten Weise nach. Allerdings sind die Anforderungen an die Systeme im Fahrzeug, wie der Begriff Infotainment bereits andeutet, andere als zu Hause. Diese Systeme sollen nicht nur unterhalten (Entertainment: Radio, CD, TV etc.), sondern auch informieren (Navigation, Warnsignale, Telefon etc.). In diesem Sinne dient das Infotainment nicht nur dem klanglich optimierten Hörgenuss, sondern muss den Insassen auch die Inhalte hörbar und verständlich wiedergeben. Dies gilt im besonderen Maße für den Fahrer, der durch die Sprachausgaben nicht zusätzlich belastet werden darf (DIN, 2007), aber auch für das Komfortempfinden der anderen Insassen. Diese Erwartungshaltung an die Infotainmentsysteme spiegelt sich auch in den Ergebnissen einer Befragung von Autofahrern aus dem Probandenpool der Audi AG und der VW AG wider (Fischer, Meinecke & Otten, 2008). Für diese ist das wichtigste Merkmal einer hohen Kommunikationsqualität im Fahrzeug eine sehr gute Sprachverständlichkeit der Infotainmentsysteme und eine möglichst geringe Höranstrengung beim Verstehen. Dies gilt im besonderen Maße, wenn die Personen Höreinschränkungen aufweisen.

Schwierigkeiten bezüglich der Qualität der Kommunikation entstehen durch die Besonderheiten des „Hörraums“, hier des Fahrzeuginnenraums. Zum einen führt die im Fahrzeug vorhandene Vielfalt an Signalquellen und Medien zu hohen Anforderungen an die Infotainmentwiedergabe (Meroth, Tolg & Plappert, 2008). Zum anderen liegt während der Fahrt ein permanenter Geräuschpegel vor, der den Austausch von Informationen erschwert.

Diese Problematik macht es erforderlich, die Wiedergabe im Fahrzeug nicht mehr nur hinsichtlich der Klangqualität bei Musikwiedergabe zu optimieren. Dies führt zwar auch zu einem guten Klang der Sprachwiedergabe, im Fokus fehlt dabei aber das zentrale Merkmal einer guten Kommunikationssituation - die Sprachverständlichkeit. Und diese ist für Autofahrer nicht optimal, wie die Daten von Fischer et al. (2008) ebenfalls zeigen. So wurde die Sprachverständlichkeit der Infotainmentsysteme vor allem von den jüngeren Autofahrern nicht gut beurteilt.

Die Audi AG setzt im Entwicklungsprozess für Infotainmentsysteme bisher Verfahren aus der Telekommunikation ein. Diese werden zur Optimierung der Wiedergabe von Telefongesprächen genutzt. In diesen Verfahren ist aber Sprachverständlichkeit nur eines unter mehreren Qualitätsmerkmalen, die auch speziell auf diesen Weg der Sprachübertragung ausgerichtet sind. Weiterhin werden viele Entscheidungen bei der Abstimmung der Soundsysteme (Entertainment und Infotainment) subjektiv getroffen. Objektive Messinstrumente mit dem Fokus auf die Sprachverständlichkeit der Sprachwiedergabe von Systemen werden bisher nicht eingesetzt.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Infotainmentsysteme, des Innovationsdrucks bei deren Entwicklung und ihres Differenzierungsbeitrags im Wettbewerb (Meroth et al., 2008) müssen Methoden entwickelt werden, die eine objektive Beurteilung der Soundsysteme bereits früh im Entwicklungsprozess möglich machen. Ein Instrument zur objektiven Messung von Sprachverständlichkeit sind die sogenannten Sprachindizes. Diese werden auch zur Messung von Sprachverständlichkeit im Fahrzeug eingesetzt (Farina, Bozzoli & Strasser, 2003; Bozzoli & Farina, 2004; Schucht, Bork & Meier, 2008), jedoch gibt es zu deren Vorhersagegüte unter Fahrbedingungen nur vereinzelt wissenschaftliche Veröffentlichungen (Morrison & Casali, 1997; Jung, Schweitzer & Grützmacher, 2008). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der vielfältigen Laboruntersuchungen zur Modellgüte der Sprachindizes (u.a. Houtgast & Steeneken, 1971, 1973; Anderson & Kalb, 1987; Steeneken & Houtgast, 2002b; Beutelmann, 2008) ist fraglich, weil diese nur unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen gelten (Bormann, Sust, Schmitt & Fuder, 2005).

Deshalb ist eine Aufgabe dieser Arbeit, die Güte der Sprachindizes bei deren Anwendung im Fahrzeug systematisch zu untersuchen. Da die Sprachverständlichkeit ein notwendiges aber nicht hinreichendes Merkmal für eine gute Hörsituation ist, soll darüber hinaus der Beitrag der Sprachindizes zur Bestimmung der Kommunikationsqualität untersucht werden.

Im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 2) werden zunächst die Grundlagen der Sprachwahrnehmung mit besonderem Fokus auf die Sprachverständlichkeit und -qualität dargestellt. Daran anschließend werden entsprechende Messinstrumente und Wahrnehmungsmodelle zur objektiven Vorhersage vorgestellt (Kapitel 3). Aus diesen theoretischen Darstellungen werden im Kapitel 4 die Fragestellung der Arbeit und die empirischen Untersuchungen abgeleitet.

Im Kapitel 5 wird eine umfassende Untersuchung zu den Störgeräuschen und Sprachsignalen im Kfz beschrieben und der Einfluss verschiedener Fahrzeugparameter anhand der erstellten Datenbank der Aufnahmen systematisch untersucht. Daran anschließend wird in ausgewählten Situationen die Modellgüte der Sprachindizes bestimmt. Dies erfolgt im Kapitel 6 für verschiedene Störgeräusche bei Sprachwiedergabe über das Infotainmentsystem. Im Kapitel 7 werden dann verschiedene Wege der Sprachübertragung im Kfz betrachtet.

Der empirische Teil der Arbeit wird durch ein weiteres Experiment abgerundet (Kapitel 8), in dem eine Zuordnung zwischen subjektiven Qualitätsmaßen und den Sprachindizes erfolgt.

Generelle Ergebnisse der Arbeit werden im Kapitel 9 diskutiert und ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen und Anwendungen in der Entwicklung der Infotainmentsysteme der Audi AG gegeben.

2. Wahrnehmung von Sprache

In erster Linie dient die Sprache der Kommunikation, also dem Informationsaustausch zwischen Menschen. Von diesem Standpunkt aus gesehen, hat die Verständlichkeit von Sprache bei der Beschreibung einer Kommunikationssituation Priorität. Solange das Gehör gesund ist, die Sprache unbegrenzt übertragen und in Ruhe gehört wird, gibt es im Allgemeinen keine Probleme bei der Verständlichkeit. Denn das menschliche Gehör und die von ihm wahrzunehmende Sprache sind optimal aufeinander abgestimmt. Insgesamt dehnt sich die Sprache auf einen Frequenzbereich von ca. 100Hz bis 10kHz aus (Lazarus, Sust, Steckel, Kulka & Kurtz, 2007). Am empfindlichsten ist das gesunde menschliche Gehör zwischen 2 und 4kHz (Goldstein & Herbst, 2002). Wie in der Abbildung 2.1 zu erkennen ist, liegt in diesem Bereich auch ein Großteil der Konsonanten, die Wortunterscheidungen ermöglichen. Eine Beschneidung dieses Frequenzbandes, z.B. durch die elektronische Übertragung des Sprachsignals, wirkt sich deshalb auf die Verständlichkeit des Sprachsignals aus. Die Ergebnisse vieler Untersuchungen zum Einfluss von Tief-Hoch- und Bandpassfilterungen wurde von Lazarus et al. (2007) folgendermaßen zusammengefasst: Das übertragene Frequenzband begrenzt die maximal mögliche Sprachverständlichkeit. Eine hohe Sprachverständlichkeit kann nur erreicht werden, wenn ein möglichst breiter Frequenzbereich übertragen wird. Dies bezieht sich vor allem auf die hohen Frequenzen bis 6kHz.

Das Sprachverstehen wird auch beeinträchtigt, wenn Störgeräusche oder typische alters- oder lärmbedingte Veränderungen der Empfindlichkeit des Gehörs auftreten. Die Auswirkungen dieser Beeinträchtigungen auf die Kommunikation werden im Folgenden dargestellt. Im Anschluss daran wird geklärt werden, inwieweit die Sprachverständlichkeit ausreichend für die Bestimmung der wahrgenommenen Qualität der Kommunikation ist.

2.1 Wahrnehmung von Sprache in geräuschvoller Umgebung

Selbst für Hörgesunde wird es mit zunehmendem Störgeräusch schwieriger, Sprache zu verstehen. Die informationshaltigen Frequenzanteile des Sprachsignals werden, wie in der Abbildung 2.1 zu erkennen ist, durch das Fahrgeräusch maskiert. Sprache muss dann für ein besseres Sprachverstehen im Verhältnis lauter werden. Im Störgeräusch wird die Sprachverständlichkeit vor allem durch das Verhältnis zwischen dem Pegel der Sprache und des Störgeräuschs (Speech to Noise Ratio, SNR) bestimmt. Dies gilt vor allem im sprachtypischen, mittleren Lautstärkebereich von 40 - 80 dB(A) (Kryter, 1946; Fletcher & Galt, 1950). Bei gleichem SNR bleibt somit die Sprachverständlichkeit gleich, solange die Sprach- und Störgeräuschpegel in diesem Bereich liegen. Bei höheren Pegeln kommt es

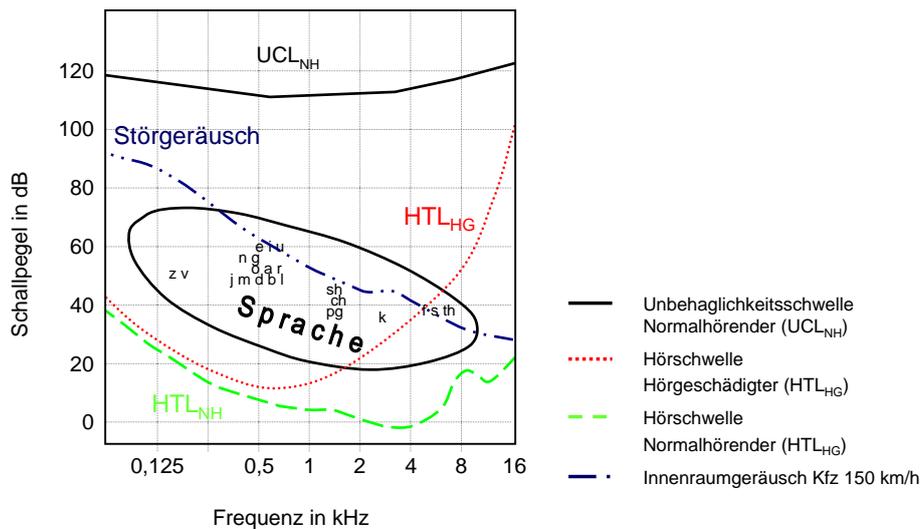


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Frequenz- und Pegelbereiche von Sprache und deren Beeinträchtigung durch Fahrgeräusche bzw. die erhöhte Hörschwelle bei Hörschäden. In Anlehnung an Gesundheitsschutz 4 - Lärmwirkungen: Gehör, Gesundheit, Leistung (BAuA, 1996)

zu Verzerrungen im Sprachsignal und bei der Wahrnehmung, die dazu führen, dass die Sprachverständlichkeit nicht mehr linear zunimmt (Bormann et al., 2005).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit zunehmendem SNR die Sprachverständlichkeit besser wird. Genauer gesagt, wird die Sprachverständlichkeit im Störgeräusch durch eine psychometrische Funktion beschrieben, d.h. sie verändert sich in typischer Weise mit dem SNR. In der Abbildung 2.2 ist als Beispiel dieser Zusammenhang für den Oldenburger Satztest (Wagener, Brand & Kollmeier, 1999b) abgebildet. Daraus ist zu entnehmen, dass sich die Sprachverständlichkeit bei hohen SNRs kaum verändert und bei weiterer Vergrößerung des SNR sogar völlig gleich bleibt.

Ein mit dem SNR verwandtes Konzept, der Speech Reception Threshold (SRT), bezeichnet den Schalldruckpegel, den ein Sprachsignal haben muss, um eine Sprachverständlichkeit von 50% zu erreichen (siehe Abbildung 2.2). Wird der SRT im Störgeräusch bestimmt, wird er im Allgemeinen wie der SNR als Differenzwert angegeben. In diesem Sinne ist der SRT der SNR, bei dem 50% Sprache verstanden werden.

SNRs sind über verschiedene akustische Bedingungen hinweg kaum vergleichbar, weil in Abhängigkeit der Spektren von Sprache und Störgeräusch die Maskierung unterschiedlich ist. Die höchste Verdeckung tritt auf, wenn die gleichen Frequenzbänder im Gehör angeregt werden. Dies bedeutet, dass Sprache am stärksten durch ein Geräusch überdeckt wird, welches das selbe Langzeitspektrum besitzt. Ein solches Rauschen wird als Sprachrauschen bezeichnet. Aber eine gewisse Verdeckungswirkung geht auch von tieferen auf benachbarte höhere Frequenzen aus, die sogenannte Aufwärtsverdeckung. Die Auswirkung auf die Sprachverständlichkeit ist abhängig vom Pegel des maskierenden Geräusches und ob der sprachrelevante Bereich erreicht wird.

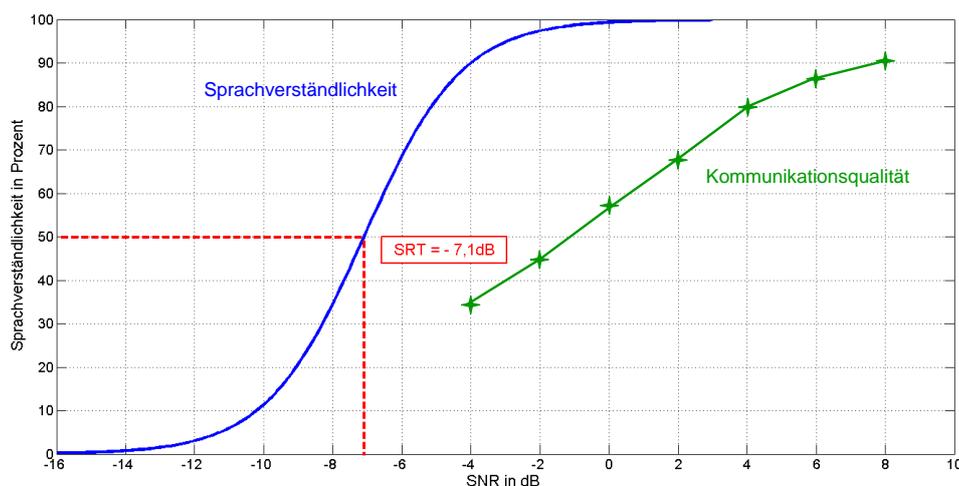


Abbildung 2.2: Die Entwicklung der Sprachverständlichkeit und der Kommunikationsqualität über den SNR. Als Beispiel für die Sprachverständlichkeit wurde die psychometrische Funktion des Oldenburger Satztests (OLSA, Wagener et al. 1999b) und deren Speech Reception Threshold (SRT) dargestellt. Die Kommunikationsqualität wurde in einem hypothetischen Verlauf dargestellt.

Eine Möglichkeit SNRs vergleichbar zu machen, bietet die gehörgerechte Bewertung der Pegel in dB(A). Diese Bewertung ist eine technische Annäherung an die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs und gewichtet die besonders wichtigen Frequenzen zwischen 2 und 4kHz höher. Ist der SNR in diesem Bereich größer, ist die Sprachverständlichkeit auch besser, als wenn ein hoher SNR bspw. im Bereich unterhalb von 500Hz erreicht wird.

Generell sind sowohl der SNR als auch der SRT so zu interpretieren, dass ein kleinerer Wert eine bessere Sprachverständlichkeit angibt. Dies bedeutet, dass das Sprachsignal im Verhältnis zum Störgeräusch weniger laut sein muss, um die gleiche Sprachverständlichkeit, d.h. am SRT 50%, zu erreichen.

Die Auswirkungen einer Höreinschränkung bzw. wenn sowohl Nebengeräusche als auch ein Hörverlust auftreten, werden im nächsten Kapitel beschrieben.

2.2 Wahrnehmungsveränderungen durch Hörschäden

Dass der demographische Wandel auch vor der Automobilbranche nicht halt macht, untermauert eine Studie zum Alter von Neuwagenkäufern. In dieser zeigte sich, dass die privaten Neuwagenkäufer immer älter werden. Bspw. ist der durchschnittliche Neuwagenkäufer der Marke Audi heute mit ca. 51 Jahren bereits 1 Jahr älter, als noch im Jahr 2006 (Mauerer, 2010). Mit dem Alter der Autofahrer nimmt auch das Thema Hörschädigung für die Gestaltung von Fahrzeugen an Relevanz zu, weil Höreinschränkungen ab dem Alter von 50 Jahren überproportional ansteigen (FGH, 2000). Zusätzlich nimmt aber auch bei jüngeren Menschen der Anteil an Hörgeschädigten zu. In Deutschland gab es im Jahr 2001 13,3 Millionen Menschen über 14 Jahren mit Höreinschränkungen (Sohn,

2001). Während zu diesem Zeitpunkt noch ca. 1% der Jugendlichen zwischen 14 und 19 Jahren an Höreinschränkungen litten, veröffentlichte im Jahr 2008 das Forum Gutes Hören Folgendes: „Jeder vierte Jugendliche hat bereits irreparable Hörschaden. [...] Die Zahl der Menschen mit behandlungsbedürftiger Hörschwäche wird in den kommenden Jahren deutlich ansteigen.“ Es wird angenommen, dass es in Zukunft 2 - 3 Millionen junge Leute mit einer lärmbedingten Innenohr-Schädigung geben wird (FGH, 2008).

Lärmbedingte Hörschäden beginnen zumeist mit einem Hörverlust bei 3kHz, der sich mit Fortschreiten der Erkrankung zu den darüber liegenden Frequenzen hin ausweitet (Bormann et al., 2005). Altersbedingte Schwerhörigkeit beginnt, für die Betroffenen zumeist unbemerkt, mit einer Hörschwellenverschiebung im höheren Frequenzbereich. Wie die Abbildung 2.1 zeigt, wirkt sich die fortschreitende Erhöhung der Hörschwelle spürbar auf das Sprachverstehen aus (BAuA, 1996). Wie die Lärmschwerhörigkeit wird die Altersschwerhörigkeit durch Veränderungen an den Haarsinneszellen im Innenohr hervorgerufen (Bormann et al., 2005). Sowohl die lärmbedingte als auch die altersbedingte Schwerhörigkeit betrifft beide Ohren, wobei die altersbedingte Schwerhörigkeit zumeist etwas milder ausfällt als die fortgeschrittene lärmbedingte. Zumeist gehen diese Erkrankungen des Gehörs mit überschwelligem Veränderungen einher, die sich in einem verringerten Vermögen zur Zeit- und Frequenzauflösung und einer veränderten Lautheitswahrnehmung (Recruitment) ausdrücken. Durch die verringerte Zeitauflösung des Gehörs haben die Betroffenen größere Schwierigkeiten beim Verstehen in Störgeräuschen. Insbesondere ist das Sprachverstehen in stark modulierten Störgeräuschen und bei Nachhall im Verhältnis zu den Normalhörenden überproportional schlechter. Die Hörgeschädigten können nicht so stark von den Bereichen im Signal mit größerem SNR (aufgrund des modulierten Störgeräuschs) profitieren wie die Normalhörenden (Ludvigsen, 1987; Bronkhorst, 2000).

Die veränderte Lautheitswahrnehmung führt dazu, dass die Unbehaglichkeitsschwelle (Uncomfortable Level, UCL) sinkt. Durch die Erhöhung der Hörschwelle und die gleichzeitige Verringerung der UCL wird die nutzbare Hörfläche kleiner (Bormann et al., 2005). Für die Sprachverständlichkeit kann dies bedeuten, dass der Pegel des Sprachsignals zu laut wird, bevor die maximale Verständlichkeit erzielt werden kann.

Im Zuge der zunehmenden Kommunikation über Medien, wie Telefon, Radio und Fernseher, der stark ansteigenden Nutzung von tragbaren Musikgeräten und der Ungebundenheit von Kommunikation durch Mobiltelefone und Freisprechanlagen haben sich zusätzlich zu den bereits beschriebenen Problemen bei der Sprachwahrnehmung weitere entwickelt. Die elektronische Verarbeitung führt zu wahrnehmbaren Artefakten im Sprachsignal, die die Kommunikation mehr oder weniger stören. Für die Beschreibung solcher Phänomene hat sich der Begriff Sprachqualität entwickelt. Die Definition der Sprachqualität und der Zusammenhang zur Sprachverständlichkeit wird im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

2.3 Qualitätswahrnehmung von Sprache

Die Sprachqualität beschreibt die wahrgenommene Güte des Sprachsignals und wird im Allgemeinen als mehrdimensionales Konstrukt betrachtet (Preminger & Van Tassel, 1995a). Oft zitiert werden die Dimensionen: *clarity (intelligibility)*, *fullness*, *brightness*, *softness*, *spaciousness*, *nearness*, *extraneous sounds* und *loudness* (Gabrielsson & Sjogren, 1979a, 1979b). Je nach Kontext werden verschiedene dieser Dimensionen untersucht mit dem Ziel, die Übertragung von Sprache durch verschiedene Systeme beschreiben und vergleichen zu können.

Anhand dieser Definition ist zu erkennen, dass die Sprachverständlichkeit ein Merkmal der Sprachqualität ist. Über die Gewichtung herrscht allerdings Uneinigkeit. Während Lazarus et al. (2007) schreiben, dass die Sprachverständlichkeit das zentrale Merkmal der Sprachqualität ist, wird sie in der Telekommunikation eher als ein gleichwertiges Merkmal unter vielen betrachtet. Beispielsweise beschreiben Denisowski (2001) und Denisowski und De Rosa (2001) die Sprachqualität in der Telekommunikation anhand der Dimensionen *Laufzeit*, *Echo* und *Verständlichkeit*. Gierlich und Kettler (2006) definieren *loudness*, *speech sound quality* und *speech intelligibility* als Einflüsse auf die Hörsituation.

Die Audiologische Forschung, die sich über viele Jahre vor allem mit der Sprachverständlichkeit beschäftigt hat, untersuchte das Zusammenspiel zwischen den einzelnen Qualitätsdimensionen genauer. Boike und Souza (2000) stellten fest, dass in Ruhe die Qualität stark komprimierter Sprache von Normalhörenden und Hörgeschädigten gleich bewertet wurde. Dagegen waren die Qualitätsurteile der Hörgeschädigten im Störgeräusch höher als die der Normalhörenden. Hier zeigten sich aber deutliche Einbußen bei der Sprachverständlichkeit der Hörgeschädigten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich in Abhängigkeit des Hörvermögens die Bedeutung der Sprachverständlichkeit für die Gesamtbewertung verändern kann. Auch Preminger und Van Tassel (1995a) gehen anhand der Ergebnisse ihrer Untersuchung mit Normalhörenden davon aus, dass die Sprachverständlichkeit den Gesamteindruck sehr stark prägt. Erst in einem Bereich, wo sich die Sprachverständlichkeit kaum noch verändert, sind Versuchspersonen in der Lage verschiedene Qualitätsdimensionen unabhängig voneinander und unabhängig von der Sprachverständlichkeit zu beurteilen.

Darüber hinaus gibt es Bemühungen, die Sprachqualität über die Beurteilung der Qualität des Signals hinaus als Verstehensprozess zu betrachten. Dabei dient der mentale Aufwand als Qualitätsmerkmal für das Verstehen. Die Bewertung erfolgt in diesem Falle anhand der Höranstrengung (*hearing difficulty*: Morimoto, Sato & Kobayashi, 2004; Sato, Bradley & Morimoto, 2005; Sato, Morimoto, Sato & Wada, 2008) oder ähnlichen Begriffen, die weitestgehend redundant verwendet werden (*effort*: Preminger & Van Tassel, 1995a; *Konzentration*: Volberg, Kulka, Sust & Lazarus, 2004, 2006; Sust, Steckel, Kulka, Lazarus & Kurtz, 2007; Sust, Lazarus, Steckel, Kulka & Kurtz, 2009 und *ease of understanding*: Boike & Souza, 2000).

Sust et al. (2007) nutzten den Begriff Kommunikationsqualität, um eine umfassende Bewertung der akustischen Hörsituation, vor allem im Arbeitsumfeld zu ermöglichen. Unter diesem Blickwinkel werden als indirekte Einflussgrößen auf die Sprachqualität neben der *Konzentration* auch die *Beeinträchtigung* bzw. *Belästigung* beim Verstehen durch Störgeräusche und die Situationsbewältigung (*Coping*) erhoben. Zusätzlich ermittelten die Autoren die objektive und subjektive Sprachverständlichkeit (Volberg et al., 2004, 2006; Sust et al., 2009), um den Zusammenhang der einzelnen Bewertungen betrachten zu können. Insgesamt zeigten sich in den Daten hohe Korrelationen zwischen den Items. Ab Erreichen einer Sprachverständlichkeit von ca. 80% veränderte sich diese aber nur noch unwesentlich, während die anderen Bewertungen, besonders die Konzentration, noch deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Sprachsignal-Rausch-Abstandes (SNR) aufwiesen (Sust et al., 2009). Der Abbildung 2.2 ist der typische Verlauf der Kommunikationsqualität im Vergleich zur Sprachverständlichkeit zu entnehmen.

2.4 Zusammenfassung

Die Sprachverständlichkeit ist ein Merkmal des mehrdimensionalen Wahrnehmungskonstrukts Sprachqualität. Es kann festgehalten werden, dass die Sprachverständlichkeit den Qualitätseindruck sehr stark prägt, solange sie deutlich eingeschränkt ist. Dies kann durch Hörschäden oder verdeckende Störgeräusche auftreten. Erst mit Erreichen einer hohen Sprachverständlichkeit scheinen die anderen Dimensionen Einfluss auf die Wahrnehmung der Sprachqualität zu gewinnen. Auch werden verschiedene Dimensionen erst dann als getrennt voneinander wahrgenommen.

Während die Sprachqualität vor allem die Qualität des Signals beschreibt, werden innerhalb des Konstruktes Kommunikationsqualität Aspekte, wie der mentale Aufwand für die Sprachverständlichkeit und Einflüsse der Hörsituation betrachtet. Alle subjektiven Dimensionen spiegeln noch Wahrnehmungsunterschiede in akustischen Bedingungen mit hohen Sprachsignal-Störgeräusch-Abständen (SNR) wider, wo die Zunahme an Sprachverständlichkeit bereits gesättigt ist.

3. Messung und Vorhersage der Wahrnehmung von Sprache

Im Kapitel 2 wurden die psychologischen Prozesse des Hörens mit dem Fokus auf die Sprachwahrnehmung dargestellt. Im Folgenden werden Messinstrumente vorgestellt und Modelle beschrieben, anhand derer die Hör- und Verstehensprozesse nachgebildet werden. Außerdem werden empirische Befunde aus der Literatur zur Güte der Modelle und deren Anwendungsbereich dargestellt.

Die Konstrukte Sprachqualität und Sprachverständlichkeit werden im weiteren Verlauf getrennt betrachtet. Dies ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass sich für die Messung und Modellierung der Sprachverständlichkeit eigene Ansätze entwickelt haben. Die Sprachqualität wird sehr industrienah und anwendungsorientiert genutzt, u.a. mit dem Ziel, Qualitätsstandards in der Telekommunikation zu entwickeln. Dagegen wurde in der audiologischen Forschung in erster Linie der Prozess und die Einflussgrößen des Hörens anhand der Sprachverständlichkeit erforscht. Unter dem Fokus der ergonomischen Bewertung der Sprachkommunikation wird die Kommunikationsqualität genutzt, um zusätzlich die Einflüsse der Hörsituation auf die Sprachqualität zu beleuchten.

3.1 Quantifizierung der Wahrnehmung von Sprache

3.1.1 Sprachqualität

Eine weit verbreitete subjektive Methode zur Beschreibung der Sprachqualität in der Telekommunikation ist der Mean Opinion Score (MOS) (Denisowski, 2001; Denisowski & De Rosa, 2001). Dabei schätzen Versuchspersonen die Qualität dargebotener Hörbeispiele anhand einer 5-stufigen Skala ein (*bad, poor, fair, good, excellent*; ITU, 1998, 2001; Beerends, Hekstra, Rix & Hollier, 2002). Um neuere Anforderungen in der Telekommunikation abzudecken, wurde der MOS auf drei Fragen erweitert. Der Speech MOS (S-MOS) bezieht sich auf die Verzerrung des Sprachsignals, der Noise MOS (N-MOS) auf die Wahrnehmbarkeit des Hintergrundgeräuschs und der Global MOS (G-MOS) dient der allgemeinen Beurteilung der Sprache (ETSI, 2008). Dadurch wird auch die Qualitätsbeurteilung von Signalen möglich, die zusammen mit einem Störgeräusch in das Übertragungssystem eingehen.

Auch alle weiteren Beurteilungen auf den im Kapitel 2.3 beschriebenen Skalen der Sprachqualität sind als subjektive Messmethoden zu begreifen, nur variieren sie je nach Untersuchung und sind nicht in Empfehlungen oder verbindlichen Normen spezifiziert.

3.1.2 Sprachverständlichkeit

Die Sprachverständlichkeit kann ebenfalls auf einer subjektiven Skala von Versuchspersonen bewertet werden. Beispielsweise ließen Preminger und Van Tassel (1995a) die Versuchspersonen die Sprachverständlichkeit in Prozent einschätzen, während Sust et al. (2007) das Ausmaß an Zustimmung zu der Aussage „Ich habe die Sätze verstanden.“ bewerten ließen. Dazu diente eine 5-stufige Skala (*schlecht, dürftig, zufriedenstellend, gut, sehr gut*).

Es ist jedoch üblich, die Sprachverständlichkeit durch eine Sprachaudiometrie, z.B. nach DIN 45621-1 (DIN, 1995) zu erfassen. Die Aufgabe der Versuchspersonen ist dabei, die dargebotenen Worte oder Sätze mündlich oder schriftlich wiederzugeben. Dabei wird verschiedenes Sprachmaterial wie Einsilber und Mehrsilber (z.B. Freiburger Sprachverständlichkeitstest) oder Sätze (z.B. Marburger Satztest) verwendet. Die Sprachverständlichkeit wird in Prozent dargestellt und gibt den Anteil der verstandenen an allen dargebotenen Items an. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in einer höheren Objektivität der Daten gegenüber der rein subjektiven Einschätzung.

Um den Alltagssituationen möglichst nahe zu kommen, wird in neuerer Zeit Sprachmaterial im Störgeräusch verwendet, wie z.B. im Oldenburger Satztest (OLSA; Wagener, Kühnel & Kollmeier, 1999a). In der Abbildung 2.2 ist die Psychometrische Funktion des OLSA dargestellt (Wagener et al., 1999b). Es ist zu erkennen, dass diese bei 50% Sprachverständlichkeit die größte Steigung hat. Der Anstieg beträgt 17,7%/dB mit einer Streuung von 1,6%. Somit verändert sich die Sprachverständlichkeit bei minimalen Änderungen im SNR sehr stark. Der Speech Reception Threshold (SRT) bezieht sich auf diesen Punkt der psychometrischen Funktion und wird deshalb oft für psychoakustische Messungen verwendet. Das heißt, man bestimmt anstelle der absoluten Sprachverständlichkeit den SRT, also den SNR zwischen Störgeräusch und Sprachsignal, bei welchem 50% der Items verstanden werden. Die Sprachverständlichkeit ist umso besser, je kleiner der SRT ist.

3.1.3 Kommunikationsqualität

Die umfangreichen Untersuchungen von Volberg et al. (2004), Volberg et al. (2006) und Sust et al. (2007) zielten darauf ab, mit der Messung der Kommunikationsqualität die ergonomische Bewertung von Arbeitsplätzen in Bezug auf die dort herrschende Hörsituation zu verbessern. Sie strebten dabei an, die Beurteilung an der Befindlichkeit der Hörer auszurichten. Dazu ließen sie auf einer 5-stufigen Bewertungsskala (*sehr gut, gut, zufriedenstellend, dürftig, schlecht*) Ich-Aussagen zur Situationsbewältigung (Coping) und zur subjektiv eingeschätzten Sprachverständlichkeit bewerten. Weitere Ich-Aussagen zur aufzuwendenden Konzentration beim Verstehen und die Belästigung durch die Störgeräusche wurden anhand der 5-stufigen Skala mit den Bewertungsmöglichkeiten *sehr, ziemlich, mittelmäßig, wenig, nicht* bewertet. Die Autoren konnten zeigen, dass die subjek-

tiven Maße eine differenziertere Messung der wahrnehmbaren Unterschiede der Hörsituation ermöglichen als die Messung der Sprachverständlichkeit. Dies galt vor allem bei hohen SNRs (Volberg et al., 2004, 2006; Sust et al., 2007).

Auch andere Arbeiten untersuchten den mentalen Aufwand beim Sprachverstehen. Preminger und Van Tassel (1995a) maßen die Höranstrengung anhand einer Skala von 0 (*not any effort*) bis 100 (*all effort*). Boike und Souza (2000) nutzten eine Skala von 0 (*very difficult*) bis 10 (*very easy*), um die Frage zu beantworten, wie leicht das Verstehen der Sprache war. Morimoto et al. (2004) untersuchten die Höranstrengung anhand einer 4-stufigen Skala (*not difficult, a little difficult, fairly difficult, extremely difficult*).

Morimoto et al. (2004) und Sato et al. (2005, 2008) konnten anhand ihrer Daten ebenfalls zeigen, dass die Höranstrengung für Unterschiede in Hörsituationen sensitiver ist als die Sprachverständlichkeit.

3.2 Modellierung der Wahrnehmung von Sprache

Im Kapitel 2 wurden Konstrukte der Wahrnehmung und deren Umsetzung in messbare Größen beschrieben. Diese subjektiven Verfahren können zur Beurteilung von Hörsituationen eingesetzt werden. Jedoch ist die Messung weiterhin mit einem hohen Personen- und Zeitaufwand verbunden. Auf der Basis erhobener Daten kann auch die Entwicklung eines Modells erfolgen, welches zur Vorhersage der Wahrnehmung der Versuchspersonen in anderen Untersuchungen dienen kann. Dadurch sollte eine von Probanden unabhängige und damit effektivere Messung möglich sein.

Bei der Modellierung der Sprachwahrnehmung werden phänomenologische Ansätze genutzt, in denen versucht wird, die Ergebnisse der physiologischen Prozesse des Gehörs durch technische Aufbauten zu erzielen. Es werden bspw. sehr gute Übereinstimmungen mit dem Frequenzauflösungsvermögen des Ohres erzielt, wenn die auditorischen Filter durch eine Filterbank darstellt werden, die das Signal analog zu den empirisch erhobenen Bandbreiten aufteilt (Hohmann, 2002). In den folgenden Kapiteln werden einige Verfahren vorgestellt, die sich in der industrienahen Forschung und Entwicklung zur Vorhersage der Sprachqualität und -verständlichkeit etabliert haben.

3.2.1 Sprachqualität

Die Modellierung der Sprachqualität in der Telekommunikation basiert, wie in der Abbildung 3.1 zu erkennen ist, auf dem Vergleich des ungestörten Referenzsignals und des durch das zu bewertende System veränderten Signals. Dabei werden die Eigenschaften des menschlichen Hörsystems, wie z.B. die Frequenzauflösung durch auditorische Filter, berücksichtigt. Anschließend werden Einflussgrößen extrahiert und diese für eine maximal gute Vorhersage der subjektiven Bewertungen (z.B. Mean Opinion Score, MOS) zusammengestellt und gewichtet. Das resultierende Modell kann anschließend für die Vorhersage des MOS anderer Signale verwendet werden.

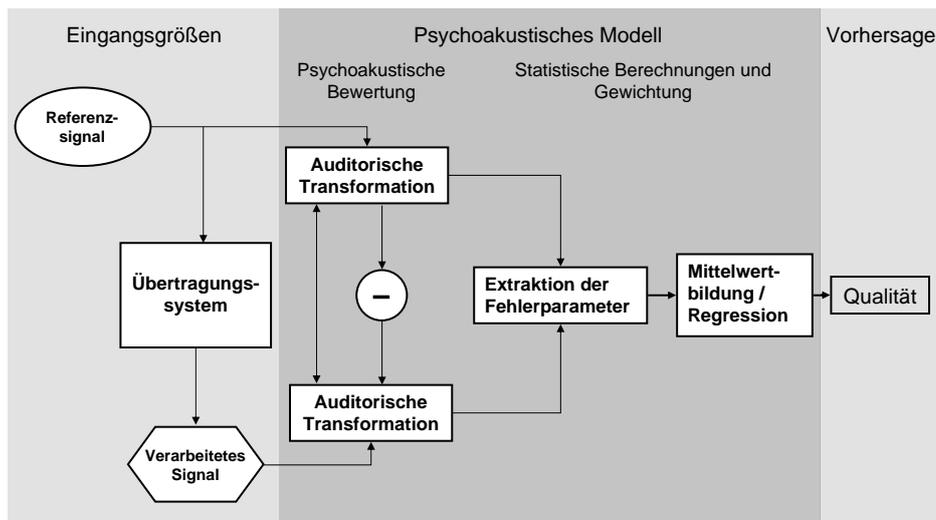


Abbildung 3.1: Grundlegendes Wahrnehmungsmodell zur Vorhersage der Sprachqualität nach Rix und Hollier (2000) und Beerends et al. (2002).

Beispiele für diese Verfahren sind das Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM), welches in der ITU-T P.861 (ITU, 1998) spezifiziert wurde, sowie das Perceptual Analysis/Masurement System (PAMS; Rix & Hollier, 2000). Das Ergebnis dieser Modelle ist jeweils ein Punktwert, der die Qualität der Übertragung widerspiegeln soll.

Die Weiterentwicklung der beiden Messmethoden mündete in einem gemeinsamen Modell, dem Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ), welches von Beerends et al. (2002) und Rix, Hollier, Hekstra und Beerends (2002) beschrieben und in der ITU-T P.862 (ITU, 2001) spezifiziert wurde.

Speziell für die Anwendung in geräuschvoller Umgebung wurde das 3Qest (ETSI, 2008) entwickelt. Dieses Modell basiert auf einem Wahrnehmungsmodell, welches unter Berücksichtigung der Ergebnisse der drei MOS-Skalen (Noise MOS, Speech MOS, Global MOS) die Qualität eines Sprachsignals vorhersagen soll, welches am Systemeingang mit einem Störgeräusch gemischt wurde.

3.2.2 Sprachverständlichkeit

In den sogenannten Sprachindizes wird der Prozess des menschlichen Sprachverstehens nachgebildet. Die Sprachindizes sind für den direkt direkten Einsatz in Störgeräuschen konzipiert, denn es werden die unmaskierten Spektralanteile der Sprache in den relevanten Frequenzbändern anhand von Gewichtungsfunktionen summiert und als Wert zwischen 0 und 1 darstellt.

Die Qualität der Sprachübertragung ist anhand der Indexwerte in verschiedenen Räumen oder durch Übertragungssysteme einfach zu vergleichen, denn je höher das Ergebnis ausfällt, desto besser ist die Sprache verständlich. Möchte man die Aussagen des Indexes anhand der psychometrischen Größe Sprachverständlichkeit darstellen, müssen die Werte

über empirisch ermittelte Funktionen in die konkrete Verständlichkeit für verschiedenes Sprachmaterial umgerechnet werden.

Im Anschluss werden ausführlich zwei dieser Verfahren beschrieben, die durch Normen spezifiziert sind und zu denen eine umfangreiche empirische Datenlage existiert. Das eine ist der Speech Intelligibility Index (ANSI, 1997), das andere der Speech Transmission Index (DIN, 2009). Darüber hinaus werden auf diesen beiden Modellen basierende Weiterentwicklungen dargestellt.

3.2.2.1 Speech Intelligibility Index (SII)

Der Sprachverständlichkeitsindex wurde auf Basis des Articulation Index (AI) entwickelt und löst diesen bei der Bestimmung der Sprachverständlichkeit ab. Die zentralen Größen dieses Ansatzes zur Berechnung der Sprachverständlichkeit sind die Spektren des Sprachsignals und des Störgeräuschs. Diese Spektren werden in Frequenzbänder aufgeteilt, innerhalb derer der SNR berechnet und anhand eines Bandgewichtungsfaktors der Beitrag zur Sprachverständlichkeit ermittelt wird. Die Gewichtungsfunktionen sind empirisch ermittelt und in der Norm festgelegt (ANSI, 1997). Anschließend werden die Beträge zur Gesamtsprachverständlichkeit aufsummiert. Im SII werden weiterhin psychoakustische Kenngrößen, wie die direkte Bandmaskierung, Aufwärtsverdeckung und Selbstverdeckung des Signals berücksichtigt. Bei hohen Sprachpegeln berechnet der SII einen Verzerrungsfaktor, der dazu führt, dass die Sprachverständlichkeit nicht mehr linear zunimmt. Für die Modellierung müssen Sprach- und Störgeräuschsignal getrennt vorliegen. Der SII ist gültig für einen SNR zwischen +15 und -15dB.

Als akustische Situation wird angenommen, dass eine simultane Darbietung des Sprach- und Störsignals im Freifeld von vorn (0°) oder „omnidirektional“ und das Hören monaural erfolgt. Die Vorhersagen sind nur im Mittel korrekt, d.h. über eine Gruppe von Hörern und eine Gruppe von Sprechern beider Geschlechter. Die Gültigkeit des Standards ist beschränkt auf natürliche Sprache und Normalhörende. Die Signale dürfen keine mehrfach scharf gefilterte Bänder enthalten. Auch nicht-lineare Verzerrungen liegen außerhalb des Gültigkeitsbereichs. Zusätzlich können Korrekturen für eine erhöhte Hörschwelle berechnet werden, die allerdings keine überschwelligen Defizite berücksichtigen (ANSI, 1997). Außerdem ist die Einbeziehung einer Modulations-Transfer-Funktion möglich, um Veränderung der sprachtypischen Modulationen in der Berechnung berücksichtigen zu können (vgl. dazu die Ausführungen zum STI in Kapitel 3.2.2.2).

Als Ergebnis erhält man einen Wert zwischen 0 und 1, wobei bei einem Wert von 0 die Sprache nicht und bei einem Wert von 1 die Sprache perfekt verstanden wird. Anhand von empirisch ermittelten psychometrischen Funktionen kann der Index in die Sprachverständlichkeit für bestimmtes Sprachmaterial umgerechnet werden. Für den SII sind diese in die Bandgewichtungsfunktionen integriert und liegen für verschiedene englische Sprachtests vor (vgl. ANSI, 1997).

Tabelle 3.1: Gegenüberstellung der Werte der Sprachindizes und der subjektiven Bewertung der Sprachverständlichkeit. Die Werte des STI entstammen der DIN IEC 60268-16; diejenigen des SII der ANSI S3.5-1997.

Bewertung	STI (Ältere Hörer, 70 Jahre, 20dB(HL))	STI (Junge Hörer, 20 Jahre, 0dB(HL))	SII
schlecht	< 0,45	< 0,3	
schwach	0,45 – 0,60	0,3 - 0,45	<0,45
ausreichend	unmöglich	0,45 - 0,6	
gut	unmöglich	0,6 - 0,75	>0,75
sehr gut	unmöglich	> 0,75	

Wie der Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, fehlt in der Norm eine detaillierte Gegenüberstellung der objektiven Werte mit einer qualitativen Bewertung. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass ein Kommunikationssystem mit einem Wert oberhalb von 0,75 eine gute Sprachverständlichkeit aufweist, während ein Wert unter 0,45 als schwach bezeichnet wird (ANSI, 1997) .

3.2.2.2 Speech Transmission Index (STI)

Der STI wurde von Houtgast und Steeneken entwickelt, 1971 erstmals veröffentlicht und ist ausführlich in der DIN IEC 60268 (DIN, 2009) beschrieben. Houtgast und Steeneken (1971) gingen ebenfalls vom Konzept des AI aus, suchten aber nach einer Möglichkeit Veränderungen im Zeitbereich, wie Nachhall, Bandbegrenzungen und Verzerrungen bei der Berechnung direkt zu berücksichtigen. Die zu Grunde liegende Idee ist, dass sich die kleinsten Sprachfragmente, genannt Phoneme, durch ein spezielles Frequenzspektrum auszeichnen. Nach Fastl und Zwicker (2007) sind sie bei einer Modulationsfrequenz von $f_{mod} = 4Hz$ maximal. Diese typischen Fluktuationen werden durch Verzerrungen des Sprachsignals, die bspw. aufgrund von Geräuschen oder Nachhall entstehen, verringert. Infolgedessen nimmt die Deutlichkeit der Sprache ab (Houtgast & Steeneken, 1971, 1973; Ludvigsen, 1993).

Zur Berechnung des STI werden die 14 Modulationsfrequenzen von 0,63 bis 12,5 Hz in Terzabständen für die 7 Oktavbänder mit Mittenfrequenzen von 125 Hz bis 8 kHz betrachtet (DIN, 2009). Die zentrale Größe des Verfahrens ist die Modulations-Transfer-Funktion (MTF). Für deren Bestimmung haben Houtgast und Steeneken (1971) ein künstliches Testsignal entwickelt, welches die relevanten Modulationsfrequenzen enthält und das Langzeitspektrum der Sprache widerspiegelt. Dieses Signal wird auf den Übertragungsweg geschickt und am Ausgang mit dem unverarbeiteten Signal bezüglich der Modulationstiefen verglichen. Dabei tragen sowohl zeitbezogene (Nachhall, Verzerrungen) als auch frequenzbezogene Veränderungen (Störgeräusch) zur Abflachung der Modulationen bei. Die Veränderungen in den einzelnen Frequenzbändern werden anhand ihrer

Bedeutung beim Sprachverstehen gewichtet, aufsummiert und als Index zwischen 0 und 1 dargestellt.

Für den ursprünglichen STI wurde aufgrund theoretischer Überlegungen und empirischer Befunde (Grant & Braida, 1991; Steeneken & Houtgast, 1999), eine Redundanzkorrektur erarbeitet, die in die DIN IEC 60268-16 bereits integriert wurde (DIN, 2009). Diese trägt der Überbewertung redundanter Informationen in den Kanälen Rechnung. Der STI gilt für einen SNR von -15 bis +15dB und berücksichtigt auch Effekte der Aufwärtsmaskierung.

Der STI bezieht sich ebenfalls auf monaurales Hören. In der Norm wird jedoch empfohlen, bei binauralen Messungen des STI mit Hilfe eines Kunstkopfes den besseren Wert zu nutzen. Diese pragmatische Lösung wurde von Van Wijngaarden und Drullman (2008) aufgrund der Ergebnisse einer Untersuchung zur Vorhersage des STI mit binauraler Vorverarbeitung vorgeschlagen, welche im Kapitel 3.2.2.3 dargestellt wird.

Der STI sollte nicht auf Übertragungskanäle angewendet werden, die Frequenzverschiebungen oder -vervielfachungen verursachen oder Vocoder enthalten. Darüber hinaus wird angemerkt, dass der STI die Sprachverständlichkeit besser bewertet als sie subjektiv empfunden wird, wenn der Frequenzgang eines Signals nicht flach ist (DIN, 2009).

Der STI ist anhand niederländischer Konsonant-Vokal-Konsonant-Silben (CVC) evaluiert. Der Zusammenhang ist in der Norm dargestellt. Anhand der Untersuchungen von Anderson und Kalb (1987) wurden in die Norm die psychometrischen Funktionen für phonetisch ausbalancierte englische Worte (PB-Wörter) aufgenommen, sodass die STI-Werte der Verständlichkeit dieses Sprachmaterials ebenfalls zugeordnet werden kann.

Außerdem enthält die Norm eine Gegenüberstellung der STI-Werte mit der Höranstrengung. Diese Werte basieren auf Untersuchungen von Sato et al. (2008) zum Verhältnis von STI und Höranstrengung in verhallter Umgebung.

Die Norm beinhaltet darüber hinaus eine detaillierte Gegenüberstellung der STI-Werte mit einer Verständlichkeitsqualifikation für Normalhörende und ältere Personen mit leichtem Hörverlust (DIN, 2009). Diese Werte sind ebenfalls in der Tabelle 3.1 dargestellt.

3.2.2.2.1 Speech Transmission Index for Public Address Systems (STIPA)

Da die Messung des STI zeitlich sehr aufwändig ist, wurden verschiedene vereinfachte Messungen entwickelt. Der STIPA ist eines dieser in der Norm DIN IEC 60268-16 beschriebenen Verfahren (DIN, 2009). Wenn sprachähnliche Modulationen vermieden werden, ist es möglich die Modulationen in den verschiedenen Frequenzbändern gleichzeitig zu messen. Anstelle der jeweils 14 Modulationsfrequenzen im vollständigen STI-Verfahren werden beim STIPA nur 2 pro Band betrachtet und die beiden unteren Bänder ($f_{mod} = 125$ und 250Hz) zusammengefasst. Alle Modulationen werden gleichzeitig analysiert und dadurch die Dauer der Messung auf 10 - 15s reduziert. Der STIPA steht als Modul für die Anwendung in gängigen akustischen Messgeräten zur Verfügung.

Der STIPA ist bei Übertragungen von Sprache im Raum und über Beschallungsanlagen aussagekräftig. Er sollte aber nicht in Situationen verwendet werden, in denen das Hintergrundgeräusch impulsförmig ist oder starke, nichtlineare Verzerrungen auftreten.

3.2.2.3 Binaurale Sprachverständlichkeitsmodelle

Die bisher beschriebenen Verfahren beziehen sich der Einfachheit halber auf monaurales Hören. Damit können Hörsituationen ausreichend gut beschrieben werden, in denen sowohl die Sprache als auch das Störgeräusch von vorn präsentiert werden. Dabei liegt an beiden Ohren der selbe SNR an, weshalb keine Vorteile bei binauralem Hören zu erwarten sind. Dies sieht anders aus, sobald die Quellen des Sprachsignals und des Störgeräuschs seitlich positioniert sind. Dann kommt es zu Pegelunterschieden an den Ohren, was zu unterschiedlichen SNRs führt. In diesem Falle erzielt man die Sprachverständlichkeit des „besseren“ Ohres. Für solche akustischen Anordnungen könnte die in der Norm DIN IEC 60268-16 (DIN, 2009) beschriebene Empfehlung, bei binauralen Aufnahmen den besseren Wert zu nutzen, sinnvoll sein.

Sind aber die Sprachsignal- und die Störgeräuschquelle räumlich getrennt, kann das Gehör die auftretenden Laufzeitunterschiede der korrelierten Störgeräusche an beiden Ohren für die effektive Reduzierung der Maskierung nutzen. So kann das Signal besser erkannt werden. Dieses Phänomen wird Binaural Masking Level Difference (BMLD) genannt. Die BMLD kann je nach Situation bis zu 15dB betragen (Moore, 2003). Eher klein fällt die BMLD aus, wenn an den Ohren unkorrelierte Störgeräusche auftreten und lediglich das Signal gerichtet von vorn (4dB) oder von der Seite (3dB) kommt (Moore, 2003).

Um diesen Vorteil des binauralen Hörens auch in den monaural ausgelegten Sprachindizes nutzen zu können, müssten diese durch Hörmodelle ergänzt werden, die diese Effekte in Betracht ziehen. Das Ergebnis der binauralen Vorverarbeitung, ein maximierter SNR, dient anschließend dem Index als Berechnungsgrundlage für die Sprachverständlichkeit. Von Beutelmann und Brand (2006) wurde ein solches Sprachverständlichkeitsmodell (Binaural Speech Intelligibility Modell, BSIM) vorgestellt. Dieses Modell basiert auf den Annahmen des SII und kombiniert diesen Sprachindex mit einer binauralen Vorverarbeitung (siehe Abbildung 3.2). Das binaurale Hören wird mit Hilfe des Equalization-Cancellation Prinzips (EC; Durlach, 1963) modelliert. Dazu werden anhand einer Gammaton-Filterbank (Hohmann, 2002) mit Mittenfrequenzen von 146 - 8346 Hz die Signale in 30 Frequenzbänder zerlegt. Der anschließende EC-Prozess nutzt die Tatsache, dass Signale aus unterschiedlichen Richtungen zu entsprechenden Pegel- und Laufzeitdifferenzen zwischen den Ohren führen. Somit werden die Signale des rechten und linken Kanals so lange gegeneinander verschoben und voneinander subtrahiert bis ein maximaler SNR zwischen Sprache und Störgeräusch entsteht. Dieser Prozess wird in jedem einzelnen Frequenzband durchgeführt. Das resultierende Signal wird danach wieder zusammengesetzt. Falls der monaurale SNR höher ist, wird dieser weiterverwendet. Am

Ende dieses binauralen Prozesses wird das resultierende Signal mit dem SII hinsichtlich seiner Sprachverständlichkeit bewertet. Dies erfolgt anhand der Ein-Drittel-Oktav-Prozedur, die in der Norm S3.5-1997 beschrieben ist (Müsch, 2001; ANSI, 1997).

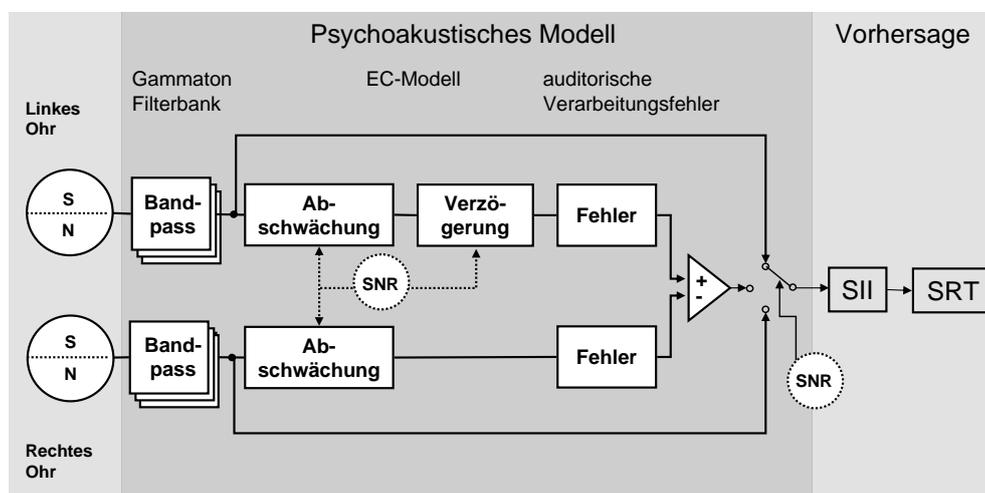


Abbildung 3.2: Binaurales Sprachverständlichkeitsmodell (BSIM) nach Beutelmann und Brand (2006).

Da das menschliche Gehör Schwankungen in der Effizienz der Auswertung binauraler Signale aufweist, wurden künstliche Verarbeitungsfehler (Vom Hövel, 1984) eingepflegt. Dies führt zu einem besseren Angleich an die empirischen Schwellen. Außerdem kann durch den Einsatz eines zusätzlichen unkorrelierten Gauß-Rauschens die individuelle Hörschwelle bei den Berechnungen berücksichtigt werden.

Van Wijngaarden und Drullman (2008) realisierten in einem deutlich pragmatischeren Ansatz einen binauralen STI. In Anlehnung an das bereits vorhandene und in Messinstrumenten implementierte Verfahren, werden die Signale des linken und rechten Kanals in Oktavbänder geteilt. Innerhalb der Bänder, in denen Laufzeitunterschiede vom Gehör ausgewertet werden können ($f_{mod} = 0.5, 1, 2kHz$), wird über Kreuzkorrelationen der Signale jeweils die maximale Modulation gesucht. Anhand dieser Eingangsgrößen wird anschließend der STI bestimmt.

3.3 Empirische Befunde zur Modellgüte

Während im Kapitel 3.2 verschiedene Berechnungsmodelle zu Sprachqualität bzw. -verständlichkeit vorgestellt wurden, soll im Folgenden Ergebnisse zu deren Modellgüte, d.h. zum Zusammenhang zwischen den modellierten und den empirischen Daten, dargestellt werden.

3.3.1 Sprachqualitätsmodelle

Die Güte der Modellierung im Falle der Sprachqualität wird anhand der Korrelation mit dem in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Mean Opinion Score (MOS) beurteilt. Generell ist der

Zusammenhang zwischen den Vorhersagen und den subjektiven Maßen der Sprachqualität nicht-linear, aber es werden hohe Korrelationen erreicht (Denisowski, 2001; Denisowski & De Rosa, 2001).

Dies zeigte sich z.B. für die Vorhersage des PESQ. Über eine Vielzahl verschiedener Situationen (verschiedene Codecs, Netze, VoIP, unterschiedliche Sprachen, mit bzw. ohne Störgeräusche sowie bekannte und unbekannte Daten) zeigte das Modell eine mittlere Korrelation von $r=.94$ (Rix et al., 2002). Für das 3Quest wurden auf Basis verschiedener Übertragungswege des Sprachsignals (z.B. Mobiltelefon, Freisprecheinrichtung) und verschiedener Störgeräusche (z.B. Kfz-Innenraumgeräusche, Büro, Cafeteria) Korrelationen in Höhe von $r>.90$ mit den subjektiven Bewertungen des Speech MOS, Noise MOS und des Global MOS berichtet (Gierlich, Kettler, Poschen & Reimes, 2008).

3.3.2 Sprachindizes

3.3.2.1 Zusammenhang mit der Sprachverständlichkeit

Bei der Veröffentlichung des STI zeigten Houtgast und Steeneken (1971), dass die Sprachverständlichkeit für niederländisches CVC-Sprachmaterial mit den Werten des STI in einem nicht-linearen Zusammenhang stehen. Die Standardabweichung der empirischen Daten lag bei ca. 6%. Zusätzlich untersuchten Steeneken und Houtgast (1980) den Zusammenhang zwischen den STI-Werten und der Sprachverständlichkeit in verschiedensten Bedingungen mit Bandbegrenzungen, Störgeräuschen (Breitbandrauschen mit verschiedenem Abfall pro Oktave), Pegelbegrenzung und Nachhall. Die Standardabweichung der empirischen Daten von den vorhergesagten Werten des STI lag bei ca. 5,6%. Lt. der Autoren entspricht dies einer mittleren Abweichung von ungefähr 1dB zwischen vorhergesagter und empirisch ermittelter Sprachverständlichkeit. Die Version des STI mit Redundanzkorrektur wurde ebenfalls anhand niederländischen CVC-Materials unter verschiedensten Testbedingungen mit Störgeräusch (Weißes Rauschen, Rosa Rauschen, Breitbandrauschen mit -12dB/Oktave oberhalb von 250Hz, sprachähnliches Rauschen), Bandbegrenzung, nicht-linearen und zeitbezogenen Verzerrungen, wie z.B. Echos, untersucht. Die STI-Werte zeigten wiederum den typischen nicht-linearen Zusammenhang mit der empirischen Sprachverständlichkeit. Die Standardabweichungen entsprachen in etwa 1-2dB und waren damit so klein, wie beim ursprüngliche STI (Steeneken & Houtgast, 2002b). Die Werte des STI erreichten somit für die spezielle Anwendung bei nicht-linearen und zeitbezogenen Verzerrungen ebenfalls eine hohe Genauigkeit.

Anderson und Kalb (1987) evaluierten den STI für englische PB-Wörter und den Modified Rhyme Test in weißem und sprachmoduliertem Rauschen. Der STI und die Sprachverständlichkeit wurde bei verschiedenen SNRs, Nachhallzeiten und Bandfilterungen untersucht. Insgesamt lag die Korrelation des STI mit der Sprachverständlichkeit (PB-Wörter) bei $r=.95$. Während es zwischen CVC-Material und STI einen fast linearen Zusammen-

hang gibt, tritt bei Verwendung eines anderen Sprachmaterials eine frühere Sättigung der Sprachverständlichkeit ein (vgl. Abbildung E.2 der DIN IEC 60268-16 (DIN, 2009)).

Van Wijngaarden und Drullman (2008) verglichen die Leistungsfähigkeit des STI und des binaural erweiterten STI in unterschiedlichen binauralen Situationen, die mittels aufgezeichneter kopfbezogener Übertragungsfunktionen (Head Related Transfer Function, HRTF) eines Kunstkopfes simuliert wurden. Dabei wurde das Sprachsignal (niederländische CVC-Worte) von vorn präsentiert und das Störgeräusch (sprachmoduliertes Rauschen) aus unterschiedlichen Richtungen dargeboten. Es zeigte sich, dass der monaurale Ansatz in den binauralen Situationen die Sprachverständlichkeit generell unterschätzt. Der binaurale STI erreicht dagegen eine hohe Vorhersagekraft. Diese ist mit einer Standardabweichung von 9,2% deutlich besser als die Vorhersage des monauralen STI (SD = 28,3%).

Morrison und Casali (1997) verglichen die Sprachverständlichkeit bei unterschiedlichen SNRs zwischen synthetisierter Sprache und Rosa Rauschen, dem Innenraumgeräusch der Fahrerkabine eines LkW bzw. dem mit Sprache gemischten Innenraumgeräusch. Es ergaben sich Korrelationen zwischen dem Articulation Index (AI) und der empirischen Sprachverständlichkeit von $r=.94$ für die untersuchten Hörgeschädigten bzw. $r=.98$ für die Normalhörenden.

Der Zusammenhang zwischen den Vorhersagen des SII und der empirischen Sprachverständlichkeit wurde bspw. von Hargus und Gordon-Salant (1995) untersucht. Die Autoren wiesen für den Zusammenhang zwischen SII und verschiedenen englischen Sprachtests einen generellen nicht-linearen Zusammenhang nach. Es zeigten sich aber deutliche Unterschiede in der Modellgüte des SII bzgl. der einzelnen Sprachverständlichkeitstests. Außerdem zeigte die Vorhersage des SII für Normalhörende in ihren Untersuchungen eine höhere Genauigkeit als für Hörgeschädigte mit Altersschwerhörigkeit.

Beutelmann und Brand (2006) untersuchten die Vorhersagegüte des, auf dem SII basierenden, binauralen Verständlichkeitsmodells (BSIM). Sie konnten für verschiedene Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnungen in Räumen mit unterschiedlichen Nachhallzeiten einen hohen Zusammenhang mit der Sprachverständlichkeit im Sprachrauschen (Oldenburger Satztest) zeigen. Die Korrelation über alle untersuchten Bedingungen lag bei $r=.95$. Dabei traten Schwankungen der Güte in Abhängigkeit der Raumbedingung und der Sprachsignal-Störgeräusch-Bedingungen auf. Auch in dieser Untersuchung waren die Vorhersagen für die Hörgeschädigten signifikant schlechter als für die Normalhörenden.

Rhebergen, Versfeld und Dreschler (2008) entwickelten eine erweiterte Variante des SII (ESII), die die Sprachverständlichkeit in fluktuierendem Störgeräusch besser vorhersagen sollte als der herkömmliche SII. In der Studie wurden vielfältigste Störgeräusche (bspw. Fahrgeräusche, Sprache, Sprachrauschen, Tiergeräusche) untersucht. Es zeigte sich wiederum ein Zusammenhang zwischen SII-Werten und der empirischen Sprachverständ-

lichkeit. Dabei lag die mittlere Korrelation für den SII bei $r=.56$, während der ESII auf eine Korrelation von $r=.94$ kam.

Wie im Kapitel 3.2 beschrieben wurde, unterscheiden sich der SII bzw. der AI und der STI in Bezug auf ihre Berechnungsmethodik. Diese Unterschiede stellten Humes, Dirks, Bell und Ahlstrom (1986) in ihrer Arbeit für den AI und den STI dar. Während der AI lediglich auf spektraler Ebene den SNR zwischen Störgeräusch und Signal betrachtet, beschreibt der STI den SNR auf Ebene der Modulationen in verschiedenen Frequenzbändern anhand der Modulationstransferfunktion (MTF). Andererseits zeichnet sich der AI dadurch aus, dass Frequenzbänder verschiedener Breite betrachtet werden können, wodurch eine genauere Beschreibung des Gesamt-SNR einschließlich besserer Gewichtung für die Sprachverständlichkeit möglich sein sollte. Die Autoren weisen als großen Vorteil des STI aus, dass er temporale Verzerrungen (z.B. Nachhall) durch die Auswertung der MTF direkt berücksichtigen kann. Im AI wurden dagegen nur auf empirischen Daten beruhende Korrekturen eingefügt. In einer retrospektiven Betrachtung verschiedener Untersuchungen konnten Humes et al. (1986) zeigen, dass der STI bessere Vorhersagen bei zeitlichen Verzerrungen macht, während der AI bei spektral verfälschter Sprache besser ist. Dieser grundlegende Unterschied der Verfahren bleibt auch nach der Ablösung des AI durch den SII in der Norm ANSI S3.5-1997 erhalten. Das Standardverfahren des SII sieht weiterhin keine Berücksichtigung der MTF vor, aber sie ist als mögliche Erweiterung beschrieben (ANSI, 1997).

Larm und Hongisto (2006) verglichen die Berechnungen des STI, des SII und des SII mit MTF für verschiedene Störgeräusch- (Rosa Rauschen) und Nachhallsituationen. Insgesamt zeigten die Berechnungen des STI und des SII mit MTF kaum Unterschiede, sodass die Autoren bezweifeln, dass überhaupt verschiedene Verfahren im Bereich der Raumakustik notwendig sind. Sehr wohl gibt es aber Unterschiede zwischen dem Standard-SII und dem SII mit MTF, sobald Nachhall auftritt. Die Autoren weisen darauf hin, dass es kaum akustische Situationen gibt, in denen dieser nicht die Sprachverständlichkeit beeinflusst und empfehlen grundsätzlich die Berechnung des SII anhand der MTF durchzuführen.

Indirekt wurde der Zusammenhang zwischen STI und AI von Bowden und Wang (2007) untersucht. Sie stellten zwei Verfahren vor, die anhand der Impulsantwort eines Raumes den STI berechneten. Zur Evaluierung der Messergebnisse verglichen sie diese mit der empirisch erhobenen Sprachverständlichkeit für PB-Wortlisten und den Modified Rhyme Test. Der Vergleich erfolgte allerdings nicht direkt, sondern sie berechneten die korrespondierende Werte des AI. Für die akustischen Situationen mit wenig Störgeräusch aber stark unterschiedlichem Nachhall, zeigten sich insgesamt Korrelationen um $r=.84$ zwischen STI und AI.

Jung et al. (2008) untersuchten die Vorhersagen des STI und des AI im Fahrgeräusch verschiedener Autos. Auf den unterschiedlichen Sitzplätzen in den Innenraumgeräuschen

unterschiedlicher Fahrzeuge wies der STI je nach verwendetem Sprachmaterial eine Korrelation von $r=.98$ bzw. $r=.99$ auf. Die Korrelationen für den AI mit den empirischen Werten lag bei $r=.84$, wobei für diese Berechnungen kein individuell gemessenes, sondern lediglich das Standardsprachspektrum aus der Norm verwendet wurde.

3.3.2.2 Zusammenhang mit der Höranstrengung

In der DIN IEC 60268-16 (DIN, 2009) ist, wie bereits im Kapitel 3.2.2.2 erwähnt wurde, der Zusammenhang zwischen der Höranstrengung und den Werten des STI dargestellt. Diese Daten entstammen einer Untersuchung von Sato et al. (2008). Die Autoren untersuchten die Sprachverständlichkeit und die Höranstrengung unter einer Vielzahl akustischer Bedingungen mit Nachhall. Die Versuchspersonen mussten die verstandenen japanischen Wörter aufschreiben und anhand einer 4-stufigen Skala (*not difficult, a little difficult, fairly difficult, extremely difficult*) die dafür benötigte Höranstrengung einschätzen. Die Höranstrengung wurde für die Auswertung als Prozentsatz negativer Bewertungen (*a little - extremely difficult*) an den Gesamtbewertungen dargestellt. Die Autoren erzielten dabei eine sehr gute Ausnutzung des Messbereichs des STI anhand der Bewertung der Höranstrengung, während die Sprachverständlichkeit bei einem STI von ca. 0.3 bereits bei 70% lag. Entsprechend lag die Korrelation zwischen Höranstrengung und den STI-Werten bei $r=-.97$.

3.4 Zusammenfassung

Sowohl die Sprachqualitätsmodelle als auch die Sprachindizes weisen hohe Korrelationen mit der jeweiligen empirischen Empfindung auf. Bei genauerer Betrachtung der Sprachqualitätsmodelle fällt aber auf, dass mit dem Mean Opinion Score (MOS) ein sehr globales Maß der Qualitätswahrnehmung gemessen bzw. modelliert wird. Zwar werden in verschiedenen Veröffentlichungen Einzelmaße als Qualitätsdimensionen erwähnt (Denisowski & De Rosa, 2001; Gierlich & Kettler, 2006), ob und wie diese genau in die resultierenden Modelle eingehen, bleibt aber unklar. Die erwähnten Verfahren sind für die Anwendung bei der Übertragung von Sprache über das Telefon entwickelt. Aufgrund der dabei auftretenden Signalveränderungen, wie Bandbreitenbegrenzung, Netzabdeckung und Störgeräuschunterdrückung ergeben sich besondere Qualitätsprobleme. Im Fahrzeug kommen zusätzlich noch Veränderungen des Signals durch die Freisprechanlage und die Anbindung im Fahrzeug hinzu. Dadurch ist der untersuchte Qualitätsbegriff sehr speziell und die Übertragbarkeit auf eine generelle Messung von Sprachqualität im Fahrzeug fraglich.

Da es bei der netzbasierten Übertragung zu den größten Qualitätseinbußen kommt, bezieht sich die Bewertung des Signals auch nur auf den Weg bis zum Ausgang dieses Systems. Die Betrachtung der Einflüsse des Störgeräuschs auf die Sprachqualität findet bis dato lediglich am Eingang statt, also wenn das Mikrofon neben Sprache auch Störge-

räusche aufzeichnet. Auch betrachten die Modelle die Hörsituation als monaural. Als einohrig kann man das Telefonieren aber nur solange betrachten, wie der Hörer an das Ohr gehalten wird. Wird das Signal im Fahrzeug über das Infotainmentsystem wiedergegeben, entsteht zum einen eine binaurale Hörsituation und zum anderen stören die Innenraumgeräusche beim Hören. Für die Betrachtung dieser akustischen Bedingung sind die Modelle weder entwickelt noch evaluiert. Darüber hinaus finden Höreinschränkungen und deren spezielle Auswirkungen auf die Qualitätswahrnehmung von Sprache keine Berücksichtigung.

Die Sprachindizes sind Modelle, die Sprachverständlichkeit erfassen sollen. Somit ist der Zusammenhang auf den ersten Blick einfach zu interpretieren: Je größer der Wert, den der Sprachindex berechnet, desto besser wird Sprache verstanden. Konkret muss aber der Zusammenhang zwischen Sprachverständlichkeit und Sprachindex über empirisch ermittelte Transformationen für unterschiedliches Sprachmaterial bestimmt werden. Diese liegen nicht für alle üblichen Sprachtests vor. Dadurch zeigen sich in Abhängigkeit des verwendeten Sprachmaterials Unterschiede in der Modellgüte. Es gibt sogar erste Hinweise darauf, dass die Sprachindizes mit der Höranstrengung eine andere Sprachqualitätsdimension besser beschreiben als die Sprachverständlichkeit.

Die Sprachindizes sind in einer Vielzahl akustischer Bedingungen untersucht, wobei sich zeigte, dass deren Vorhersagegüte von verschiedenen Faktoren abhängt. Als wichtige Einflussgrößen auf die Modellgüte kristallisierten sich Modulationen (Unregelmäßigkeiten im Störgeräusch, zeitbezogene Veränderungen des Sprachsignals, raumakustische Eigenschaften, wie Reflexionen und Nachhall) und das Hörvermögen heraus. In Bezug auf die Spektren der Signale sind ebenfalls rigide Festlegungen (flaches Spektrum, keine scharf gefilterten Bänder etc.) bzgl. der Gültigkeit der Indizes gemacht. Durch verschiedene Modellerweiterungen konnte die Vorhersage bzgl. einzelner Einflussparameter verbessert werden.

Die Sprachindizes sind nur für monaurale Hörbedingungen ausgelegt. Die Diskrepanzen zur empirischen Sprachverständlichkeit in natürlichen Situationen wurden in vielen Untersuchungen dadurch umgangen, dass diese direkt nur monaural aufgezeichnet und per Kopfhörer wiedergegeben wurden (u.a. Houtgast & Steeneken, 1971; Anderson & Kalb, 1987; Hargus & Gordon–Salant, 1995; Rhebergen et al., 2008). Mit dem BSIM und dem binauralen STI stehen die ersten binauralen Sprachverständlichkeitsmodelle zur Verfügung. Für klar definierte binaurale Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnungen in Räumen mit unterschiedlichem Nachhall und bei verschiedenen SNRs haben sie ihre generelle Tauglichkeit zur Vorhersage der binauralen Sprachverständlichkeit nachgewiesen.

4. Fragestellung und Übersicht der empirischen Untersuchungen

In der vorliegenden Arbeit soll eine Möglichkeit gefunden werden, die Qualität der Hörsituation im Fahrzeug zu messen. In der Tabelle 4.1 sind die erforderlichen Aufgaben und empirischen Untersuchungen dargestellt, die sich anhand der in Kapitel 2 und 3 dargestellten Inhalte ableiten lassen.

Grundsätzlich stören Geräusche die Sprachwahrnehmung, wobei das Ausmaß vom Pegel und Spektrum des Signals und des Störgeräuschs abhängt. Dies gilt auch im Fahrzeug, wo die Innenraumgeräusche die Sprach- bzw. Kommunikationsqualität einschränken. Unklar ist, welche Hörbedingungen im Fahrzeug genau auftreten. Deshalb wird im ersten Schritt (Kapitel 5) eine Datenbank mit den Sprachsignalen und Störgeräuschen aus den Fahrzeugen der Audi AG erstellt. Dafür werden unterschiedliche Sprachübertragungswege (Insassenkommunikation, Entertainment, Navigation usw.) und Fahrbedingungen (Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit usw.) an verschiedenen Sitzplätzen (Fahrer, Beifahrer, Rückbank) aufgezeichnet und deren Auswertung dargestellt.

Zur Messung der Qualität einer Hörsituation haben sich verschiedene Ansätze entwickelt. In dieser Arbeit soll der zentralen Bedeutung der Sprachverständlichkeit für die Qualitätswahrnehmung durch die Anwendung der Sprachindizes Rechnung getragen werden. Auf Basis der Ergebnisse einzelner empirischer Untersuchungen (Morrison & Casali, 1997; Jung et al., 2008) ist zu erwarten, dass die Bestimmung der Sprachverständlichkeit anhand der Sprachindizes auch im Fahrzeug möglich ist. Die unterschiedliche Modellgüte der Sprachindizes für verschiedene akustische Bedingungen lässt aber eine systematische Untersuchung im Fahrzeug notwendig erscheinen. Unter anderen akustischen Bedingungen konnte gezeigt werden, dass binauraler Sprachindizes eine bessere Vorhersage der Sprachverständlichkeit erzielen als der monaurale Ansätze (Beutelmann & Brand, 2006; Van Wijngaarden & Drullman, 2008). So soll zusätzlich die Modellgüte der monauralen Sprachindizes und eines binauralen Modells im Kfz untersucht werden. Dazu werden in den Kapiteln 6 und 7 empirische Untersuchungen dargestellt, in denen die Sprachverständlichkeit von Versuchspersonen mit den Vorhersagen der Sprachindizes verglichen werden.

Zur vollständigen Beschreibung der Qualität der Hörsituation reicht die Sprachverständlichkeit aufgrund ihrer frühen Sättigung nicht aus (Morimoto et al., 2004; Sato et al., 2005, 2008; Sust et al., 2009). Deshalb soll ein mehrdimensionales Konzept untersucht werden, welches trotz hoher Sprachverständlichkeit noch Unterschiede der Hörsituation messen kann. Für die Beurteilung der Hörsituation im Fahrzeug scheint das Konstrukt Kommunikationsqualität angebracht zu sein. Es richtet seine Qualitätsbeurteilung neben der Sprachverständlichkeit an der Bewertung des Hörers bzgl. der geforderten Konzen-

Tabelle 4.1: Überblick über die Fragestellung und die empirischen Untersuchungen dieser Arbeit.

Fragestellung	Durchführung	Kapitel der Arbeit
Systematische Darstellung der akustischen Situation im Kfz	Erstellung einer Datenbank mit den Störgeräuschen und Sprachsignalen aus den Fahrzeugen der Audi AG	Datenbank zur Beschreibung der akustischen Bedingungen im Fahrzeug
Modellgüte der Sprachindizes im Kfz	empirische Erhebung der Sprachverständlichkeit und Vergleich mit den Vorhersagen der Indizes an-hand der Datenbank	Experiment 1 und 2
Zusammenhang zwischen den Sprachindizes und der Kommunikationsqualität im Kfz	empirische Erhebung der Kommunikationsqualität und Betrachtung des Zusammenhangs mit den Vorhersagen der Indizes anhand der Datenbank	Experiment 3

tration und der erlebten Belästigung in der Situation aus. Eine möglichst geringe mentale Belastung ist für die Kommunikation im Kfz von wesentlicher Bedeutung, weil alle Komfortfunktionen dem sicherheitsrelevanten Führen des Fahrzeugs untergeordnet sein sollten (DIN, 2007).

Aufgrund erster empirischer Ergebnisse (Sato et al., 2008) ist davon auszugehen, dass die Sprachindizes auch mit der subjektiven Bewertung der Hörsituation zusammenhängen. Deshalb wird im Kapitel 8 schließlich untersucht, ob sich im Fahrzeug ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Kommunikationsqualität und den Sprachindexwerten ergibt.

5. Datenbank zur Beschreibung der akustischen Bedingungen im Fahrzeug

In den vorherigen Kapiteln wurden die Grundlagen der Sprachverständlichkeit, die Messinstrumente und Ergebnisse zu deren Vorhersagegüte dargestellt. Es wurde gezeigt, dass die meisten Untersuchungen der Sprachindizes von klar definierten und einfachen Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnungen ausgegangen sind und zum Großteil in Hörkabinen oder mit Kopfhörern stattfanden. Als Störgeräusch wurde im Allgemeinen verschieden definiertes Sprach- und Breitbandrauschen genutzt. Für die Anwendung im Fahrzeug liegen dagegen nur vereinzelte wissenschaftliche Untersuchungen vor. Deshalb sollen im Folgenden zuerst die Besonderheiten der Hörsituation in einem Kfz dargestellt werden.

Wie bereits im Kapitel 2 beschrieben, ist die Sprachverständlichkeit abhängig vom Sprachsignal-Störgeräusch-Abstand (SNR). Beide bestimmenden Größen sind im Fahrzeug variabel, sodass im Anschluss zuerst die Besonderheiten des Störgeräuschs und danach die des Sprachsignals beleuchtet werden.

Anhand dieser Betrachtung sollen Wirkgrößen abgeleitet werden, die anschließend systematisch gemessen und in einer Datenbank zusammengefasst werden können. Die Aufnahmen aus dieser Datenbank dienen der Analyse und der Beschreibung der akustischen Bedingungen im Fahrzeug. Außerdem werden sie in den nachfolgenden empirischen Untersuchungen zur Sprachverständlichkeit und der Modellgüte der Sprachindizes eingesetzt (siehe Kapitel 6 und 7). Die Auswertungen der Aufnahmen können außerdem der Interpretation der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen dienen.

5.1 Die Hörsituation im Fahrzeug

5.1.1 Die Störgeräuschsituation im Fahrzeug

Das Innenraumgeräusch im Kfz besteht aus einer Mischung aus Roll- und Motorgeräusch und externen Geräuschquellen. Durch die enorme Variabilität der Situationen und Zustände, in denen sich das Fahrzeug befinden kann (siehe Abbildung 5.1), wird die akustische Situation sehr komplex. Die Geschwindigkeit ist ein wichtiger Einflussfaktor, der aufgrund der Mannigfaltigkeit seiner Auswirkungen (Roll-, Motor und Windgeräusche) die Innenraumgeräusche erfahrungsgemäß stark verändert. Weitere Einflussgrößen sind die Fahrbahn bzw. die Fahrbahnbeschaffenheit und die Witterung, die vor allem die Rollgeräusche des Fahrzeugs verändern. Kabinenzustand und Verkehrslage verändern aufgrund externer Störquellen bzw. der Windgeräusche ebenfalls die akustischen Bedingungen im Innenraum. Außerdem bestimmt die Motorisierung die Charakteristik des Moto-



Abbildung 5.1: Darstellung der Störgeräuschsituation im Fahrzeug. Die untersuchten Wirkgrößen sind in schwarz dargestellt, die nicht berücksichtigten bzw. konstant gehaltenen sind kursiv gesetzt und grau.

rengeräuschs, welches in den Innenraum übertragen wird. Die Baureihe und damit die Größe bzw. die Ausstattung des Innenraums beeinflussen die Akustik des Innenraums bzw. Unterschiede in Abhängigkeit des Sitzplatzes des Hörers.

In der Abbildung 5.1 sind diese Wirkgrößen in Bezug auf die Störgeräusche in schwarz dargestellt. Zur Reduzierung des Umfangs an Messbedingungen wurde die Untersuchung bzw. die Auswertung auf einige wichtige Einflüsse beschränkt.

5.1.2 Darstellung des Signalübertragungswegs im Fahrzeug

Die Nachrichtentechnik teilt den Signalübertragungsweg üblicherweise in Quelle, Übertragung und Senke. Anhand dieser Unterteilung können Unterschiede im Sprachsignal sehr systematisch dargestellt werden. Wie in der Abbildung 5.2 dargestellt, dienen im Fahrzeug Navigation, Telefon und Entertainmentsystem als Quellen. Außerdem finden Gespräche zwischen den Insassen statt, sodass die Sprecher ebenfalls als Signalquelle aufgefasst werden können.

Im Fahrzeug treten bereits hier erste Variationen im Signal auf, z.B. aufgrund der Nutzung unterschiedlicher Datenträger (CD, DVD...) bzw. Datenformate (wma, mp3...) im Entertainmentsystem und schwankender Signalstärken bei Telefon, Radio und Fernsehen. Das Navigationssystem enthält neben natürlichen Sprachinhalten inzwischen auch synthetische, die sich z.T. deutlich hörbar voneinander unterscheiden. Außerdem unterscheidet sich das Sprachsignal u.a. in Abhängigkeit des Geschlechts und der Sprechweise

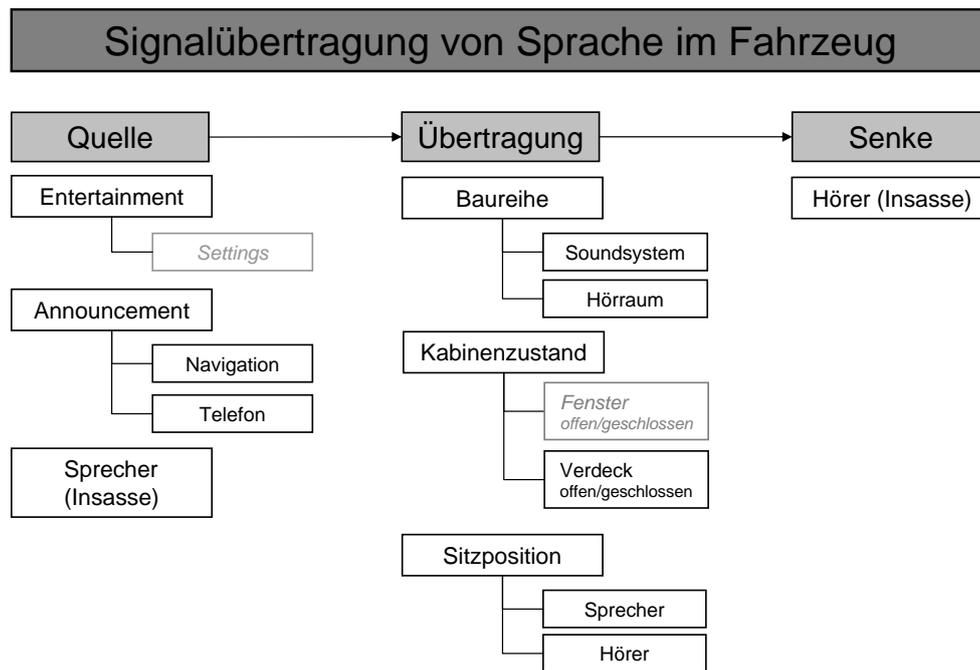


Abbildung 5.2: Der Signalübertragungsweg im Fahrzeug. Die untersuchten Wirkgrößen sind in schwarz dargestellt, die nicht berücksichtigten bzw. konstant gehaltenen sind kursiv gesetzt und grau.

des Sprechers. Diese Aspekte liegen allerdings nicht im Fokus der Arbeit, deshalb wird die Untersuchung auf die nachfolgend dargestellten, auf das Soundsystem bezogenen Unterschiede der Quellen beschränkt.

Die elektroakustische Wandlung des Sprachsignals erfolgt im Kraftfahrzeug durch das Soundsystem, welches, wie in der Abbildung 5.3 gezeigt, aus einer Komposition verschiedener Lautsprecher besteht. Die Übertragung der Signale wird durch unterschiedliche Konfigurationen der Soundsysteme, wie Anzahl der Lautsprecher und die Abstimmung (Tuning) des digitalen Verstärkers bestimmt, der eine komplexe Signalverarbeitung beinhaltet. Außerdem unterscheiden sich die Entertainment- und die Announcmentwiedergabe (Navigation und Telefon) hinsichtlich der zur Wiedergabe genutzten Lautsprecherkonstellationen und der Tunings. Unberücksichtigt bleiben in den Betrachtungen die diversen Soundsettings, mit denen die Wiedergabe für einzelne Sitzplätze optimiert und verschiedene Raumakustiken (Stereo, Surround, 5.1) dargestellt werden können.

Natürlich beeinflusst auch der Hörraum „Kfz“ die Übertragung der Sprache. In einer ersten Näherung kann man die akustischen Gegebenheiten im Innenraum eines Kfz aus den bekannten Gesetzmäßigkeiten der Raumakustik ableiten. In diesem Sinne wäre das Fahrzeug ein Spezialfall eines kleinen Raumes. Dort hängt die Wahrnehmung eines Signals vom Direktschall und dessen Reflexion und Absorption ab. Im Kfz wechseln sich sehr stark absorbierende Flächen, wie Sitze und verkleidete Karosserieteile mit stark reflektierenden Flächen, wie Front-, Heck- und Seitenscheiben und dem Armaturenbrett ab. Dadurch kommt es zu Überhöhungen und Auslöschungen einzelner Anteile des Signals

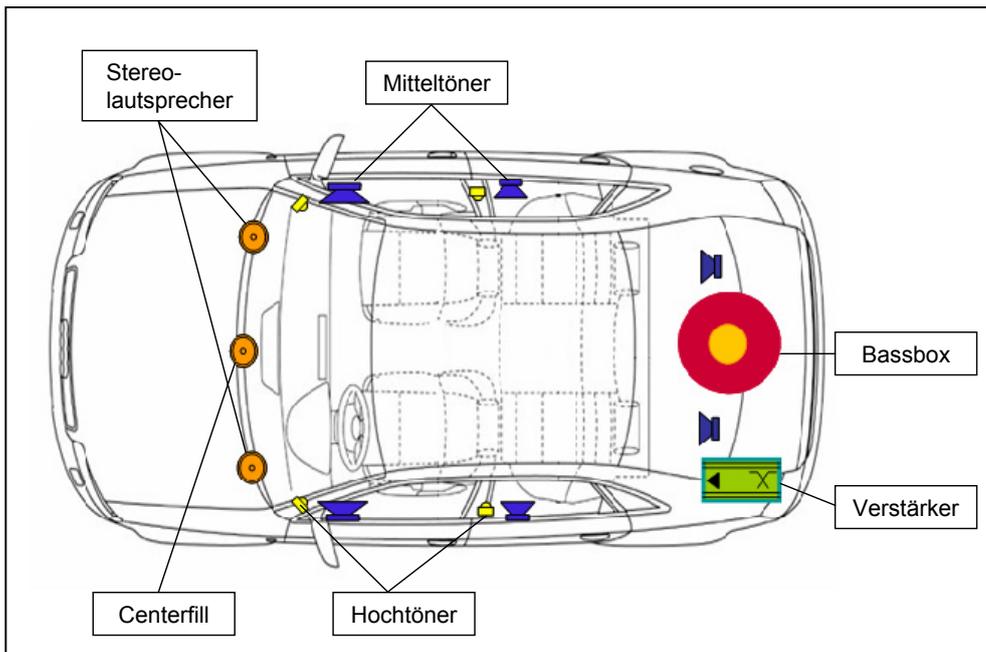


Abbildung 5.3: Beispiel für ein Soundsystem der Audi AG in einer Mittelklasse Limousine.

im hörbaren Bereich (Meroth, 2008). Diese Auswirkungen auf das Sprachsignal unterscheiden sich, je nachdem welches Fahrzeug in welchem Kabinenzustand mit welcher Ausstattung betrachtet wird und auf welchem Sitzplatz sich die Hörer bzw. die Hörer und Sprecher befinden.

Die Eigenschaften der Senke, hier der Insassen, hängen nicht mit den Fahrzeugparametern zusammen. Aber die Hörschwelle wird in den folgenden empirischen Untersuchungen (siehe Kapitel 6 und Kapitel 8) aufgrund ihres großen Einflusses auf die Wahrnehmung (vgl. Kapitel 2.2) berücksichtigt.

5.1.3 Die binaurale Hörsituation im Fahrzeug

Betrachtet man die Sprachverständlichkeit über die monaurale Annahme der Sprachindizes hinaus als binauralen Prozess, hängt diese auch von der räumlichen Verteilung der Signal- und Störgeräuschquellen ab. Wie im Kapitel 3.2.2.3 beschrieben, führt dies zu Pegel- und Laufzeitunterschieden an den Ohren des Hörers und einer Verbesserung der Sprachverständlichkeit bei beidohrigem Hören. Hier lassen sich im Innenraum ebenfalls binaurale Einflüsse vermuten, weil die Sprache in Bezug auf die einzelnen Sitzpositionen über asymmetrisch verteilte Lautsprecher wiedergegeben wird. Aufgrund der Reflexionen im Innenraum und den verschiedenen Lautsprecheranordnung ist anzunehmen, dass es in Abhängigkeit von Signalquelle, Baureihe, Ausstattung, Kabinenzustand und Sitzplatz des Hörers zu Unterschieden bzgl. der Pegel und der Laufzeit an den Ohren kommt.

5.1.4 Zusammenfassung

An den vorangegangenen Darstellungen ist zu erkennen, dass ein Modell zur Berechnung der Sprachverständlichkeit im Kfz in einer großen Anzahl an akustischen Situationen funktionieren muss, um im Automotive-Bereich sinnvoll einsetzbar zu sein. Zusätzlich kommt es zu Überschneidungen zwischen den Auswirkungen auf Sprachsignal und Störgeräusch. Zum Beispiel beeinflusst die Baureihe zum einen die Innenraumgeräusche und zum anderen durch das Soundsystem und den Hörraum für die Übertragung des Sprachsignals. Auch in Bezug auf den Sitzplatz und den Kabinenzustand sind Auswirkungen sowohl auf das Sprachsignal und als auch das Störgeräusch zu erwarten.

Im Verlauf dieser Arbeit soll eine Aussage über die Messgenauigkeit der Sprachindizes im Kfz abgeleitet werden, die auf einer möglichst breiten Auswahl an möglichen Hörsituationen beruht. Deshalb wird im Anschluss die Erstellung einer Datenbank akustischer Bedingungen anhand der gezeigten Wirkgrößen beschrieben und die Ergebnisse der Auswertung der Aufnahmen dargestellt.

5.2 Erstellung der Datenbank

5.2.1 Binaurale Aufnahmen

Es erfolgten binaurale Aufnahmen der Sprachsignale und Störgeräusche mit einem Kunstkopfmesssystem bzw. mit Innenohrmikrofonen. Der Vorteil binauraler Aufnahmen gegenüber denjenigen mit einem einfachen Mikrofon liegt darin, dass dadurch die akustischen Informationen zu Pegel- und Laufzeitunterschieden an den Ohren in den Aufnahmen enthalten sind. Diese sogenannten Head Related Transfer Functions (HRTFs) ermöglichen dem Hörer auch bei der Wiedergabe der Aufnahmen über Kopfhörer, die binauralen Informationen im Signal zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit zu nutzen. Damit erreicht man in empirischen Untersuchungen unter Laborverhältnissen und bei der Modellierung der Sprachverständlichkeit eine bessere Anpassung an die natürlichen Hörverhältnisse.

Kunstköpfe stellen einen wissenschaftlichen und industriellen Standard für diese binauralen Aufnahmen dar. Der Vorteil der Kunstköpfe gegenüber Aufnahmen mit Innenohrmikrofonen besteht in der definierten Geometrie des Kopf- und Schulterbereiches und des Außenohres (siehe Abbildung 5.4). Die Aufnahmen werden dadurch replizier- und vergleichbar und werden deshalb im Allgemeinen in empirischen Untersuchungen verwendet. Da die Inhalte der Datenbank in anschließenden Experimenten eingesetzt werden sollten, wurde für einen Großteil der Aufzeichnungen ein Kunstkopf genutzt.

Für die Aufnahmen während der Fahrt auf dem Fahrerplatz musste eine andere Möglichkeit zum binauralen Messen gefunden werden. Als Alternative wurden Innenohrmikrofone in die Gehörgänge des Fahrers eingesetzt. Diese Aufnahmen haben den Nachteil,

dass sie die individuelle Charakteristik der Geometrie des Kopf- und Schulterbereiches und des Außenohres des Fahrers beinhalten.

Die beiden verwendeten Messsysteme werden nachfolgend genauer beschrieben.

5.2.1.1 Innenohrmikrofone - Soundman Originalkopf-Mikrofone

Die Aufzeichnungen auf dem Fahrersitz erfolgten mit den Originalkopf-Mikrofonen (OKM) der Firma Soundman. Die eingebauten Mikrofone sind Elektretmikrofone mit Kugelcharakteristik, deren Übertragungsbereich zwischen 20Hz und 20kHz liegt.

Die Innenohrmikrofone wurden vom Fahrer entsprechend ihrer Kennung im linken bzw. rechten Gehörgang getragen. Das Signal wurde mit einer Samplingfrequenz von 44.1kHz über die externe Soundkarte Fast Track Pro (M-Audio) in den Aufzeichnungs-PC eingespeist. Die Aufzeichnung und die Speicherung der Dateien im hdf-Format erfolgte mit dem Head Recorder (Head Acoustics).

5.2.1.2 Kunstkopf - Head Acoustics Head Measurement System III

Als Kunstkopfmesssystem wurde das Head Acoustics Head Measurement System (HMS) III genutzt. Die Richtcharakteristik des HMS III entspricht der strukturgemittelten Richtcharakteristik des menschlichen Außenohres nach IEC 959. Im Gehörgang des Kunstkopfes sind 1/2 Zoll Kondensatormikrofone eingebaut, deren Übertragungsbereich zwischen 20Hz und 20kHz liegt. Der Kunstkopf wurde per USB-Kabel mit dem Aufzeichnungs-PC verbunden. Am Computer wurden folgende Einstellungen für die Aufnahmen der Sprachsignale und Störgeräusche am HMS III vorgenommen: Die Samplingfrequenz wurde auf 44.1kHz und die Auflösung auf 24bit eingestellt. Der Messbereich wurde auf einen Maximalpegel von 114 dB ausgerichtet. Außerdem war der Hochpassfilter 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 20Hz eingeschaltet, um Störungen unterhalb des hörbaren Bereichs auszublenden. Als Entzerrung wurde *independent of direction* (ID) gewählt, weil das akustische Feld im Fahrzeug weder eine Freifeldbedingung noch ein Diffusfeld darstellt. Die Aufnahmen wurden ebenfalls mit dem Head Recorder (Head Acoustics) getätigt und auf dem PC im hdf-Format abgespeichert.

5.2.2 Erzeugung der Sprachsignale

Sowohl die Auswertungen der Aufnahmen der verschiedenen Sprachübertragungswege als auch die folgenden empirischen Untersuchungen basieren auf dem Sprachmaterial des Oldenburger Satztests (OLSA, Wagener et al., 1999b; Wagener, Brand & Kollmeier, 1999c; Wagener et al., 1999a). Die ausführliche Beschreibung des Satzmaterials des OLSA erfolgt entsprechend im Kapitel 6.2.2.2 dieser Arbeit.

Auf die direkte Wiedergabe und Aufnahme des gesamten Sprachmaterials im Fahrzeug wurde aus Zeitgründen verzichtet. Stattdessen wurden sogenannte Impulsantworten des Übertragungswegs bis zum Kunstkopf am Hörerplatz gemessen. Dadurch konnte die



Abbildung 5.4: Versuchsaufbau für die Aufzeichnungen von Innenraumgeräuschen und Sprachwiedergabe auf dem Beifahrerplatz im Fahrzeug.

benötigte Zeit für die Messungen von ca. 28 auf ca. 7 Stunden reduziert werden. Für die Messung der Impulsantworten wurden Dirac-Impulse als Eingangssignale in die Quellen eingespeist, im Fahrzeug wiedergegeben und mit dem HMS III, wie im Kapitel 5.2.1 beschrieben, aufgezeichnet (siehe Abbildung 5.5a). Die Aufnahmen wurden mit Head Acoustics Artemis 9.0 verarbeitet und als mat-Files exportiert. Das Programm MATLAB (MathWorks) wurde genutzt, um die 30 aufgezeichneten Impulsantworten zu mitteln und anschließend mit dem Sprachmaterial des OLSA im Zeitbereich zu falten. Durch diese Faltung „prägt“ man dem Sprachsignal die lineare Übertragungsfunktion des akustischen Systems auf. Mathematisch betrachtet entspricht das resultierende Signal demjenigen, welches man beim direkten Aufzeichnen der akustischen Situation bei mittleren Pegeln erhalten würde. Die Impulsantwort wurde für alle Quellen gemessen, lediglich die Sprachsignale über Telefon wurden anders erzeugt, da in diesem Fall der nicht-lineare Anteil der Übertragungsfunktionen nicht mehr zu vernachlässigen ist (siehe Kapitel 5.2.2.2).

5.2.2.1 Insassenkommunikation

Für die Simulation der Gespräche zwischen Insassen (Insassenkommunikation) wurde ein weiterer Kunstkopf (HMS II.6) als Sprecher auf dem Fahrerplatz verwendet (siehe Abbildung 5.5b). Dieser Kunstkopf besitzt neben Ohren auch einen künstlichen Mund.

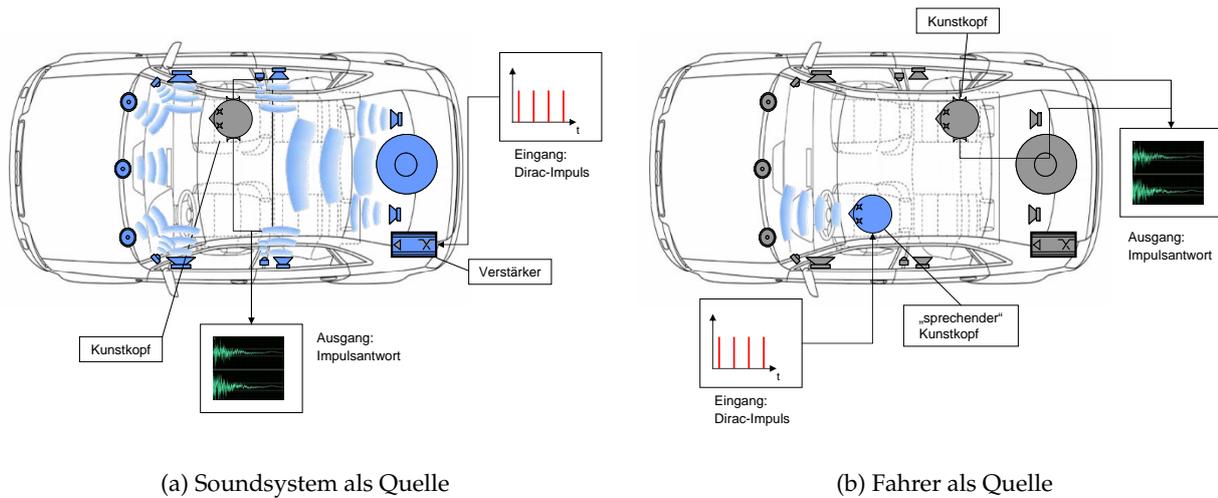


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Aufzeichnung der Impulsantworten der Sprachübertragungswege im Kfz.

Darüber kann er ein Signal wie ein Sprecher gerichtet wiedergeben. Er wurde über USB an einen PC angeschlossen und die Dirac-Impulse über dessen Mund im Fahrzeug wiedergegeben. Die Messung der Impulsantworten erfolgte wie im Kapitel 5.2.1 beschrieben.

5.2.2.2 Telefon

Die Wiedergabe über das Telefon wurde nicht mit dem o.g. Verfahren aufgezeichnet, weil dieser Übertragungsweg nicht linear ist und somit keine reliable Messung der Impulsantwort zu erwarten war. Deshalb wurde ein Telefonanruf ins Fahrzeug (Downlink) simuliert. Dazu wurden 30 zufällig ausgewählte Original-Sätze und das Sprachrauschen aus dem OLSA vom PC direkt über einen Telefonnetz-Simulator (R&S CMU 200) im Fahrzeug wiedergegeben. Dadurch wurden neben dem Übertragungsweg im Fahrzeug die Signalveränderungen durch das Telefon, die Übertragung im Telefonnetz und die Freisprechanlage nachgebildet. Die Sätze wurden im Fahrzeug wie im Kapitel 5.2.1 dargestellt.

5.2.3 Versuchsplan

Die Störgeräuschaufnahmen wurde auf die Wirkgrößen *Geschwindigkeit*, *Baureihe* und *Sitzplatz* beschränkt. In der Tabelle 5.1 sind die aufgezeichneten Bedingungen dargestellt und mit Symbolen diejenigen gekennzeichnet, die in die nachfolgenden Auswertungen einbezogen wurden. Konstant gehalten wurden folgende Einflüsse: Die dargestellten Aufnahmen wurden auf trockener Teerstraße (kein Niederschlag) ohne weiteren Verkehr („Ruhe“) bei geschlossenem Fenster (Kabinenzustand) durchgeführt (vgl. Abbildung 5.1).

Tabelle 5.1: Darstellung aller aufgenommenen (grau hinterlegt) und der ausgewerteten Störgeräuschbedingungen (mit Symbol gekennzeichnete Wirkgrößen). Die Sitzplätze wurden entsprechend ihrer Position im Fahrzeug abgekürzt: VL = Fahrersitz, VR = Beifahrersitz, HR = Rückbank/Font rechte Seite.

Geschwindigkeit	50 km/h			100 km/h			150 km/h			180 km/h			Wirkgröße
	VL	VR	HR	VL	VR	HR	VL	VR	HR	VL	VR	HR	
Baureihe													
Mittelklasse Kombi	◆			◆			◆+	+	+	◆			◆ Geschwindigkeit + Sitzposition
SUV	◆			◆			◆+	+	+	◆			◆ Geschwindigkeit + Sitzposition
Kleinwagen							◆						
Mittelklasse Limousine							◆						
Coupé							◆						
Mittelklasse Cabrio zu							◆*						
Mittelklasse Cabrio auf							*						
Oberklasse Kombi							◆						
Oberklasse Limousine							◆						
Wirkgröße													◆ Karosserie (Baureihe) * Karosserie (Kabinenzustand)

Um Unterschiede zwischen den Sitzplätzen darstellen zu können, wurden Aufnahmen auf dem Fahrerplatz (vorne links, VL), dem Beifahrerplatz (vorne rechts, VR) und auf der rechten Seite der Rückbank (hinten rechts, HR) gemacht. Als Synonym für die Rückbank wird auch der Begriff Font gebraucht.

Die Geschwindigkeit wurde von 50km/h (Ortsfahrten) über 100km/h (Überland), 150km/h (Autobahn) bis 180km/h (schnelle Autobahnfahrt) variiert.

Die untersuchten Fahrzeuge bzw. Baureihen sind ebenfalls der Tabelle 5.1 zu entnehmen. Als spezieller Fall wurden Aufnahmen in einem Cabriolet mit offenen bzw. geschlossenem Verdeck zur Untersuchung des Einflusses des Kabinenzustands gemacht.

Die Aufzeichnung der Sprachsignale wurde ebenfalls aufgrund der Mannigfaltigkeit der Einflüsse auf einige wenige beschränkt. Konstant gehalten wurden folgende Größen (vgl. Abbildung 5.2): Als Soundsetting wurde, so vorhanden, „Alle“, d.h. eine optimale Wiedergabe für alle Sitzplätze gewählt. Die Fenster wurden geschlossen gehalten (Kabinenzustand). Der jeweilige Übertragungsweg der untersuchten Bedingungen ist der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Zur Untersuchung der Quellen wurden Aufnahmen des Entertainmentsystems, der Navigation, des Telefons und eines Sprechers auf dem Fahrersitz gemacht. Als Sitzplätze wurden der Beifahrersitz (VR) und die Rückbank (HR) bzw. in einem SUV die zweite (HR) bzw. dritte (3. Reihe) Sitzreihe variiert. Auf Aufnahmen der Sprachsignale auf dem Fahrersitz wurde verzichtet, da an diesem Platz keine vergleichbaren Störgeräuschaufnahmen mit dem Kunstkopf und somit empirische Untersuchungen nur an den anderen Plätzen im Fahrzeug möglich waren.

Tabelle 5.2: Darstellung aller aufgenommenen (grau hinterlegt) und der ausgewerteten Sprachsignale (mit Symbol gekennzeichnete Wirkgrößen). Die Sitzplätze wurden entsprechend ihrer Position im Fahrzeug abgekürzt: VL = Fahrersitz, VR = Beifahrersitz, HR = Rückbank/Font rechte Seite.

Quelle	Entertainment		Telefon		Navigation		Fahrer spricht			Wirkgröße	
Sitzplatz	VR	HR	VR	HR	VR	HR	VR	HR	3.Reihe		
Baureihe											
Mittelklasse Kombi	◆ +	* +						*			* Quelle (Sprecher) + Sitzposition
SUV	◆ +	+						*	*		+ * Sitzposition
Coupé	◆										
Mittelklasse Cabrio zu	◆										
Mittelklasse Cabrio auf	*										
Oberklasse Kombi	◆ * +	+	*			*					* Quelle (Systeme) + Sitzposition
Wirkgröße	◆ Karosserie (Baureihe) * Karosserie (Kabinenzustand)										

Die untersuchten Baureihen sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen. Auch hier wurde zusätzlich ein Cabriolet mit offenem und geschlossenem Verdeck untersucht.

5.2.4 Durchführung

5.2.4.1 Aufnahme der Innenraumgeräusche

Alle Aufnahmen wurden auf dem Prüfgelände der Audi AG in Neustadt a.d. Donau durchgeführt. Der Kunstkopf wurde auf dem Beifahrersitz so platziert, dass dessen Mikrofone 20 cm vom Dachhimmel und 80 cm vom Armaturenbrett entfernt waren (siehe Abbildung 5.4). Für die Aufnahmen auf dem Fahrerplatz wurde der Sitz so so eingestellt, dass die Mikrofone im Gehörgang des Fahrers die selbe Position hatten, wie die Mikrofone des Kunstkopfes. Um möglichst gut vergleichbare Aufnahmen zu erhalten, hatte der Fahrer die Anweisung, seinen Kopf während der Aufzeichnungen mit den Innenohrmikrofonen nicht zu bewegen. Auf der Rückbank wurde der Kunstkopf auf dem rechten Sitz in die normale Sitzposition gebracht. Er wurde so eingestellt, dass der Abstand der Mikrofone zur Decke ebenfalls 20 cm betrug. Der Versuchsleiter saß hinter dem Fahrer und bediente die Aufzeichnungshard- und software. Die Aufzeichnung startete, wenn der Fahrer verbal das Erreichen der aufzuzeichnenden Situation anzeigte und erfolgte für jeweils mindestens 60 Sekunden. Jede Aufnahme wurde zweimal wiederholt und abgespeichert.

5.2.4.2 Aufnahme der Sprachsignale

Die Sprachaufnahmen erfolgten im Soundlabor der Audi AG in Ingolstadt. Die Aufzeichnung der Impulsantworten bzw. Sätze (Telefon) erfolgte mit dem Kunstkopf entweder auf dem Beifahrersitz (VR), im Font (HR) oder, sofern vorhanden, in der dritten Sitz-

reihe der Fahrzeuge. Nach Aufbau der Messbedingung verließ der Versuchsleiter das Fahrzeug und schloss dessen Türen und Fenster. Der Versuchsleiter hielt sich während der Messungen außerhalb des Fahrzeugs auf und bediente die Aufzeichnungshard- und software. Während der Aufzeichnung herrschte absolute Ruhe im Raum. Es wurden 30 Impulsantworten pro Bedingung gemessen und abgespeichert.

5.2.5 Datenaufbereitung

Die Aufzeichnungen der Innenraumgeräusche wurden im Regieraum des Soundlabors der Audi AG mit Head Acoustics Artemis 9.0 abgespielt und Störungen in den Aufnahmen entfernt. Anschließend wurden sie auf eine Länge von 60 Sekunden zugeschnitten und im wav-Format und als mat-Datei exportiert und strukturiert archiviert.

Die Impulsantworten wurden in Head Acoustics Artemis 9.0 eingelesen und als mat-Files exportiert. In MathWorks MATLAB wurden sie geschnitten und gemittelt, um Echoeffekte zu reduzieren und möglichst rauschfreie Signale zu erhalten. Anschließend wurde das Sprachrauschen und die Sätze des OLSA mittels in MathWorks MATLAB implementierter Funktionen mit den Impulsantworten im Zeitbereich gefaltet. Die resultierenden Signale wurden im mat- und wav-Format strukturiert archiviert.

5.2.6 Datenauswertung

Die Sprachverständlichkeit hängt, wie im Kapitel 2 beschrieben, vom Spektrum des Sprachsignals, des Störgeräuschs und deren SNR im sprachrelevanten Frequenzbereich ab. Darüber hinaus wurde im Kapitel 3.2.2.2 dargestellt, dass die Sprache typische Modulationen enthält, die ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Verständlichkeit leisten. Auch Fluktuationen im Störgeräusch (siehe Kapitel 2.1) und bestimmte räumliche Anordnungen der Sprach- und Störgeräuschquellen können die Sprachverständlichkeit aufgrund von Laufzeit- und Pegelunterschieden an den Ohren verbessern (siehe Kapitel 3.2.2.3). Die Genauigkeit der Berechnung der Indizes hängt, wie in Kapitel 3 ausgeführt, vom Frequenzspektrum der Signale sowie von Modulationen im Sprachsignal und im Störgeräusch ab.

Entsprechend werden die Aufnahmen hinsichtlich ihres Pegels, ihres Frequenzspektrums und der Modulationen im Zeitbereich betrachtet. Zur Betrachtung der binauralen Aspekte in den Aufzeichnungen werden die Pegeldifferenzen zwischen den Ohren genutzt. Die Auswertung erfolgte mit verschiedenen Skripten in MathWorks MATLAB.

5.2.6.1 Frequenzspektren

Die Frequenzspektren sind Langzeitspektren der Aufnahmen, die über 1/3-Oktaven geglättet wurden. Wenn nichts anderes ausgewiesen ist, wird das Frequenzspektrum des linken Ohres dargestellt. Es ist das Spektrum von 20Hz bis 20kHz dargestellt. Die Abbildungen der Sprachsignale basieren auf dem Frequenzspektrum des Sprachrauschens des

OLSA, welches dem Langzeitspektrum aller Sätze entspricht (Wagener et al., 1999a). Die Auswertung erfolgte analog zu den Störgeräuschen.

5.2.6.2 Pegel

Die Angaben zu den Pegeln beziehen sich ebenfalls auf den Pegel am linken Ohr und geben die Realpegel der Innenraumgeräusche im Fahrzeug in dB(SPL) oder in dB(A)-Gewichtung an. Die Sprachsignale werden bei einem Pegel von 65dB(A) dargestellt.

5.2.6.3 Pegeldifferenzspektren

Die Pegeldifferenzspektren beziehen sich jeweils auf den linken Kanal, d.h. das Frequenzspektrum des rechten Ohres wurde von dem des linken abgezogen. Dargestellt sind die Differenzen von 100Hz bis 10kHz. Damit ist die Auswertung auf den für das Sprachverstehen relevanten Bereich beschränkt (vgl. Kapitel 2).

5.2.6.4 Modulationsspektren

Die Modulationsspektren stellen den Modulationsgrad (0-1) der Modulationsfrequenz f_{mod} in Abhängigkeit der Trägerfrequenz F dar. Die Farbskala stellt die Amplitude der Modulation vom Minimum (0= blau) bis zum Maximum (rot) dar. Als Maximum wurde für die Störgeräuschaufnahmen ein Modulationsgrad in Höhe von 0,5 und für die Sprachaufnahmen von 0,3 festgelegt. Als Trägerfrequenzen wurden in Anlehnung an die Berechnungen des STI (vgl. Kapitel 3.2.2.2) Trägerfrequenzen zwischen 125Hz und 10kHz und Modulationsfrequenzen zwischen 2 und 18Hz dargestellt.

Anhand dieser Analyse sollen die akustischen Bedingungen im Fahrzeug beschrieben werden. Außerdem können die Auswertungen für die Ergebnisinterpretation der empirischen Untersuchungen herangezogen werden. Die Ergebnisse der Auswertung werden in den nachfolgenden Kapiteln anhand der beschriebenen Wirkgrößen (vgl. Kapitel 5.2.3) dargestellt.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Störgeräuschaufnahmen

5.3.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit

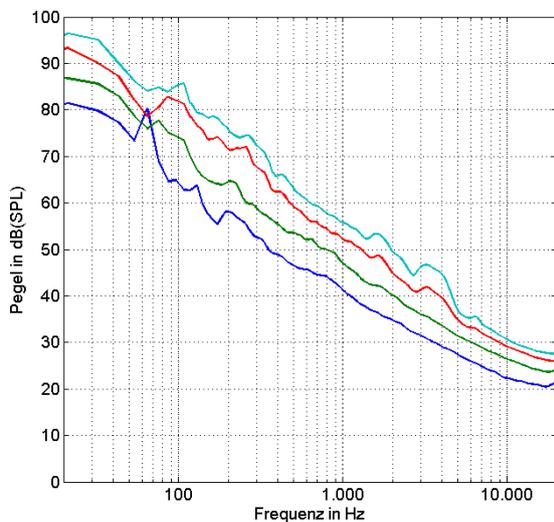
Frequenzspektren

Die Frequenzspektren für unterschiedliche Geschwindigkeiten, beispielhaft anhand der Aufnahmen im Mittelklasse Kombi auf dem Fahrersitz in der Abbildung 5.6a dargestellt, sind augenscheinlich sehr ähnlich. Bei den beiden hohen Geschwindigkeiten (150 und 180km/h) ist allerdings zwischen 2 und 4kHz eine Überhöhung zu erkennen. Auch aus dem höheren Anstieg der dB(A)-Pegel im Vergleich zu den ungewichteten Pegeln (siehe

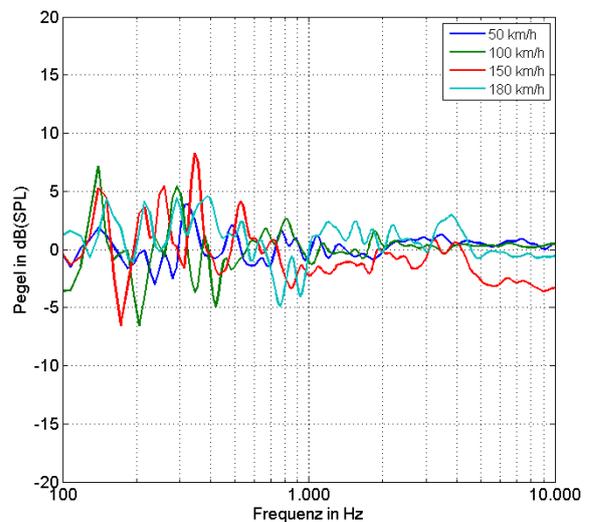
Tabelle 5.3: Lautstärke der Innenraumgeräusche in dB(SPL) und dB(A) in verschiedenen Fahrzeuge bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

Geschwindigkeit	50 km/h		100 km/h		150 km/h		180 km/h	
	dB(SPL)	dB(A)	dB(SPL)	dB(A)	dB(SPL)	dB(A)	dB(SPL)	dB(A)
Baureihe								
Mittelklasse Kombi	86	62	92	67	97	75	100	79
SUV	81	57	85	62	89	68	93	74
Kleinwagen			89	67	95	73		
Mittelklasse Limousine			82	61	89	69		
Coupé			90	67	94	73		
Mittelklasse Cabrio zu			86	65	90	72		
Mittelklasse Cabrio auf			91	74	96	79		
Oberklasse Kombi					98	76		
Oberklasse Limousine					91	71		

Tabelle 5.3) ist für nahezu alle Fahrzeuge abzuleiten, dass die Spektren mit zunehmender Geschwindigkeit mehr mittel- und hochfrequente Energie besitzen.



(a) Frequenzspektren



(b) Differenzspektren

Abbildung 5.6: Frequenz- (a) und Differenzspektren (b) für verschiedene Geschwindigkeiten gemessen im Mittelklasse Kombi auf dem Fahrersitz.

Pegeldifferenzspektren

In der Abbildung 5.6b ist zu erkennen, dass die Pegeldifferenz im Mittelklasse Kombi auf dem Fahrersitz bei 150km/h oberhalb von 4kHz bis zu 3dB stärker ausgeprägt ist als bei den anderen untersuchten Geschwindigkeiten. Auch im SUV war dieser Unterschied zu erkennen, allerdings war er nicht so deutlich ausgeprägt wie im Mittelklasse Kombi.

Modulationsspektren

Die Modulationsspektren im Mittelklasse Kombi zeigen, dass auf dem Fahrerplatz bei 150km/h (Abbildung 5.7c) die Modulationen im Bereich von 2Hz und bei höheren Trägerfrequenzen am stärksten ausgeprägt und bei 180km/h (Abbildung 5.7d) stark verringert sind. Selbiges gilt für den SUV, wo aber insgesamt die Modulationen eine geringere Ausdehnung in Richtung mittlerer Trägerfrequenzen haben als im Mittelklasse Kombi.

5.3.1.2 Einfluss der Karosserie

5.3.1.2.1 Baureihe

Frequenzspektren

In der Abbildung 5.8a sind die Spektren der untersuchten Fahrzeuge bei 150km/h dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sie sich im Verlauf sehr stark ähneln. Alle werden von den tiefen Frequenzen unterhalb 100Hz dominiert und fallen ca. 6dB pro Oktave relativ gleichmäßig ab. Oberhalb von 4kHz wird der Verlauf der Frequenzspektren deutlich flacher und fällt nur noch mit ca. 3dB pro Oktave ab.

Die ungewichteten und gewichteten Pegel für alle Fahrzeuge sind der Tabelle 5.3 zu entnehmen. Für die Beurteilung der Pegel bzgl. ihrer Auswirkungen auf das Sprachverstehen in den Fahrzeugen sollte, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, die dB(A)-Gewichtung herangezogen werden. Der Oberklasse Kombi ist bei 150km/h mit 76dB(A) das lauteste Fahrzeug. Das leiseste Fahrzeug ist der SUV bzw. die Mittelklasse Limousine, die beide ca. 8dB leiser sind.

Pegeldifferenzspektren

Die Pegeldifferenzen, dargestellt in der Abbildung 5.8b, weisen deutliche Unterschiede oberhalb von 3kHz auf. So unterscheiden sich die kleinsten (Mittelklasse Limousine) bis zu 7dB von den größten Pegeldifferenzen (Oberklasse Kombi).

Modulationsspektren

Insgesamt zeigte sich, dass alle Geräusche Modulationen im 2 Hz-Bereich bei den höheren sprachrelevanten Trägerfrequenzen besitzen. Die Stärke der Modulationen unterschied sich in Abhängigkeit der Baureihe. In Abbildung 5.9a ist als Beispiel ein Spektrum mit geringer bzw. ausgeprägter Modulation (Abbildung 5.9b) dargestellt.

5.3.1.2.2 Kabinenzustand

Frequenzspektren

Im Cabrio ist bei geöffnetem Verdeck viel mittel-hochfrequente Energie im Spektrum. Dies ist der kleineren Differenz zwischen dB(SPL)- und dB(A)-Pegel im Vergleich zu den geschlossenen Fahrzeugen aus der Tabelle 5.3 zu entnehmen. Der dB(A)-Pegel steigt ausgehend vom geschlossenen bei geöffnetem Verdeck um ca. 7dB. Es ist dabei vor allem ein Anstieg im Bereich der Frequenzen oberhalb von 500Hz zu verzeichnen (siehe Abbildung 5.10a).

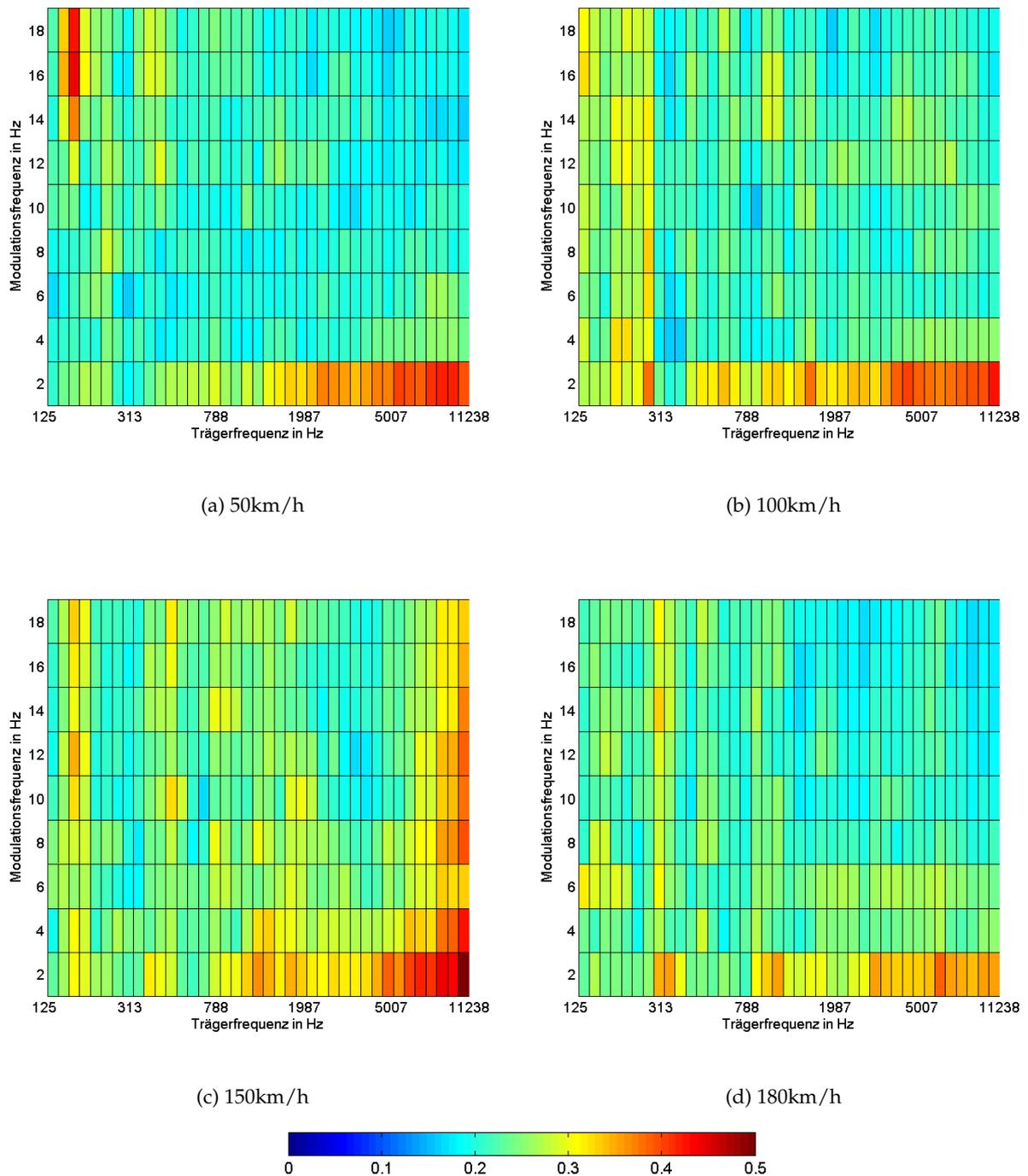
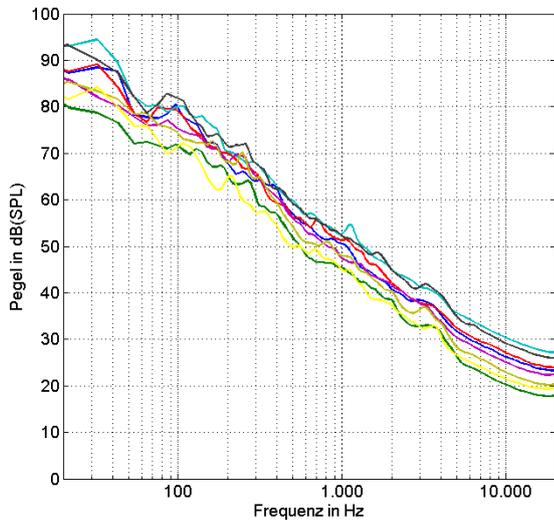


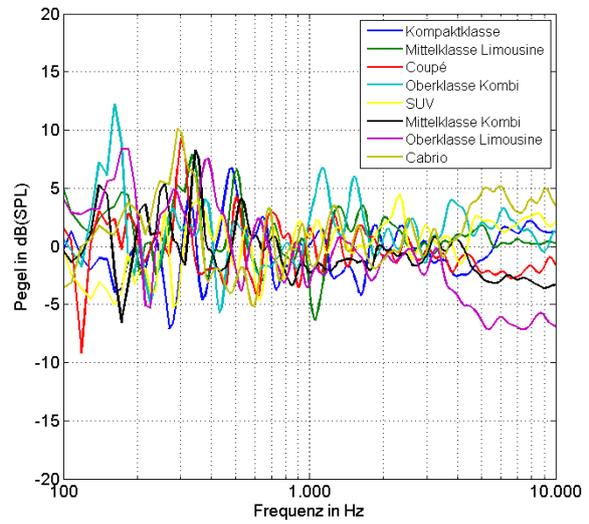
Abbildung 5.7: Modulationsspektren bei verschiedenen Geschwindigkeiten im Mittelklasse Kombi auf dem Fahrersitz. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

Pegeldifferenzspektren

Die Pegeldifferenzen (siehe Abbildung 5.10b) sind im Cabrio mit geschlossenem Verdeck oberhalb von 4kHz etwa 2-3dB höher als mit offenem Verdeck.

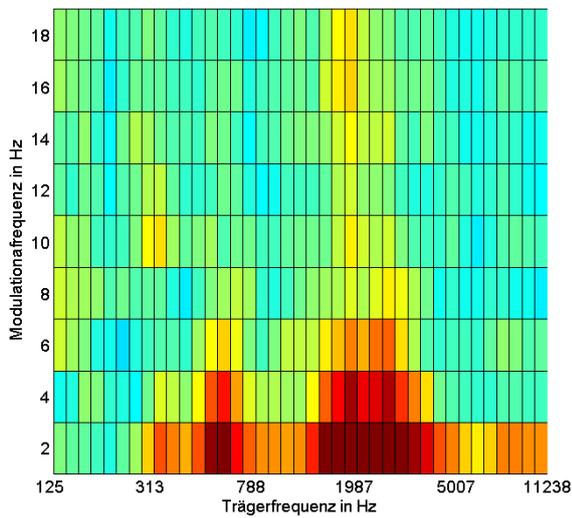


(a) Frequenzspektren

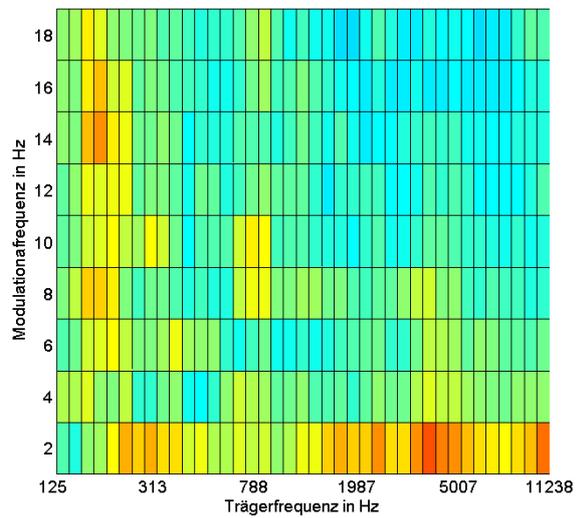


(b) Differenzspektren

Abbildung 5.8: Frequenz (a)- und Differenzspektren (b) auf dem Fahrersitz der untersuchten Fahrzeuge bei 150km/h.



(a) Kompaktklasse



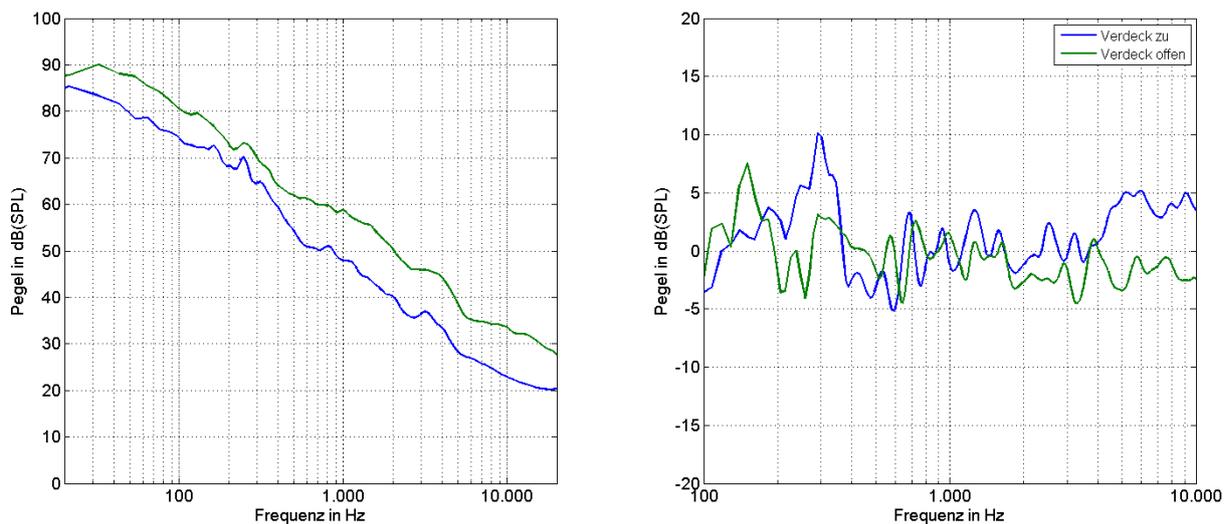
(b) Oberklasse Kombi



Abbildung 5.9: Modulationsspektren auf den Fahrersitzen der Kompaktklasse (a) und des Oberklasse Kombi (b) bei 150 km/h. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

Modulationsspektren

Im Cabrio mit geöffnetem Verdeck sind die Fluktuationen im Störgeräusch hörbar stärker als im geschlossenen Fahrzeug. Der Modulationsgrad konnte wegen der Größe der Amplitudensprünge nicht vergleichend in einem Modulationsspektrum dargestellt werden.



(a) Frequenzspektr

(b) Differenzspektr

Abbildung 5.10: Frequenz- (a) und Differenzspektrn (b) auf dem Fahrersitz im Mittelklasse Cabrio bei 150 km/h bei geöffnetem bzw. geschlossenem Verdeck.

5.3.1.3 Einfluss der Sitzposition

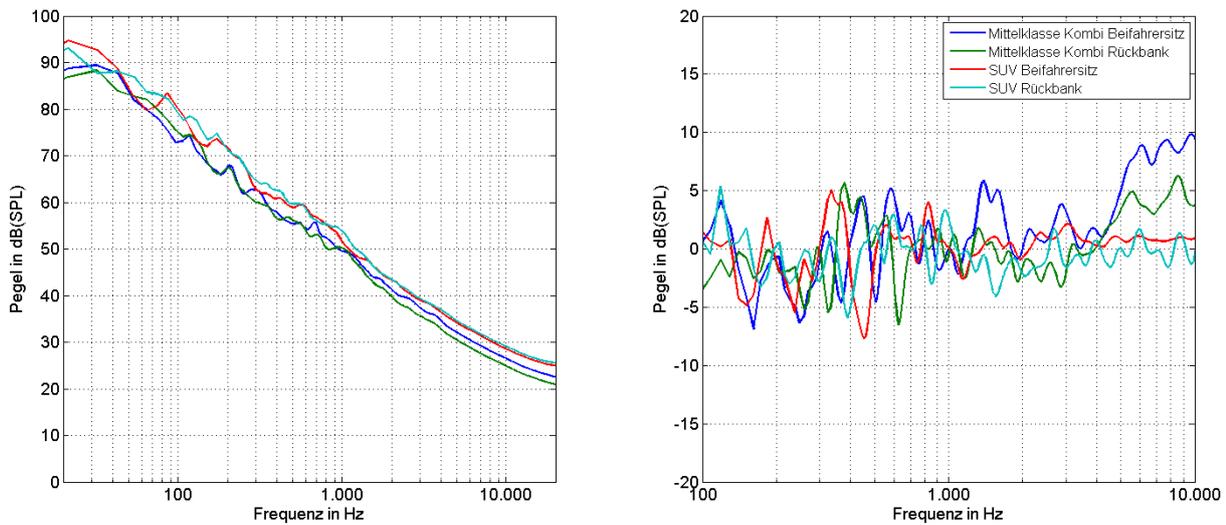
5.3.1.3.1 Beifahrersitz und Rückbank

Frequenzspektrn

Wie in der Abbildung 5.11a beispielhaft für den Mittelklasse Kombi bei 150km/h dargestellt, zeigen sich auf den ersten Blick auf dem Beifahrersitz und der Rückbank sehr ähnliche Spektrn. Bei Betrachtung der Pegel im Mittelklasse Kombi fällt allerdings auf, dass die Geräusche im Font mit 75dB(A) 1dB etwas lauter sind als vorn, was bedeutet, dass die Spektrn auf den hinteren Sitzplätzen etwas mehr mittel- bis hochfrequente Energie beinhalten. Ähnliches gilt auch für den SUV.

Pegeldifferenzspektrn

Bezüglich der Pegeldifferenzen gibt es deutlich Unterschiede zwischen dem Mittelklasse Kombi und dem SUV. Während die Pegeldifferenzen im Mittelklasse Kombi auf dem Beifahrersitz oberhalb von 4kHz bis zu 5dB größer sind als auf der Rückbank, unterscheiden sich die Pegeldifferenz auf den beiden untersuchten Sitzplätzen im SUV kaum (siehe Abbildung 5.11b).



(a) Frequenzspektren

(b) Differenzspektren

Abbildung 5.11: Frequenz- (a) und Differenzspektren (b) auf verschiedenen Sitzplätzen im Mittelklasse Kombi und im SUV bei 150 km/h.

Modulationsspektren

Wie in der Abbildung 5.12b für den Mittelklasse Kombi dargestellt, sind in beiden untersuchten Fahrzeugen auf der Rückbank sehr viel ausgeprägtere Modulationen im Bereich zwischen 2 und 8 Hz bei den sprachrelevanten höheren Frequenzen im Störgeräusch vorhanden als auf dem Beifahrersitz (Abbildung 5.12a).

5.3.1.3.2 Fahrer- und Beifahrersitz

Für die Interpretation der Messungen auf dem Fahrer- und Beifahrersitz sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass für die Aufnahmen unterschiedliche Messinstrumente genutzt wurden. Das heißt, Unterschiede können nicht zwangsläufig auf die Auswirkung des unterschiedlichen Sitzplatzes zurückgeführt werden.

Frequenzspektren

Wie beispielhaft in Abbildung 5.13a für den Mittelklasse Kombi und den SUV dargestellt, zeigten die Frequenzspektren aller Aufnahmen kaum Unterschiede zwischen Fahrer- und Beifahrersitz.

Pegeldifferenzspektren

Bei der Betrachtung der Pegeldifferenzen auf dem Fahrer- und dem Beifahrersitz ist zu beachten, dass aufgrund der asymmetrischen Sitzanordnung im Kfz, die Schallverteilung zwischen rechtem und linkem Ohr diametral ist. Der Pegel auf dem Fahrersitz ist zum Fenster hin, also am linken Ohr, höher als am rechten Ohr, welches dem Innenraum zugewandt ist. Derselbe Effekt tritt auch auf der Beifahrerseite auf, hier ist entsprechend der

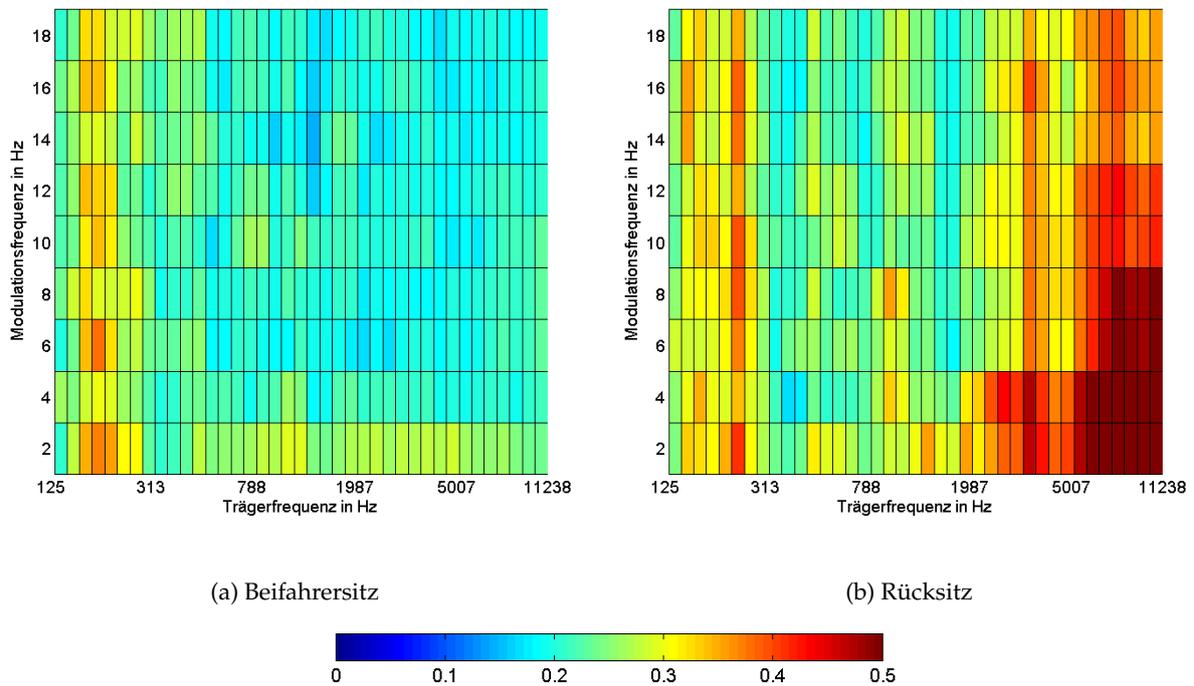


Abbildung 5.12: Modulationsspektren auf dem Beifahrerplatz (a) und dem Rücksitz (b) des Mittelklasse Kombi bei 150 km/h. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

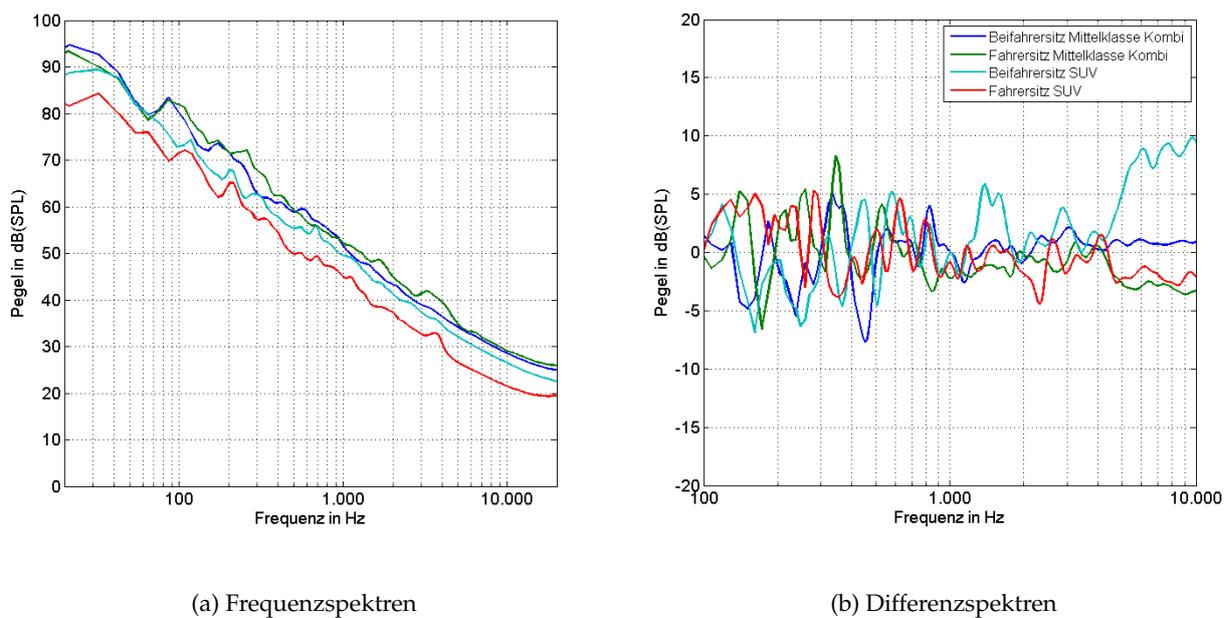


Abbildung 5.13: Frequenz- (a) und Differenzspektren (b) auf dem Fahrer- und dem Beifahrersitz bei 150km/h in verschiedenen Fahrzeugen.

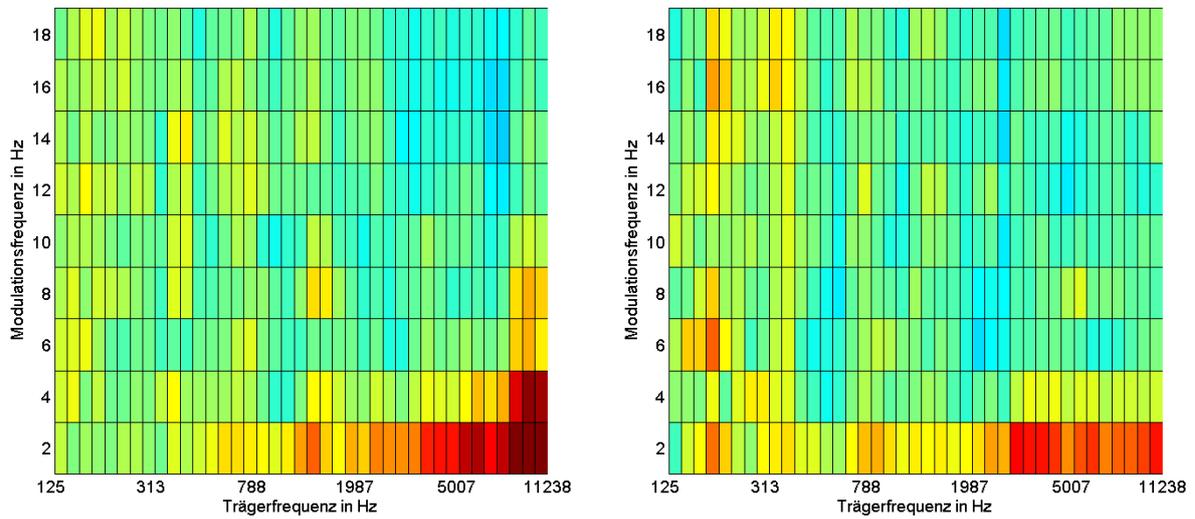
Pegel auf dem rechten Ohr höher als auf dem linken, wodurch sich im hohen Frequenzbereich eine negative Differenz ergibt.

Der Vergleich der Pegeldifferenzen ergab im Cabrio und Coupé eine gute Übereinstimmung zwischen Fahrersitz (Originalkopf-Mikrofon-Aufnahmen, OKM) und Beifahrersitz (Kunstkopf-Aufnahmen, KK). Anders sah dies im Mittelklasse Kombi, Oberklasse Kombi und im SUV aus. Wie die Abbildung 5.13b beispielhaft für den Mittelklasse Kombi zeigt, waren die Unterschiede in beiden Kombis oberhalb von 4kHz auf dem Beifahrersitz (KK) ca. 3dB kleiner als auf dem Fahrersitz mit den OKM. Dagegen waren die Pegeldifferenzen im SUV auf dem Beifahrersitz oberhalb von 4kHz bis zu 5dB größer als auf dem Fahrersitz (siehe Abbildung 5.13).

Modulationsspektren

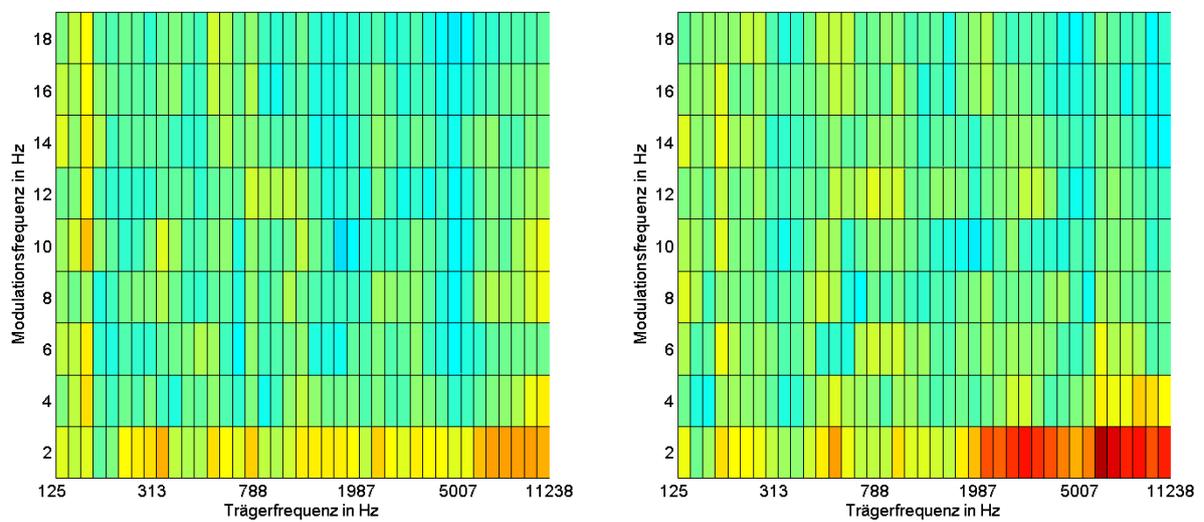
In allen Aufnahmen sind Modulationsunterschiede in den OKM- (Fahrerplatz) und den KK-Aufnahmen (Beifahrerplatz) zu erkennen.

Allerdings gibt es keine generelle Richtung dieser Unterschiede. Beispielsweise sind in den KK-Aufnahmen im Cabrio bei geschlossenem Verdeck größere Modulationen (siehe Abbildung 5.14a) als in den OKM-Aufnahmen (b), während es sich im Coupé genau entgegengesetzt verhält (siehe Abbildung 5.14c und d).



(a) Beifahrersitz Cabrio

(b) Fahrersitz Cabrio



(c) Beifahrersitz Coupé

(d) Fahrersitz Coupé



Abbildung 5.14: Modulationsspektren auf verschiedenen Sitzplätzen im Cabrio bei geschlossenem Verdeck (a,b) und im Coupé (c,d). Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

5.3.2 Sprachaufnahmen

5.3.2.1 Einfluss der Signalquelle

5.3.2.1.1 Sprachwiedergabesysteme

Frequenzspektren

In Abbildung 5.15a sind die Frequenzspektren der Sprachwiedergabe im Oberklasse Kombi über das Entertainmentssystem und über die beiden Announcementkanäle Navigation und Telefon dargestellt. Zum Vergleich wurde das Frequenzspektrum des unveränderten Sprachrauschens aus dem OLSA dargestellt (Originalsignal). Das Sprachsignal, welches über die Signalquellen im Fahrzeug wiedergegeben wird, ist stärker zerklüftet als das Originalsignal.

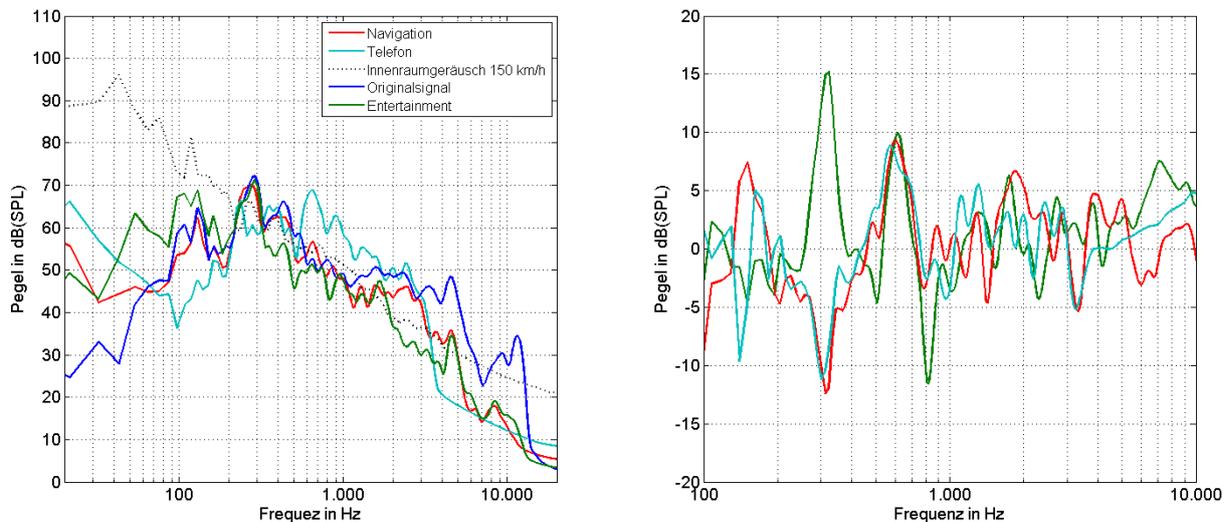
Es ist außerdem zu erkennen, dass insgesamt eine starke Frequenzanpassung des Signals bei die Wiedergabe im Fahrzeug erfolgt. Das Sprachsignal, welches über das Entertainment wiedergegeben wird, hat z.B. im Frequenzbereich unterhalb von 100Hz außergewöhnlich viel Energie. Dieser Bereich wird für eine gute Basswiedergabe bei Musik besonders betont. Im Gegensatz dazu haben dort die beiden Informationssysteme, die vor allem der Sprachwiedergabe dienen, kaum Energie. Bei der Wiedergabe über Telefon ist zusätzlich zu erkennen, dass die Bandbreite zwischen 200 und 3000 Hz begrenzt ist. Dies hängt mit der Schmalband-Übertragung, die in der Telekommunikation üblich ist, zusammen. Bei der Telefonübertragung hat das Signal oberhalb von 500 Hz, bei der Navigationsdurchsage oberhalb von 2kHz mehr Energie als bei der Wiedergabe über das Entertainmentssystem.

Pegeldifferenzspektren

In Bezug auf die Pegelunterschiede zwischen den Ohren ist der Abbildung 5.15b zu entnehmen, dass die Entertainmentwiedergabe einen etwas höheren Pegel auf dem linken Ohr aufweist, während die Informationssysteme eher rechtslastig sind. Dies betrifft aber erstaunlich schmale Frequenzabschnitte, was vermutlich mit der starken Zerklüftung der Signale zusammenhängt. Es ist zu erkennen, dass die Pegelunterschiede bei der Wiedergabe über das Entertainment etwas höher ausfallen als über die Informationssysteme.

Modulationsspektren

In der Abbildung sind die Modulationsspektren der Signalquellen und zum Vergleich das Modulationsspektrum des Sprachrauschens des OLSA (Originalsignal) dargestellt (5.16). In den Modulationsspektren ist eine Abflachung der Modulationen von der Entertainmentwiedergabe (b) über die Navigation (c) bis hin zur Telefonübertragung (d) zu erkennen. Vor allem die 2Hz-Modulationen beschränken sich immer weiter in Richtung höherer Trägerfrequenzen. Die im Originalmaterial noch erkennbaren 2-18Hz-Modulationen im Bereich um 200 Hz sind ebenfalls stark abgeflacht.



(a) Frequenzspektrum

(b) Differenzspektrum

Abbildung 5.15: Frequenz- (a) und Differenzspektren (b) der Wiedergabe von Sprache verschiedener Signalquellen auf der Beifahrerseite im Oberklasse Kombi. Zum Vergleich ist das Spektrum des unveränderten Sprachrauschens des OLSA (Originalsignal) dargestellt.

5.3.2.1.2 Fahrer als Sprecher

Frequenzspektren

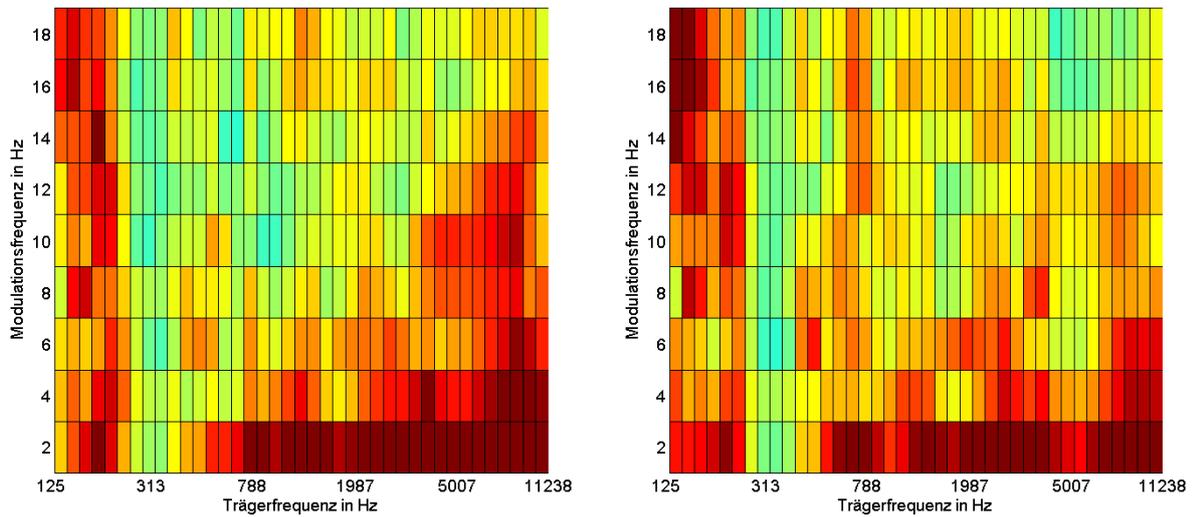
Wie beispielhaft in Abbildung 5.17a für den Mittelklasse Kombi dargestellt ist, kommen sowohl im Mittelklasse Kombi als auch im SUV im Front wesentlich weniger hohe Frequenzen an, wenn der Fahrer spricht als wenn Sprache durch das Entertainmentssystem wiedergegeben wird.

Pegeldifferenzspektren

Wie in der Abbildung 5.17b zu erkennen, sind die Pegeldifferenzen im Mittelklasse Kombi oberhalb von 2kHz bis zu 10dB größer, wenn der Fahrer spricht als bei der Sprachwiedergabe über das Entertainmentssystem. Dies gilt nicht für den SUV, wo die Pegeldifferenzen zwar diametral waren, aber ungefähr die gleiche Ausprägung hatten.

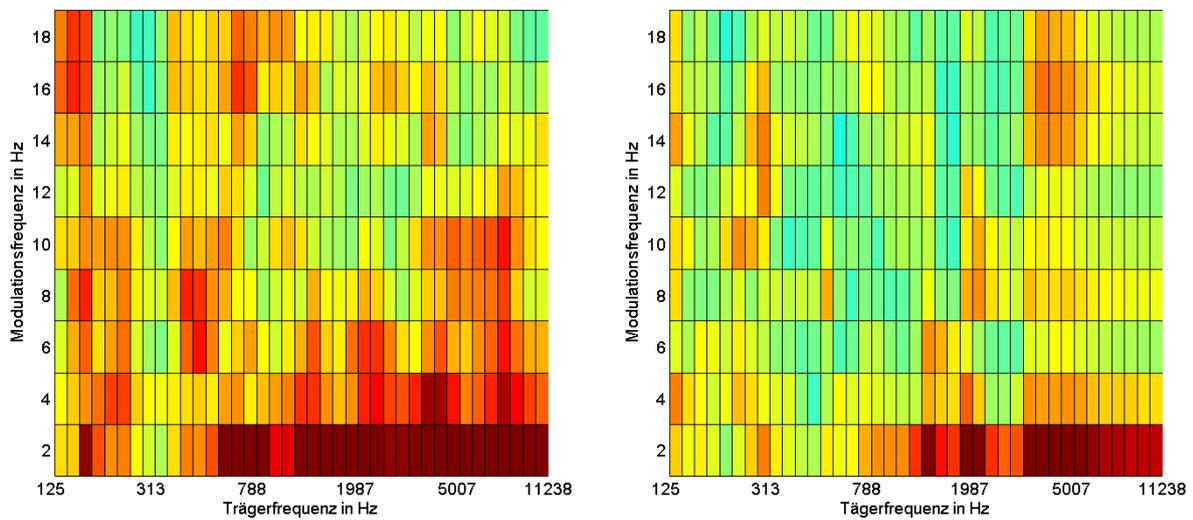
Modulationsspektren

Im Mittelklasse Kombi sind die Modulationen im Sprachsignal, wenn der Fahrer spricht (siehe Abbildung 5.18a) stärker verringert als bei der Entertainmentwiedergabe (b). Dies gilt nicht für den SUV, wo die Modulationen sehr ähnlich waren.



(a) OLSA Original

(b) Entertainment



(c) Navigation

(d) Telefon

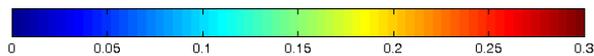
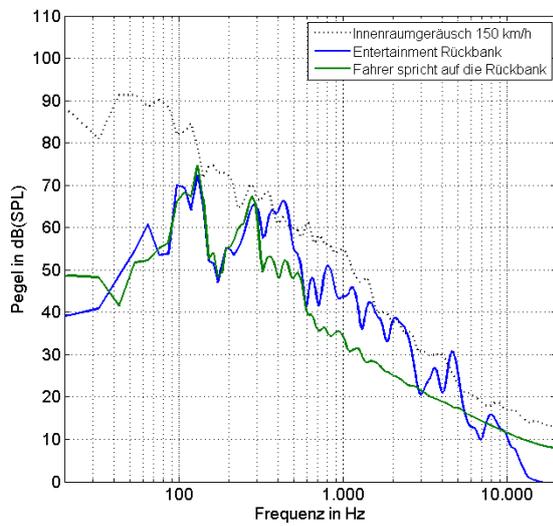
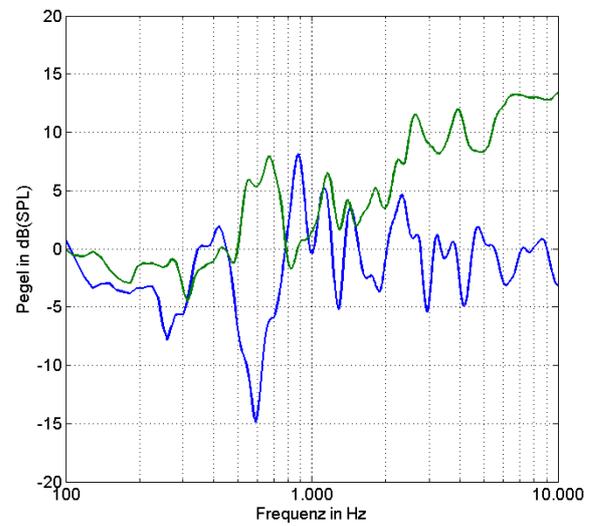


Abbildung 5.16: Modulationsspektren der Sprachwiedergabe über verschiedenen Quellen im Vergleich zum Sprachrauschen im OLSA (a). Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

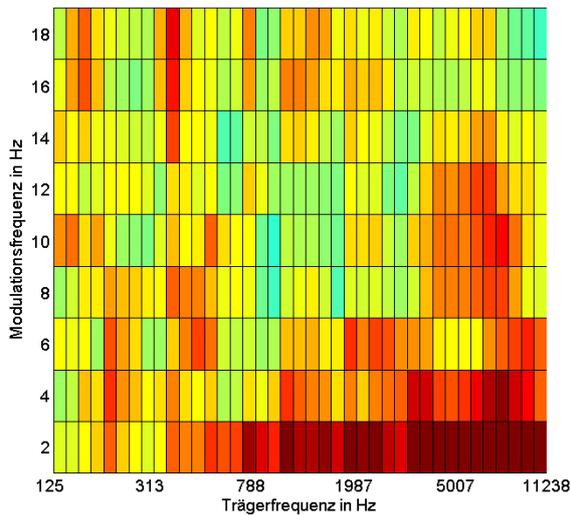


(a) Frequenzspektr

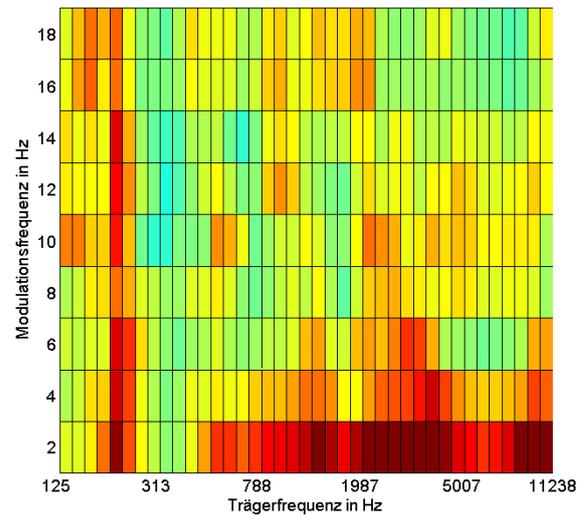


(b) Differenzspektr

Abbildung 5.17: Frequenz- (a) und Differenzspektr (b) der Entertainmentwiedergabe und vom Fahrer auf die Rückbank im Mittelklasse Kombi.



(a) Entertainment



(b) Fahrer

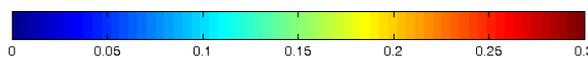


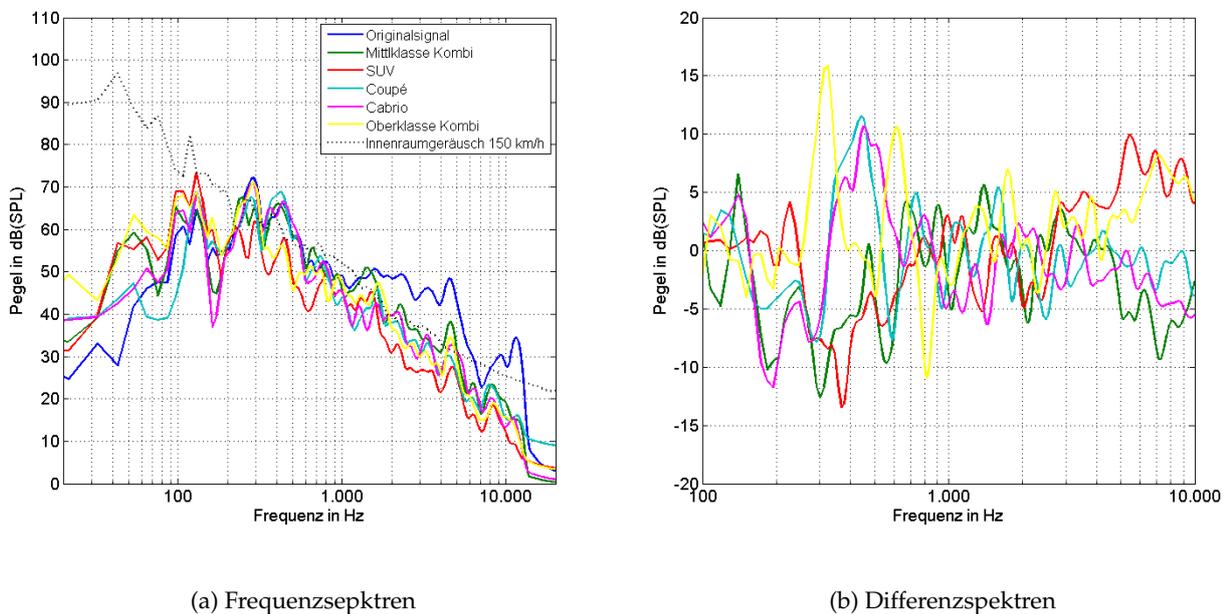
Abbildung 5.18: Modulationsspektr unterschiedlicher Signalquellen auf der Rückbank im Mittelklasse Kombi. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

5.3.2.2 Einfluss der Karosserie

5.3.2.2.1 Baureihe

Frequenzspektren

Wie in der Abbildung 5.19a zu sehen, ist allen Sprachsignalen bei der Wiedergabe über das Entertainmentsystem gemeinsam, dass die Frequenzen oberhalb von 1kHz gegenüber dem Originalsprachmaterial deutlich gedämpft sind. Außerdem fällt auf, dass die Signale in allen Fahrzeugen stärker durch Einbrüche und Aufsummierungen gekennzeichnet sind. Trotz gleichem dB(A)-Pegel unterscheiden sich die Frequenzspektren im sprachrelevanten oberen Frequenzbereich bis zu 10dB.



(a) Frequenzspektren

(b) Differenzspektren

Abbildung 5.19: Frequenz- (a) und Differenzspektren (b) der Wiedergabe von Sprache durch die Entertainmentsysteme verschiedener Fahrzeuge.

Pegeldifferenzspektren

Wie in der Abbildung 5.19b zu sehen ist, unterscheiden sich die Pegeldifferenzen zwischen den Ohren in Abhängigkeit der Baureihe. So sind die Pegeldifferenzen im SUV sowie im Mittel- und Oberklasse Kombi oberhalb von 2kHz deutlich größer als im Coupé und im Cabrio mit geschlossenem Verdeck.

Modulationsspektren

In der Abbildung (5.20) sind die Modulationsspektren der Entertainmentwiedergabe auf dem Beifahrersitz der untersuchten Fahrzeuge und zum Vergleich des Sprachrauschens des OLSA im Original dargestellt (Originalsignal). In allen Fahrzeugen sind die natürlichen Modulationen des Sprachsignals reduziert. Dies betrifft vor allem die Modulationen zwischen 4 und 14Hz bei den Trägerfrequenzen oberhalb von 2kHz.

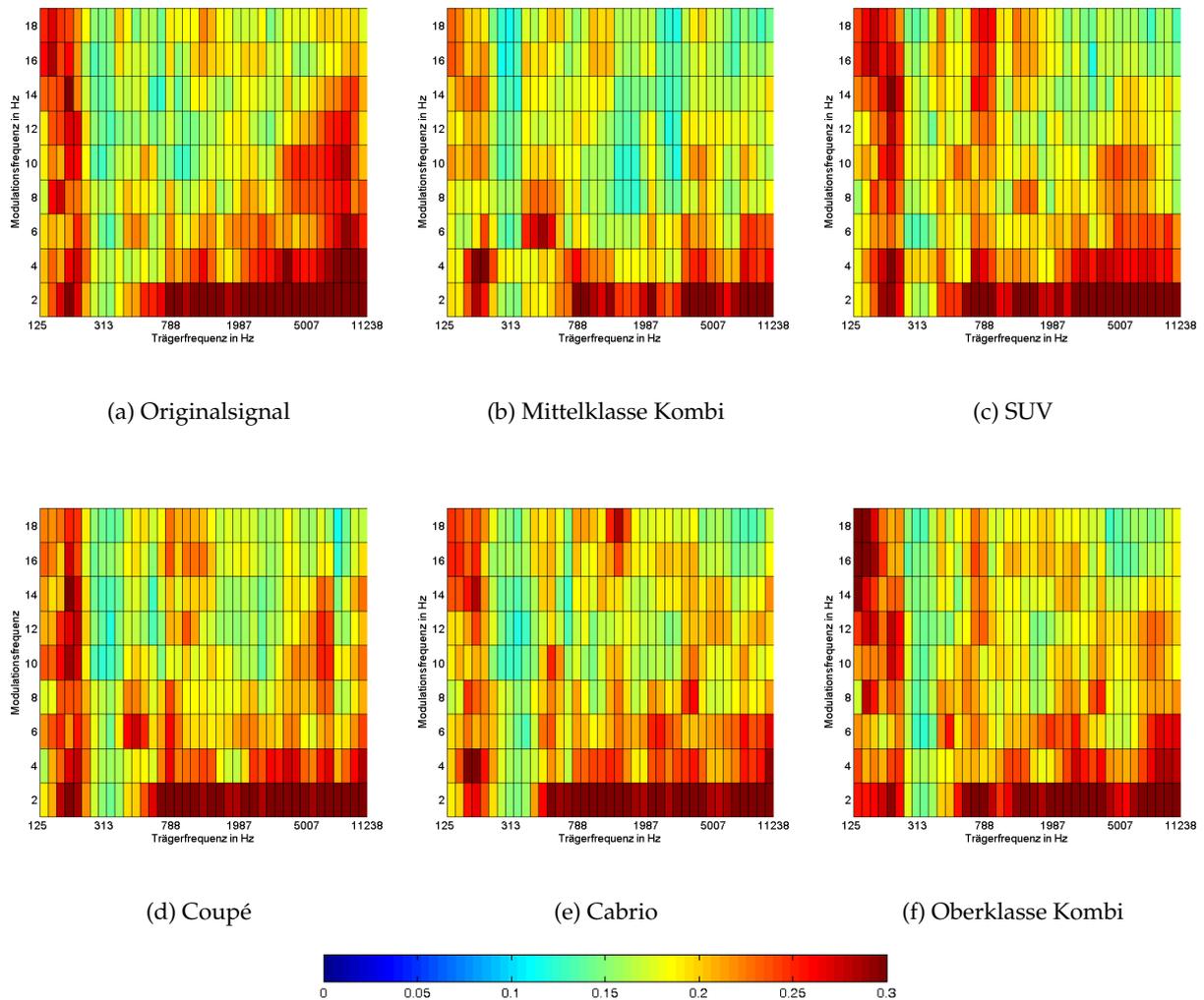


Abbildung 5.20: Modulationsspektren der Sprachwiedergabe über das Entertainmentssystem auf dem Beifahrerplatz in verschiedenen Fahrzeugen. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

5.3.2.2.2 Kabinenzustand

Frequenzspektren

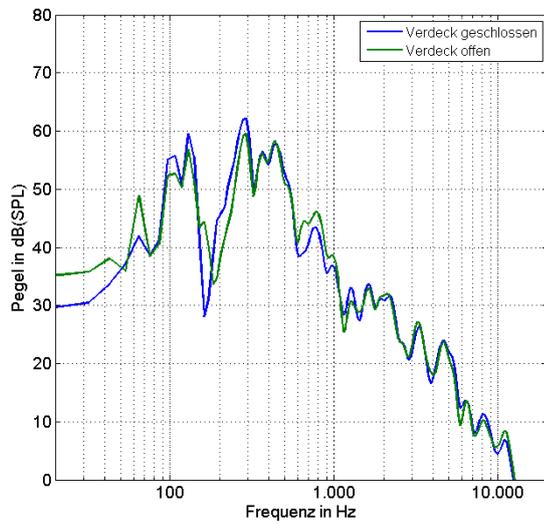
Die Frequenzspektren im Cabrio mit geöffnetem bzw. geschlossenem Verdeck lassen kaum Unterschiede des Sprachsignals auf dem Beifahrerplatz erkennen (siehe Abbildung 5.21a).

Pegeldifferenzspektren

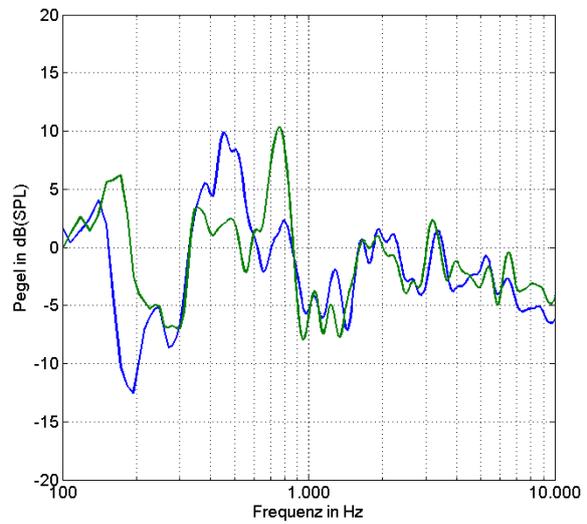
Auch die Pegeldifferenzen zwischen den Ohren weisen kaum Unterschiede auf, wenn Sprache bei geöffnetem bzw. geschlossenem Verdeck wiedergegeben wird (siehe Abbildung 5.21b).

Modulationsspektren

Bei geschlossenem Verdeck treten im Sprachsignal am Beifahrersitz etwas stärkere Modulationen auf als wenn das Verdeck des Cabrios offen ist (siehe Abbildung 5.22).

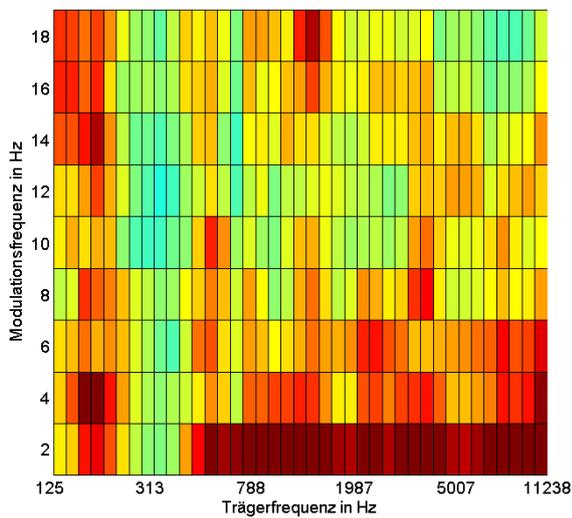


(a) Frequenzspektrn

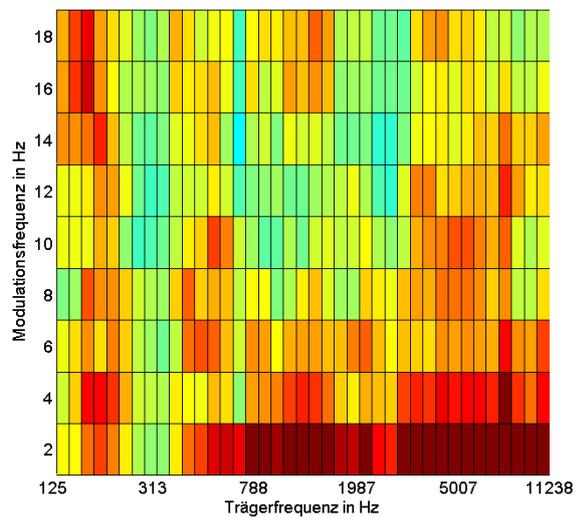


(b) Differenzspektrn

Abbildung 5.21: Frequenz- (a) und Differenzspektrn (b) der Wiedergabe von Sprache im Cabrio.



(a) Cabrio zu



(b) Cabrio auf

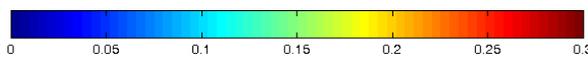


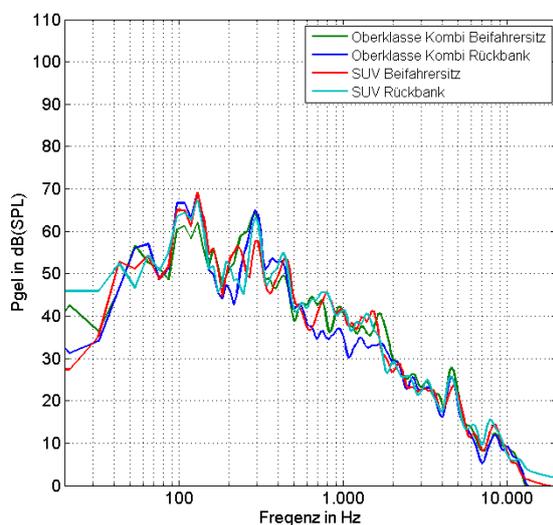
Abbildung 5.22: Modulationsspektrn der Sprachwiedergabe über das Entertainmentssystem auf dem Beifahrerplatz im Cabrio bei geöffnetem bzw. geschlossenem Verdeck. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

5.3.2.3 Einfluss der Sitzposition

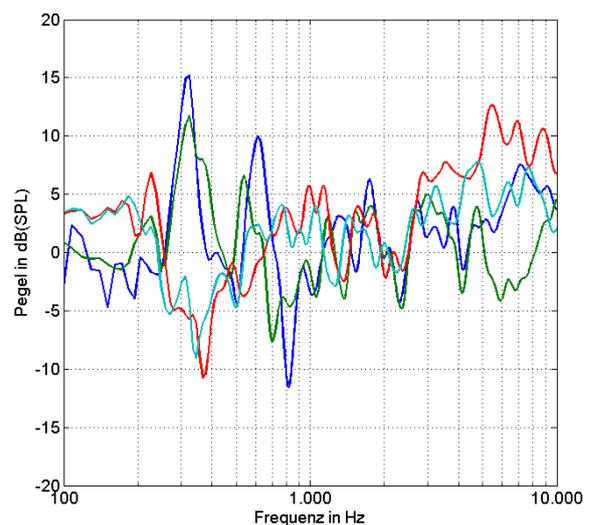
5.3.2.3.1 Entertainmentwiedergabe auf Beifahrerplatz und Rückbank

Frequenzspektren

Bei den beiden untersuchten Kombis (Mittelklasse und Oberklasse) zeigte sich bezüglich des Sprachsignals ein ähnliches Bild. Wie in der Abbildung 5.23a für den Oberklasse Kombi dargestellt, sind die Frequenzen oberhalb von 500Hz im Font leiser als auf dem Beifahrersitz. Dies gilt nicht in gleichem Maße für den SUV, wo nahezu keine Unterschiede zwischen der Entertainmentwiedergabe auf dem Beifahrerplatz und im Font zu erkennen waren.



(a) Frequenzspektren



(b) Differenzspektren

Abbildung 5.23: Frequenzspektren der Sprachwiedergabe des Entertainmentsystems auf verschiedenen Sitzplätzen im Oberklasse Kombi.

Pegeldifferenzspektren

Der Pegelunterschied an den Ohren ist dagegen im SUV auf dem Beifahrersitz höher als im Font (siehe Abbildung 5.23b), während in den Kombis, in der Abbildung beispielhaft für den Oberklasse Kombi dargestellt, kaum Unterschiede auftraten.

Modulationsspektren

Für die Modulationsspektren der Sprachsignale zeigten sich unterschiedliche Muster: während im Mittelklasse Kombi die Modulationen auf dem Rücksitz etwas stärker waren (siehe Abbildung 5.24), waren im Oberklasse Kombi und im SUV kaum Unterschiede zwischen Beifahrersitz und Rückbank zu erkennen.

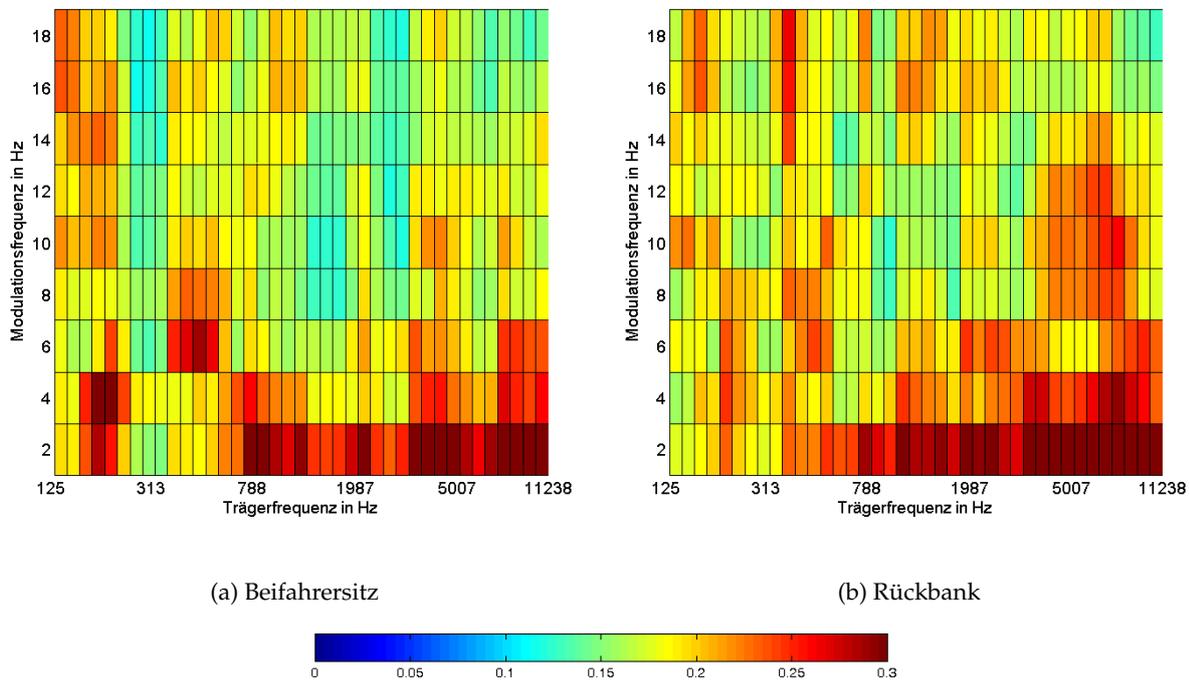


Abbildung 5.24: Modulationsspektren der Sprachwiedergabe über das Entertainmentssystem auf verschiedenen Sitzplätzen im Mittelklasse Kombi. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

5.3.2.3.2 Insassenkommunikation zwischen Fahrer und Personen in der zweiten bzw. dritten Sitzreihe im SUV

Frequenzspektren

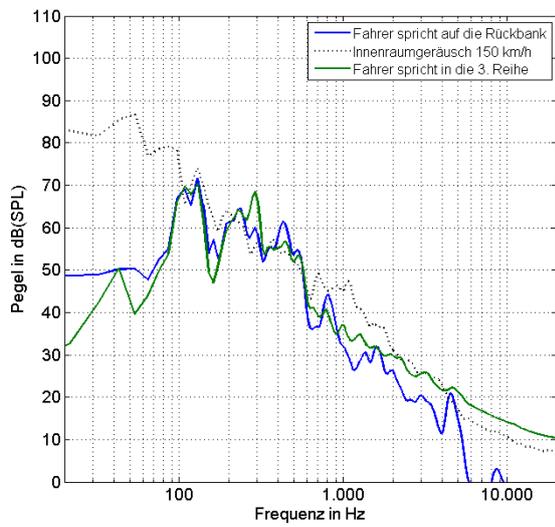
Das Frequenzspektrum der Sprachwiedergabe in der dritten Sitzreihe des SUV enthält oberhalb von 1kHz mehr Energie als in der zweiten Sitzreihe (siehe Abbildung 5.25a).

Pegeldifferenzspektren

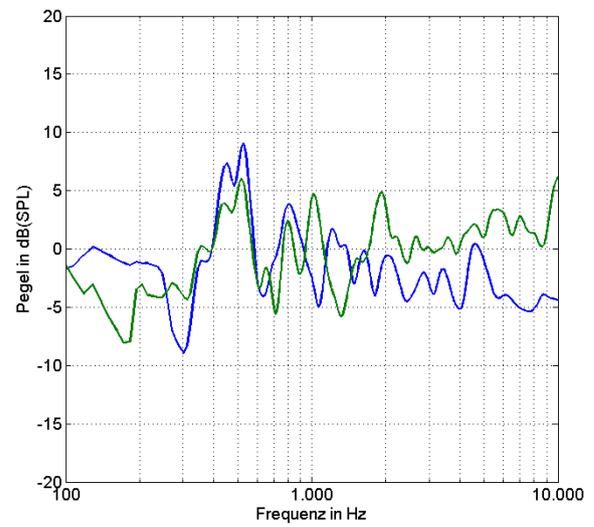
Die Pegelunterschiede zwischen den Ohren waren oberhalb von 2kHz auf der Rückbank größer als in der dritten Reihe (siehe Abbildung 5.25 rechts).

Modulationsspektren

Die Modulationen im Sprachsignal (siehe Abbildung 5.26) unterscheiden sich in der zweiten und dritten Reihe kaum.

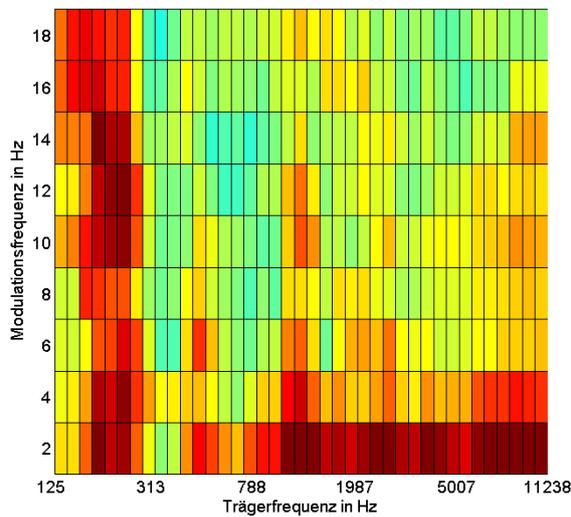


(a) Frequenzspektren

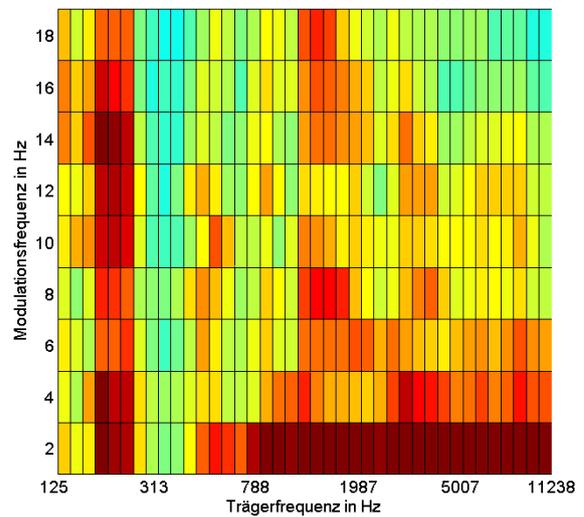


(b) Differenzspektren

Abbildung 5.25: Frequenz- (a) und Differenzspektrum (b) der Sprachübertragung vom Fahrer auf die zweite bzw. dritte Sitzreihe im SUV.



(a) zweite Reihe



(b) dritte Reihe

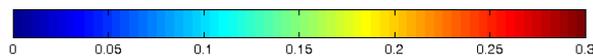


Abbildung 5.26: Modulationsspektren der Sprachübertragung vom Fahrer im SUV. Die Farbcodierung gibt den Modulationsgrad an.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Effekte der am Anfang aufgezeigten Wirkgrößen (siehe Tabelle 5.1 und 5.2) in Bezug auf die Frequenzspektren und Pegel und den Modulationsgrad von Störgeräusch und Sprachsignal untersucht. Außerdem wurden die Differenzen zwischen den Ohren im Sinne der Binauralität der Hörsituation analysiert.

Es stellen sich sehr komplexe Auswirkungen der untersuchten Faktoren auf die akustischen Bedingungen im Fahrzeug dar, die eine einfache Verknüpfungen zwischen Ursache und Auswirkung erschweren. So zeigten sich Unterschiede in den Störgeräuschen sowohl in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, der Karosserie (Baureihe und Kabinenzustand) als auch der Sitzposition des Hörers. Besonders auffällig bzgl. der Störgeräuschsituation waren:

- 1) die Pegelzunahme über die Geschwindigkeit
- 2) in Abhängigkeit der Karosserie
 - die Pegelunterschiede
 - die Unterschiede der Pegeldifferenzen
 - die Unterschiede der Modulationen
- 3) in Abhängigkeit der Sitzposition
 - die Unterschiede der Modulationen
 - die Unterschiede der Pegeldifferenzen

Ausgehend von der Annahme, dass die Störgeräuschbedingungen an gespiegelten Plätzen (Beifahrer- vs. Fahrersitz) auch gespiegelt sein sollten, müssten auf dem Beifahrerplatz gemessene Ergebnisse auch auf den Fahrerplatz übertragbar sein. Dies ist insofern relevant, weil alle empirischen Untersuchungen auf den Aufnahmen des Kunstkopfes (Beifahrerseite) basieren, um die Ergebnisse besser replizieren und vergleichen zu können. Die Frequenz- und einige Pegeldifferenzspektren zeigten eine hohe Übereinstimmung zwischen den Aufnahmen, der Modulationsgrad war dagegen nicht stabil. Die Unterschiede sind vorsichtig zu interpretieren, da auf dem Fahrersitz ein anderes Aufnahmesystem verwendet wurde als auf den anderen Plätzen. Somit könnten die Abweichungen mit dem Sitzplatz, Unterschieden in den Messsystemen oder auch auf kleinste Positionsunterschiede der Kunstkopf (genormt)- vs. Innenohr-Mikrofone (realer Kopf) zurückzuführen sein.

Bei der Untersuchung des Sprachsignals in Abhängigkeit der Signalquelle, der Karosserie (Baureihe und Kabinenzustand) und der Sitzposition von Sprecher und Hörer ließen sich ebenfalls deutliche Unterschiede nachweisen. Generell war auffällig, dass im Fahrzeug eine starke Frequenzanpassung der Sprachsignale durch die Soundsysteme erfolgt und zusätzlich die Summationen und Auslöschungen zu einer deutlichen Zerklüftung des übertragenen Signals führen. Dies wirkt sich auch auf die Pegeldifferenzen an den Ohren aus, die stark frequenzabhängig und in schmalen Bändern auftreten.

Insgesamt führten alle untersuchten Wirkgrößen (Signalquelle, Karosserie und Sitzplatzes des Hörers) zu Unterschieden in den Frequenz-, Pegeldifferenz- und Modulationspektren. Besonders auffällig waren:

- 1) in Abhängigkeit der Baureihe
 - die Unterschiede der Frequenzspektren
 - die Unterschiede der Pegeldifferenzen
- 2) in Abhängigkeit der Signalquelle
 - die Unterschiede der Frequenzspektren
 - die Unterschiede der Pegeldifferenzen
 - die Unterschiede der Modulationen
- 3) die Frequenzspektren in Abhängigkeit des Sitzplatzes

6. Experiment 1 - Evaluation der Sprachindizes für Störgeräusche im Kfz

Im Kapitel 5 wurde gezeigt, dass die akustische Situation im Fahrzeug in Abhängigkeit der Karosserie, Geschwindigkeit, Sitzposition und Signalquelle variiert. Dies bedeutet für die Sprachindizes, dass sie bei der Anwendung im Kfz in einer Vielzahl an Messbedingungen die Sprachverständlichkeit zuverlässig vorhersagen müssten. Im Folgenden soll nun die Vorhersagegüte der Sprachindizes untersucht werden, indem die empirische Sprachverständlichkeit von Versuchspersonen mit den, durch die Modelle berechneten Werten verglichen wird. Die Sprachverständlichkeit wird hier durch den Speech Reception Threshold (SRT) repräsentiert, also dem Verhältnis zwischen Sprach- und Störgeräuschpegel, bei dem 50% Sprache verstanden wird. Der SRT wird durch eine Sprachaudiometrie auf Basis des Oldenburger Satztests (OLSA; Wagener et al., 1999a) bestimmt. Als Stimuli für die Messungen werden den Versuchspersonen die binaural aufgezeichneten Störgeräusche und Sprachsignale aus der im Kapitel 5 dargestellten Datenbank über Kopfhörer dargeboten. Trotz Wiedergabe über den Kopfhörer bleiben die binauralen Informationen in den Signalen erhalten (vgl. Kapitel 5.2.1).

Als Sprachindizes werden der monaurale Sprachverständlichkeitsindex (SII; ANSI, 1997) und das binaurale Sprachverständlichkeitsmodell (BSIM; Beutelmann & Brand, 2006) genutzt.

Um die Komplexität der Messbedingungen zu reduzieren, werden zwei getrennte Experimente durchgeführt. Im Experiment 1 wird die Güte der Sprachindizes, wie der Tabelle 6.1 zu entnehmen ist, in verschiedenen Baureihen, bei zwei Geschwindigkeiten und auf zwei Sitzplätzen untersucht. Die Sprachwiedergabe erfolgt dabei in allen Situationen über das Entertainmentsystem. Unterschiedliche Sprachsignale werden im Experiment 2 untersucht (siehe Kapitel 7).

Die Modellgüte wird im Experiment 1 für unterschiedliche Kundengruppen, also neben den Normalhörenden auch für Kunden mit Hörschäden, untersucht. Da dem Sprachübertragungsindex (STI) ein anderes Berechnungskonzept zugrunde liegt, welches unter Umständen zu unterschiedlichen Vorhersagen führt (vgl. Kapitel 3.3), werden für die weiterführende Diskussion die Werte des STI ergänzt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus diesem Versuch soll bestimmt werden, wie gut die Sprachindizes die Sprachverständlichkeit unter verschiedenen Störgeräuschbedingungen im Kfz vorhersagen können. Darüber hinaus soll entschieden werden, ob und wenn ja, welche Modifikationen an den Sprachindizes zur Verbesserung der Vorhersage der Sprachverständlichkeit vorgenommen werden müssen.

Tabelle 6.1: Experimentelle Bedingungen im Experiment 1.

Bedingung	Sprachsignal	Störgeräusch	Position	Kurzname
Validierung I	OLSA-Sätze 0°	OLSA-Rauschen 0°		OLSA S ₀ N ₀
Validierung II	OLSA-Sätze 0°	OLSA-Rauschen 100° links		OLSA S ₀ N ₋₁₀₀
Mischbedingung I	OLSA-Sätze 0°	Mittelklasse Kombi, 150 km/h		S ₀ N _{Kfz}
Mischbedingung II	Entertainment	OLSA-Rauschen 0°		S _{Kfz} N ₀
Hauptbedingung I	Entertainment	Mittelklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi VR 150
Hauptbedingung II	Entertainment	Cabrio, offen, 150 km/h	Beifahrer	Cabrio auf
Hauptbedingung III	Entertainment	Cabrio, geschlossen, 150 km/h	Beifahrer	Cabrio zu
Hauptbedingung IV	Entertainment	Coupé, 150 km/h	Beifahrer	Coupé
Hauptbedingung V	Entertainment	SUV, 150 km/h	Beifahrer	SUV
Hauptbedingung VI	Entertainment	Mittelklasse Kombi, 150 km/h	Rückbank	Kombi HR 150
Hauptbedingung VII	Entertainment	Mittelklasse Kombi, 50 km/h	Beifahrer	Kombi VR 50

6.1 Hypothesen

Zur Interpretation der Ergebnisse zur Modellgüte der Sprachindizes im Kfz müssen etwaige Unterschiede zu bereits gezeigten Ergebnissen auf die Verwendung der Stimuli aus dem Fahrzeug zurückzuführen sein. Unterschiede könnten aber auch auf Veränderungen der Versuchsanordnung oder -personen zurückzuführen sein. Somit ist zu zeigen, dass die hier vorgestellten Daten keinen Unterschied zu bereits veröffentlichten Ergebnissen aufweisen. Zu diesem Zweck werden die SRTs der Versuchspersonen in Validierungsbedingung I und II (siehe Tabelle 6.1) untersucht, in denen Stimuli aus den Versuchen von Beutelmann und Brand (2006) verwendet werden. Daraus folgt die Hypothese:

Hypothese 1

Die SRTs der normalhörenden Versuchspersonen in den Validierungsbedingungen I und II unterscheiden sich nicht von denjenigen, die von Beutelmann und Brand (2006) für die selben Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnungen berichtet wurden.

Es wird eine systematische Untersuchung der Sprachindizes bei der Anwendung im Fahrzeug angestrebt. So wird in der Mischbedingung I das Sprachsignal aus der Validierungsbedingung I in einem Fahrzeuginnenraumgeräusch dargeboten. In der Mischbedingung II hingegen wird ein Sprachsignal aus dem Fahrzeug im Störgeräusch aus der Validierungsbedingung I präsentiert (siehe Tabelle 6.1). Aufgrund erster Befunde zur Anwendung der Sprachindizes im Kfz (Morrison & Casali, 1997; Jung et al., 2008) wird davon ausgegangen, dass die Anwendung in der Fahrzeugsituation keine Veränderungen der Modellgüte der Sprachindizes im Vergleich zur Validierungsbedingung I hervorruft. Die Modellgüte wird dabei als Differenz zwischen Empirie und Modellvorhersage interpretiert und für die untersuchten Bedingungen verglichen. Entsprechend lautet die folgende Hypothese:

Hypothese 2

Die Modellgüte der Sprachindizes in den Mischbedingungen I und II unterscheidet sich nicht von derjenigen, die in der Validierungsbedingung I erzielt wird. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Die Untersuchung der Sprachindizes im Fahrzeug erfolgt anhand von sieben ausgewählten Bedingungen, die sich bzgl. der Karosserie, Geschwindigkeit und Sitzposition des Hörers unterscheiden (siehe Tabelle 6.1, Hauptbedingungen I bis VII). In den, in Kapitel 5 dargestellten Spektren konnten sowohl im Sprachsignal als auch im Störgeräusch Pegeldifferenzen nachgewiesen werden. Pegeldifferenzen und Laufzeitunterschiede führen, wie bereits im Kapitel 3.2.2.3 beschrieben, zu einer Verbesserung der Sprachverständlichkeit bei binauralem Hören. Beutelmann und Brand (2006) hatten in ihren Untersuchungen zeigen können, dass das BSIM die Sprachverständlichkeit für Situationen mit verschiedenen Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnungen sehr gut vorhersagen kann. Deshalb ist anzunehmen, dass das BSIM sowohl in den Mischbedingungen als auch bei der Anwendung im Fahrzeug (Hauptbedingungen I - VII) die Sprachverständlichkeit besser vorhersagt als der monaurale SII. Die entsprechende Hypothese lautet:

Hypothese 3

Die Modellgüte des BSIM ist in den Mischbedingungen I und II und den Hauptbedingungen I bis VII höher als die des SII. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Die bisherigen Anwendungen der Sprachindizes im Kfz erfolgten unter der Annahme, dass die Sprachindizes die Sprachverständlichkeit fehlerfrei berechnen (Farina et al., 2003; Bozzoli & Farina, 2004; Schucht et al., 2008). Einige Autoren untersuchten auch Korrelationen zwischen Sprachindexwerten und empirischer Sprachverständlichkeit (Morrison & Casali, 1997; Jung et al., 2008). Bis dato fehlen aber systematische Untersuchungen zur absoluten Modellgüte der Sprachindizes im Kfz. Für eine valide Anwendung im Fahrzeug dürfte sich die vorhergesagte nicht von der empirischen Sprachverständlichkeit unterscheiden. Als Datenbasis für diesen Vergleich dienen bei den Hörgeschädigten die empirischen und die vorhergesagten SRTs. Da für alle Normalhörenden aus später dargestellten Gründen (siehe Kapitel 6.2.5) von den Sprachindizes der selbe Wert berechnet wird, muss für diese der Vergleich im Sinne der Modellgüte als Differenz zwischen Empirie und Modellvorhersage interpretiert werden. Ein valides Modell darf dann keine Differenz zwischen Empirie und Modell aufweisen, d.h. die Modellgüte muss 0 betragen. Daraus ergibt sich folgende Hypothese:

Hypothese 4

Die Modellvorhersage des BSIM unterscheidet sich in den Hauptbedingungen I bis VII nicht von den empirischen SRTs (Hörgeschädigte) bzw. die Modellgüte des BSIM ist gleich 0 (Normalhörende).

Im Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass, in Abhängigkeit der Karosserie, der Geschwindigkeit und der Sitzposition Pegeldifferenzen an den Ohren auftreten. Diese sind als einfachste Manifestation einer binaural wirksamen Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnung im Kfz zu verstehen. Für das BSIM ist gegenüber dem SII eine stabilere Vorhersage in binauralen Hörsituationen zu erwarten, weil es die Vorteile im empirischen Sprachverstehen aufgrund der auftretenden Pegel- und Laufzeitunterschiede zusätzlich modelliert (vgl. Kapitel 3.2.2.3 und 3.3). Dies sollte dazu führen, dass die Modellgüte des BSIM in den Bedingungen mit unterschiedlichem binauralen Vorteil gleich hoch ist, während dies für den SII nicht zu erwarten ist. Die entsprechenden Hypothesen lauten:

Hypothese 5

Die Modellgüte des BSIM unterscheidet sich nicht in Abhängigkeit der Sitzposition, der Geschwindigkeit und der Karosserie. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Hypothese 6

Die Modellgüte des SII unterscheidet sich in Abhängigkeit der Sitzposition, der Geschwindigkeit und der Karosserie. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Wie im Kapitel 5 ebenfalls beschrieben, unterscheiden sich neben den Pegeldifferenzen auch die Frequenz- und Modulationsspektren innerhalb eines Fahrzeuges in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Sitzposition. Da die empirische Sprachverständlichkeit, wie in den Kapiteln 2 und 3.2.2.3 beschrieben, von diesen Faktoren beeinflusst wird, sollten auch Unterschiede in den SRTs der Versuchspersonen auftreten. Daraus ergibt sich folgende Hypothese:

Hypothese 7

Die empirischen SRTs der normalhörenden und der hörgeschädigten Versuchspersonen unterscheiden sich innerhalb eines Fahrzeuges in Abhängigkeit der Sitzposition und der Geschwindigkeit.

Auf einen Vergleich der SRT-Werte des BSIM bzw. des SII mit den SRT-Werten des STI muss verzichtet werden, da der im Handel erhältliche STI nur die Indexwerte berechnet. Für die weiterführende Diskussion werden deshalb lediglich die Korrelationen zwischen empirischen SRTs und den untersuchten Indexwerten über die Hauptbedingungen I bis VII dargestellt. Der normierte STI nach DIN IEC 60268-16 (DIN, 2009) beinhaltet keine Korrektur der Werte anhand der Hörschwelle, sodass nur die Werte der Normalhörenden dargestellt werden.

6.2 Methode

6.2.1 Personen

Am Experiment 1 nahmen insgesamt 16 Personen teil. Sieben Personen wurden nach ihrem Hörvermögen der Gruppe der Normalhörenden und neun der Gruppe der Hörgeschädigten zugeteilt. Die normalhörenden Versuchspersonen waren Studenten und Studentinnen der Universität Erlangen-Nürnberg. Die hörgeschädigten Versuchspersonen waren Kunden der Firmen KIND Hörgeräte und Siemens oder rekrutierten sich aus deren Bekanntenkreis.

Die Normalhörenden waren zwischen 24 und 31 Jahren alt, im Durchschnitt rund 28 Jahre. Drei Versuchspersonen waren weiblichen, vier männlichen Geschlechts. Eine Versuchsperson gab an, früher unter Tinnitus gelitten zu haben. Keine der Versuchspersonen hatte akute Hörprobleme.

Die Hörgeschädigten waren zwischen 14 und 61 Jahren alt, im Mittel 32 Jahre. Vier Versuchspersonen waren weiblichen, fünf männlichen Geschlechts. Nach Angabe der Versuchspersonen waren sechs der Hörschäden Schädigungen des Innenohres und einer ein Mittelohrschaden. Zwei Versuchspersonen machten keine Angaben zur Ursache ihres Hörverlusts. Vier der Versuchspersonen waren Hörgeräteträger.

Eine hörgeschädigte Versuchsperson wurde aus den weiteren Auswertungen ausgeschlossen, weil ihre Sprachverständlichkeitsschwellen deutlich besser waren, als das erhobene Tonaudiogramm hätte erwarten lassen. Da die Vorhersagen der Sprachindizes auf dem Tonaudiogramm basieren, werden diese zwangsläufig zu falschen Aussagen führen. Die weiteren Auswertungen wurden deshalb in der Gruppe der Hörgeschädigten mit nur 8 Versuchspersonen durchgeführt.

6.2.2 Versuchsaufbau

6.2.2.1 Apparatur

Der Versuch fand in einem Labor an der Universität Erlangen-Nürnberg statt. In der Abbildung 6.1 ist die Versuchsanordnung zu sehen. Für die Erhebung der Daten wurde ein PC mit einem Pentium R4-Prozessor mit der Soundkarte RME HDSP 9632 benutzt. Zusätzlich wurden die Stimuli über einen Kopfhörerverstärker Phone-Amp G93 der Firma Lake People verstärkt. Als Kopfhörer wurde ein Sennheiser HDA 200 verwendet, der speziell für die Anwendung mit einem Audiometer entwickelt wurde. Der HDA 200 ist ein circumauraler Kopfhörer, der auch bei hohen Pegeln Signale verzerrungsfrei wiedergibt. Außerdem bietet er eine gute passive Dämmung, wodurch bei der Erhebung der Hörschwellen Störungen durch Außengeräusche vermieden werden können. Als Audiometer wurde das Aurical Plus der Firma GN Otometrics verwendet und diente zusammen mit der Software NOAH 3.05 der Audiometrie und der Archivierung der Hörfähigkeit der Versuchspersonen. Die Sprachverständlichkeit wurde mit dem Oldenburger Satztest



Abbildung 6.1: Versuchsanordnung für die Experimente 1 und 2 im Labor II an der Universität Erlangen-Nürnberg.

ermittelt, der in den Oldenburger Messprogrammen der Firma Hoertech in der Version 1.3.0.8 integriert war.

6.2.2.2 Stimuli

Als Sprachsignal wurde der Oldenburger Satztest (OLSA; Wagener et al., 1999a, 1999b, 1999c) verwendet. Der OLSA besteht aus verschiedenen Sätzen mit fünf Wörtern. Die Syntax aller Sätze war Name, Verb, Zahlwort, Adjektiv, Objekt. Die Tabelle 6.2 zeigt die Basisliste des OLSA, aus der durch gezielte Mischung der einzelnen Bestandteile die unterschiedlichen Sätze gewonnen werden. Die Sätze besitzen keine inhaltliche Redundanz, wodurch die Sprachverständlichkeit aus der Diskrimination der einzelnen Worte erschlossen werden kann. Der Sprachtest weist eine Gesamtdiskrimination von 17,7% pro dB bei einer Streuung von 1,6% auf (Wagener et al., 1999a). Das Störgeräusch des OLSA ist ein Sprachrauschen, in welchem die Sätze mit zufälliger zeitlicher Verschiebung dreißigfach überlagert sind. Dadurch hat das Rauschen ein Langzeitspektrum, welches den Sätzen entspricht (Wagener et al., 1999b).

Durch die Faltung der Stimuli mit den Außenohrübertragungsfunktionen (Head Related Transfer Function, HRTF) eines KEMAR-Kunstkopfes aus einer öffentlich zugänglichen

Tabelle 6.2: Basisliste des Oldenburger Satztests.

Name	Verb	Zahl	Adjektiv	Objekt
Peter	bekommt	drei	große	Blumen
Kerstin	sieht	neun	kleine	Tassen
Tanja	kauft	sieben	alte	Autos
Ulrich	gibt	acht	nasse	Bilder
Britta	schenkt	vier	schwere	Dosen
Wolfgang	verleiht	fünf	grüne	Sessel
Stefan	hat	zwei	teure	Messer
Thomas	gewann	achtzehn	schöne	Schuhe
Doris	nahm	elf	rote	Steine
Nina	mal	zwölf	weiße	Ringe

Datenbank (Algazi, Duda & Thompson, 2001) wurden für die Sprachaudiometrie verschiedene räumliche Anordnungen der Sprachsignale und Störgeräusche simuliert.

Außerdem wurden die Sprachsignale mit den Impulsantworten aus den Fahrzeugen, wie bereits unter Kapitel 5.2.2 beschrieben, gefaltet. Dadurch wurden die akustischen Bedingungen bei der Wiedergabe von Sprache im Fahrzeug simuliert. Die Störgeräusche für die Erhebung der Sprachverständlichkeit im Fahrzeug wurden aus den binauralen Aufnahmen, die im Kapitel 5 dargestellt wurden, ausgewählt.

Der Ausgabepegel der Signale über den Kopfhörer an die Versuchspersonen entsprach nicht der aufgezeichneten Lautstärke. Für die Sprachaudiometrie wurden sowohl das Sprachsignal als auch das Störgeräusch auf 65 dB(SPL) und damit auf einen SNR von 0dB kalibriert. Für die Kalibrierung wurden die Signale über den Kopfhörer wiedergegeben und der Pegel am linken Kanal des HMS III-Kunstkopfs bestimmt.

6.2.3 Versuchsplan

Jede Versuchsperson durchlief elf akustische Bedingungen (siehe Tabelle 6.1), in denen jeweils der SRT als abhängige Variable gemessen wurde.

Die Validierungsmessung I bildet folgende akustische Situation ab: Sowohl Sprache (Sätze des OLSA) als auch das Störgeräusch (Sprachrauschen des OLSA) werden in einem reflektionsarmen Raum dem Hörer von vorn (0°) dargeboten. Diese Bedingung wurde jeder Versuchsperson vor den experimentellen Messungen auch in zwei Übungsdurchläufen präsentiert. Auf die Darstellung der Ergebnisse der Übungsmessungen wird im weiteren Verlauf der Arbeit verzichtet.

Die Validierungsmessung II simulierte die Darbietung des Sprachsignals des OLSA von vorn (0°) und des Störgeräuschs von 100° links in einem reflektionsarmen Raum.

In der Mischbedingung I wurden die OLSA-Sätze der Validierung I im Störgeräusch der Hauptbedingung I (150km/h, Beifahrersitz, Mittelklasse Kombi) dargeboten. Die Mischbedingung II nutzte das Sprachsignal aus der Hauptbedingung I (Entertainment, Beifahrersitz, Mittelklasse Kombi) im Störgeräusch der Validierung I.

Die Hauptbedingungen I - VII simulierten die akustischen Bedingungen im Fahrzeug. Dabei wurde in den Bedingungen I bis V die Auswirkung der Karosserie auf die Sprachverständlichkeit untersucht (vgl. Tabelle 6.1). Zusätzlich wurden im Vergleich zu Bedingung I (Entertainment, Beifahrersitz, 150km/h, Mittelklasse Kombi) die Sitzposition (Bedingung VI: Rückbank) und die Geschwindigkeit (Bedingung VII: 50km/h) variiert.

Zusätzlich wurden die SRTs durch den SII und das BSIM für jede der untersuchten Bedingungen modelliert, um diese mit den empirischen SRTs zur Untersuchung der Modellgüte zu vergleichen. Beide Sprachindizes berechnen für jeden Hörgeschädigten in jeder Bedingung einen SRT. Dies gilt nicht für die Normalhörenden, für die innerhalb einer Bedingung derselbe SRT berechnet wird.

6.2.4 Durchführung

Versuchteil I	Zeit	Versuchteil II	Zeit	Versuchteil III	Zeit
Begrüßung & Instruktion	5 min	Übung		Hauptbedingungen	85 min
Audiometrie		Pause	30 min		
Pause	15 min	Validierungs- und Mischbedingungen			
MCL		Pause	50 min	Fragebogen, Debriefing, Entlohnung	90 min
Pause	20 min				

Abbildung 6.2: Versuchsablauf im Experiment 1.

Wie der Abbildung 6.2 zu entnehmen ist, wurden die Versuchspersonen zuerst von der Versuchsleitung begrüßt und in den Untersuchungsraum geführt. Dort nahmen sie auf dem dafür vorgesehenen Stuhl Platz und wurden mündlich anhand eines Gesprächsleitfadens über den Versuchsablauf informiert. Dann wurde von allen Versuchspersonen die Hörschwelle anhand einer Tonaudiometrie bestimmt. Diese Angaben dienen der Einteilung der Versuchspersonen in die Normalhörenden- bzw. Hörgeschädigten-Gruppe und als Eingangsgröße in die Sprachindizes. Bei den Hörgeschädigten wurde zusätzlich der Pegel angenehmen Hörens (Most Comfortable Level, MCL) bestimmt. Dieser Pegel wurde für die anschließende Sprachaudiometrie benötigt.

Danach wurde die Sprachverständlichkeit in den in Tabelle 6.1 dargestellten Sprachsignal-Störgeräusch-Kombinationen erhoben. Alle Versuchspersonen durchliefen zuerst die beiden Übungsmessungen, um Trainingseffekte in den auszuwertenden Daten zu vermeiden. Im Anschluss wurden die Validierungs- und Mischbedingungen in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten, um systematische Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Dieser Versuchsteil nahm in etwa 20 Minuten in Anspruch. Nach einer weiteren Pause wurden die Messungen zur Sprachverständlichkeit in den Hauptbedingungen durchgeführt; ebenfalls pseudorandomisiert.

Nach dieser in etwa 35 Minuten dauernden Messung füllten die Versuchspersonen noch einen Fragebogen zu demographischen Angaben und Fahrgewohnheiten aus und wurden durch Bestätigung der Versuchspersonenstunden bzw. ein festgelegtes Entgelt entlohnt. Falls es gewünscht war, erhielten die Versuchspersonen zum Schluss weitere Informationen über den Versuch und wurden nach sonstigen Anmerkungen gefragt.

Die Pausen einbezogen, erstreckte sich der Versuch damit über ca. 1,5 Stunden.

Instruktion

Den Versuchspersonen wurde erklärt, dass es sich um ein Experiment zum Sprachverstehen im Fahrzeug handeln würde. Zuerst würde Ihre Hörfähigkeit ermittelt und es sei ihre Aufgabe anzugeben, sobald sie einen Ton ganz leise hören würden. Es könnten höhere und tiefere Töne sein. Den hörgeschädigten Versuchspersonen wurde weiterhin erklärt, dass ihr individueller Pegel angenehmen Hörens ermittelt würde. Dafür würden sie ein Rauschen hören, das immer etwas lauter werden würde. Sie sollten der Versuchsleiterin Bescheid geben, wenn das Rauschen gut hörbar und angenehm laut sei.

Danach würden verschiedene Tests zum Sprachverstehen im Störgeräusch durchgeführt. Dabei sei Ihre Aufgabe, den gesamten Satz bzw. einzelne verstandene Wörter nachzusprechen. Dass nur einzelne Wörter zu verstehen seien, könne oft der Fall sein, weil man den Punkt für 50% Sprachverstehen suche. Die Versuchsperson solle deshalb nicht frustriert sein. Es wurde ihnen als Beispielsatz „Peter kauft zehn nasse Säcke.“ genannt und erklärt, dass die Sätze sinnlos seien, damit einzelne Wörter nicht aus dem Kontext zu erschließen wären. Im Anschluss hätten Sie noch einen Fragebogen auszufüllen.

Außerdem wurde den Versuchspersonen erklärt, dass Pausen zwischen den Testblöcken vorgesehen wären. Falls sie weitere Pausen benötigten sollten, sei dies durch Absetzen des Kopfhörers nach einzelnen Testreihen anzuzeigen.

Tonaudiometrie zur Bestimmung der Hörschwelle

Die Hörschwelle wurde mittels Herstellungsmethode (Goldstein & Herbst, 2002) mit Sinustönen bestimmt. Zuerst wurde von 1kHz ausgehend in aufsteigender Reihenfolge bis 6kHz gemessen. Danach wurde die Messung bei 1kHz wiederholt und anschließend die Schwelle absteigend bis 250Hz bestimmt. Begonnen wurde mit dem rechten Ohr, danach wurde das linke vermessen.

Ermittlung der Schwelle angenehmen Hörens

Zusätzlich zur Audiometrie wurde bei den schwerhörenden Versuchspersonen der Pegel angenehmen Hörens ermittelt (Most Comfortable Level, MCL). Der MCL ist die Lautstärke eines Breitbandrauschens, welche zu einem deutlich wahrnehmbaren, aber angenehmen Eindruck führt.

Sprachaudiometrie

Die Sprachverständlichkeit im Störgeräusch verbessert sich durch Übung. Von Wagener et al. (1999a) wird dieser Trainingseffekt auf 1dB in den ersten beiden Messungen beziffert. Ein weiteres dB wird durch vier weitere Messungen erklärt. In Anlehnung an die

Empfehlung von Wagener et al. (1999a) für die Durchführung der Sprachaudiometrie in der Praxis musste deshalb jede Versuchsperson zwei Übungsmessungen durchlaufen. Innerhalb einer Messung wurden 20 Sätze über Kopfhörer dargeboten, um den SRT sukzessiv zu bestimmen. Die von den Versuchspersonen richtig verstandenen und nachgesprochenen Worte wurden von der Versuchsleitung in die Oldenburger Messprogramme eingegeben. Der Störgeräuschpegel wurde für alle Messungen mit den Normalhörenden konstant auf 65dB(SPL) gehalten. Anhand eines adaptiven Steuerungsalgorithmus' (Brand & Kollmeier, 2002) wurde ausgehend von 65 dB(SPL) der Sprachpegel für den nächsten Satz automatisch gewählt. Der Algorithmus orientiert sich dabei an der Verständlichkeit des vorherigen Satzes. Die Sprachaudiometrie der Hörgeschädigten wurde wegen der erhöhten Hörschwelle bei deren individuellem MCL durchgeführt.

6.2.5 Modellierung der Sprachverständlichkeit durch die Sprachindizes

Die Sprachverständlichkeit wurde mit dem in Kapitel 3.2.2.3 beschriebenen BSIM von Beutelmann und Brand (2006) modelliert, welches als Programm in MathWorks MATLAB implementiert war.

Als Eingangsgrößen in das BSIM wurden die in den Kapiteln 6.2.2.2 und 6.2.3 beschriebenen Stimuli genutzt. Als Sprachsignal wurde anstelle der einzelnen Sätze das Sprachrauschen des OLSA verwendet, um eine mittlere Vorhersage für das Sprachmaterial des OLSA zu erhalten. Zusätzlich ging in die Berechnungen für die Hörgeschädigten deren individuelles Tonaudiogramm ein. Auf die Eingabe der Audiogramme der Normalhörenden wurde verzichtet, weil Beutelmann und Brand (2006) gezeigt hatten, dass das Modell für alle Normalhörenden unabhängig von deren individuellen Hörschwelle den selben SRT berechnet. Dies hängt mit der Annahme der Modelle zusammen, dass bei Normalhörenden die Ruhehörschwelle aufgrund des neuronalen Rauschens während des Hörens bei 20 dB(HL) liegt.

Für die Berechnung des monauralen SII wurde das BSIM so modifiziert, dass zusätzlich zum binauralen auch der monaurale Wert ausgegeben werden konnte. Für diese Berechnung wurden die binauralen Prozesse umgangen und der SII, wie in der Norm ANSI S3.5-1997 (ANSI, 1997) beschrieben, anhand des monauralen SNR berechnet. Als Eingang in den monauralen Teil der Berechnung wurde die Summe der beiden Ohrkanäle genutzt. Für die Berechnung des STI wurde der auf dem Acoustilyzer AL 1 implementierte STI-PA (vgl. Kapitel 3.2.2.2.1) genutzt. Als Sprachsignal wurde das synthetische Messsignal des STI genutzt, welches ebenfalls mit den Übertragungsfunktionen aus den Fahrzeugen gefaltet worden war. Als Störgeräusch wurden die entsprechenden Aufnahmen aus den Fahrzeugen verwendet. Die Signalkette zur Bestimmung des STI sah folgendermaßen aus: Die Signale und Störgeräusche wurden als wav-Files in Adobe Audition 3.0 geladen und elektrisch in den Mikrofoneingang des AL 1 eingespeist. Die Kalibrierung erfolgte ebenfalls mit dem AL 1. Dafür wurde der jeweils linke Kanal des Sprachsignals und des

Störgeräuschs auf 65 dB(A) eingeppegelt. Anschließend wurden die Kanäle summiert und der STIPA bestimmt. Dies wurde 5 mal wiederholt. Der Mittelwert der Messungen wurde als STI-Wert weiterverwendet. Anpassungen an die individuelle Hörschwelle sind in dieser Messung nicht implementiert. Somit werden im Fortgang der Arbeit nur die STI-Werte für die Normalhörenden dargestellt.

6.2.6 Datenauswertung und Statistik

Die SRTs aus der Sprachaudiometrie wurden in den Oldenburger Messapplikationen abgespeichert und dann in eine SPSS-Datei eingepflegt. Die Tonaudiogramme wurden im Programm NOAH gespeichert und anschließend in einer Excel-Datei zusammengefasst. Durch die Verwendung der Audiogramme der Hörgeschädigten streuen die modellierten SRTs. Für die Normalhörenden gilt dagegen immer derselbe SRT. Infolge dessen müssen mit den Daten der Normalhörenden andere statistische Auswertungen erfolgen als für die Hörgeschädigten möglich waren.

Die Auswertungen erfolgten im Statistikprogramm PASW Statistics 17.0. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $\alpha = .05$ festgelegt. Im Rahmen der Inferenzstatistik wurden t-Tests und Varianzanalysen durchgeführt. Als Voraussetzungen wurde die Normalverteilung der Daten mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test und zusätzlich für die Varianzanalysen die Varianzhomogenität mit Hilfe des Levene-Tests bzw. des Box-Tests überprüft und die Sphärizität der Daten mit dem Mauchly-Test überprüft. Zur Spezifizierung von Mittelwertsunterschieden wurden Kontraste anhand einfacher Differenzen und post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur berechnet.

6.3 Ergebnisse 1

An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die vorgestellten Ergebnisse, einem Sprachtest entstammen, der mit gleich laut kalibrierten Signalen durchgeführt wurde. Dadurch kann eine generelle Vergleichbarkeit zwischen Situationen erreicht werden. Das heißt aber auch, dass nur spektrale Unterschiede zwischen den Sprachsignal-Störgeräusch-Situationen betrachtet werden.

Zu lesen sind die Werte folgendermaßen: je kleiner bzw. je negativer der SRT, desto leiser kann das Sprachsignal für das Erreichen der 50% Sprachverständlichkeit bei einem fixen Störgeräuschpegel sein. In der tatsächlichen Hörsituation würde dies bedeuten, dass für die Sprachverständlichkeit grundsätzlich bessere Voraussetzungen existieren. Die wahre Sprachverständlichkeit hängt aber zusätzlich vom Pegel der Sprache und des Störgeräusches in der realen Situation ab.

6.3.1 Tonaudiometrie

In der Gruppe der Normalhörenden überstieg die Hörschwelle bei keiner Frequenz 20dB(HL). Das mittlere Audiogramm der Hörgeschädigten ist in der Abbildung 6.3 dar-

gestellt. Auf die Messung der Unbehaglichkeitsschwelle (Uncomfortable Level, UCL) konnte wegen der geringen Pegel, die zur Bestimmung des SRT notwendig sind, verzichtet werden.

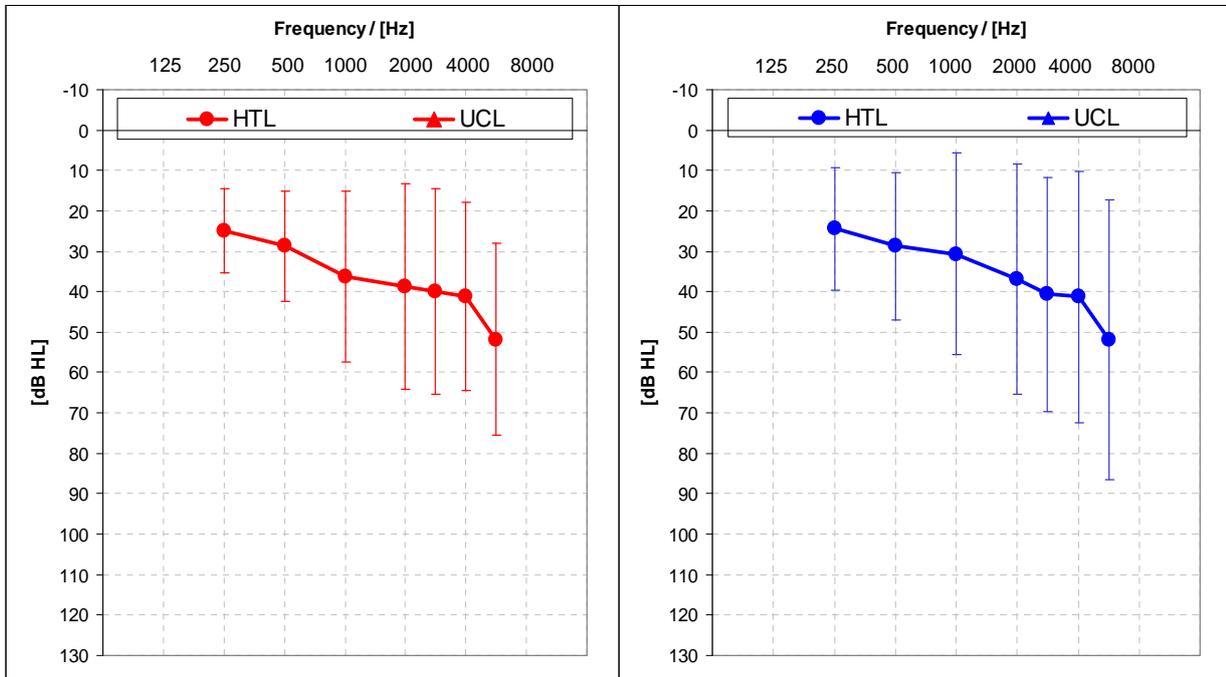


Abbildung 6.3: Mittlere Hörschwelle (HTL) der hörgeschädigten Versuchspersonen. Es wurde keine Unbehaglichkeitsschwelle (UCL) ermittelt. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar. Die roten Markierungen stehen für das rechte Ohr, blaue Markierungen für das linke Ohr.

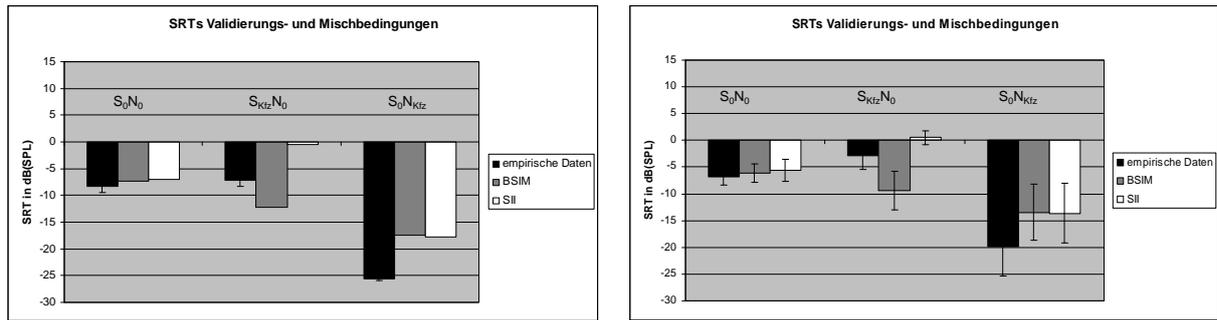
6.3.2 Güte der Sprachindizes in den Validierungs- und Mischbedingungen

Die Auswertung der Daten für die Validierung des Versuchsaufbaus erfolgte durch einfache t-Tests. Die SRTs der Normalhörenden stellten die Verteilung dar, welche gegen die berichteten Testwerte von Beutelmann und Brand (2006) auf signifikante Abweichungen getestet wurden. Die SRTs waren normalverteilt (siehe Anhang A1.1).

Für die Bedingung $OLSA S_0N_0$ wurde von Beutelmann und Brand (2006) mit normalhörenden Versuchspersonen ein SRT von -8,1dB berichtet. Im hier dargestellten Versuch wurde von den Normalhörenden ein mittlerer SRT von -8,3dB erreicht. Die beiden Werte unterschieden sich nicht signifikant ($t_{[1,6]} = -,972; n.s.$).

In der Bedingung $OLSA S_0N_{-100}$ wurde ein Wert von -20dB berichtet, die hier vorliegenden Daten wiesen einen mittleren SRT von -22,5dB auf. Damit unterschieden sich die beiden Werte signifikant ($t_{[1,6]} = -5,664; p \leq .01$).

Für den inferenzstatistischen Vergleich der Modellgüte in der Validierungsbedingung I ($OLSA S_0N_0$) mit den beiden Mischbedingungen ($OLSA S_0N_{Kfz}$, $OLSA S_{Kfz}N_0$) wurden die Differenzen zwischen Empirie und Modellvorhersagen genutzt. Diese Differenzen können als Güte der Modelle interpretiert werden.



(a) Normalhörende

(b) Hörgeschädigte

Abbildung 6.4: Mittelwerte der empirischen und der von den Sprachindizes berechneten SRTs für die Normalhörenden (a) und die Hörgeschädigten (b). Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar.

Es wurden getrennt für beide Hörergruppen Varianzanalysen mit Messwiederholung und Kontraste zur Spezifizierung der Unterschiede berechnet. Der Messwiederholungsfaktor beschrieb die unterschiedlichen akustischen *Situationen* ($OLSA S_0N_0$, $OLSA S_0N_{Kfz}$, $OLSA S_{Kfz}N_0$), als Zwischensubjektfaktor wurde *Modell* mit 2 Abstufungen (SII, BSIM) definiert. Als einfache Kontraste wurden $OLSA S_0N_0 - OLSA S_0N_{Kfz}$ und $OLSA S_0N_0 - OLSA S_{Kfz}N_0$ geplant, um die Güte der Modellvorhersagen in den Mischbedingungen mit der Validierungsbedingung I zu vergleichen. Die Voraussetzungen für die Varianzanalysen wurden erfüllt (siehe Anhang A1.2, A1.3 und A1.4).

In der Abbildung 6.4 sind die Mittelwerte der empirischen SRTs und der beiden Modellvorhersagen für $OLSA S_0N_0$ und für die Mischbedingungen dargestellt.

In der Gruppe der Normalhörenden wich die Modellvorhersage des BSIM in der Bedingung $OLSA S_0N_0$ -1,0dB von den Probandendaten ab, die des SII -1,2dB. Wie Tabelle 6.3 zu entnehmen ist, waren in der Bedingung S_0N_{Kfz} sowohl der Fehler des BSIM als auch des SII größer als in $OLSA S_0N_0$. Beide Modelle unterschätzten die Sprachverständlichkeit. Der Betrag des Vorhersagefehlers in der Bedingung $S_{Kfz}N_0$ war ebenfalls größer als in $OLSA S_0N_0$. Hier wurde allerdings durch das BSIM ein höherer SRT vorhergesagt, während der SII wiederum einen niedrigeren SRT berechnete. Somit wichen hier die Vorhersagen der beiden Modelle diametral von der tatsächlich erreichten Sprachverständlichkeit ab (siehe Tabelle 6.3).

Die Auswertung im Rahmen einer Varianzanalyse ergab einen signifikanten Haupteffekt auf dem Messwiederholungsfaktor *Situation* ($F_{[1,2]} = 309,860; p \leq .001$). Ebenfalls signifikant wurde die Wechselwirkung zwischen *Situation* und dem Zwischensubjektfaktor *Modell* ($F_{[1,2]} = 221,530; p \leq .001$). Die Ergebnisse der Berechnung der einfachen Kontraste sind ebenfalls in der Tabelle 6.3 dargestellt. Es zeigte sich, dass sich die Güte der Modellberechnung in der Situation S_0N_{Kfz} signifikant von der Referenzbedingung $OLSA$

Tabelle 6.3: Modellgüte des BSIM und des SII für die Validierungs- und Mischbedingungen und deren statistischer Vergleich durch einfache Kontraste. Die Modellgüte wird durch die Mittelwerte der Differenzen zwischen empirischen Daten und Modellvorhersage repräsentiert.

Bedingung	mittlere Modellgüte in dB											
	Normalhörende					Hörgeschädigte						
	SII	BSIM	einfache Kontraste gegen OLSA S_0N_0				SII	BSIM	einfache Kontraste gegen OLSA S_0N_0			
			Situation		Situation * Modell				Situation		Situation * Modell	
		F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.			
OLSA S_0N_0	-1,24	-0,99					-1,33	-0,76				
$S_{Kfz}N_0$	-6,71	5,04	1,041	n.s.	448,150	$p \leq .001$	-3,23	6,34	12,828	$p \leq .01$	39,599	$p \leq .001$
S_0N_{Kfz}	-7,78	-6,71	508,911	$p \leq .001$,984	n.s.	-8,81	-6,91	152,598	$p \leq .001$,505	n.s.

S_0N_0 unterschied. Zusätzlich gab es eine signifikante Wechselwirkung zwischen *Modell* und $S_{Kfz}N_0$.

Für die Hörgeschädigten ergab sich grundsätzlich das gleiche Bild wie bei den Normalhörenden. In der Validierungsbedingung I wich der SII -1,3dB und das BSIM -0,8dB vom empirischen SRT der Versuchspersonen ab. Die Abweichungen waren, wie der Tabelle 6.3 zu entnehmen, in beiden Mischbedingungen größer. Auch bei den Hörgeschädigten wichen in der Bedingung $S_{Kfz}N_0$ die Vorhersagen des BSIM und des SII diametral von den Probandendaten ab.

Auch für diese Gruppe ergab sich ein signifikanter Haupteffekt für *Situation* ($F_{[1,2]} = 86,719; p \leq .001$) und die Wechselwirkung mit *Modell* ($F_{[1,2]} = 34,511; p \leq .001$). In der Berechnung der Kontraste zeigte sich, dass sich sowohl die Situation S_0N_{Kfz} als auch $S_{Kfz}N_0$ signifikant von der Validierungsbedingung I unterschieden. Es ergab sich wiederum eine signifikante Wechselwirkung zwischen *Modell* und $S_{Kfz}N_0$. Die Werte sind der Tabelle 6.3 zu entnehmen.

6.3.3 Güte der Sprachindizes im Fahrzeug

6.3.3.1 Normalhörende

In der Abbildung 6.5 sind die empirischen Daten und die Vorhersagen des SII und des BSIM für die Normalhörenden dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Modelle in allen Bedingungen einen geringeren SRT vorhersagten als von den Versuchspersonen erreicht wurde.

Für die statistische Auswertung für die Gruppe der Normalhörenden wurden wiederum die Differenzen zwischen den empirischen Daten und dem jeweiligen Modellwert für alle Situationen und Versuchspersonen berechnet. Eine exakte Modellvorhersage würde eine Abweichung von 0 gegenüber den Probandendaten ergeben. Entsprechend wurden die berechneten Differenzen anhand eines Testwertes von 0 mit einfachen t-Tests auf statistisch signifikante Abweichungen hin untersucht. Der Vergleich der Güte des SII und des

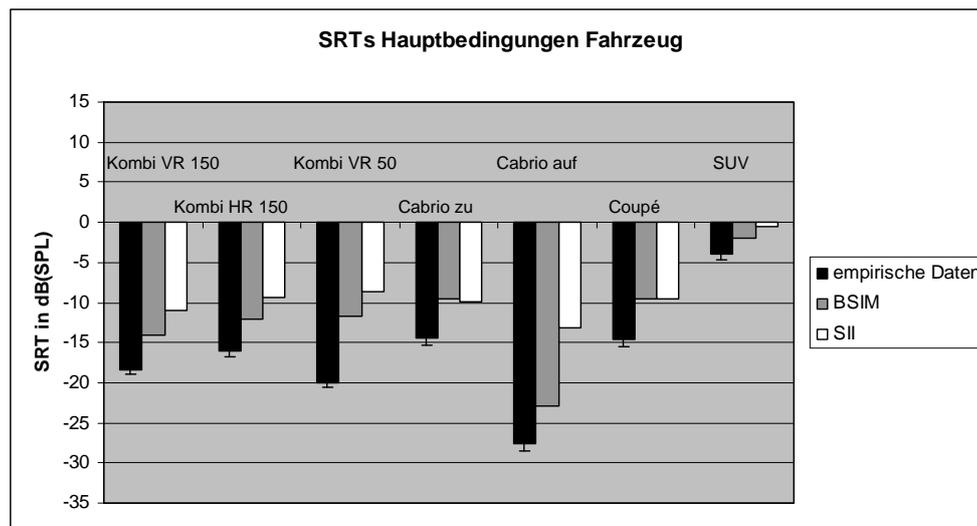


Abbildung 6.5: Mittelwerte der empirischen und der von den Sprachindizes berechneten SRTs der Normalhörenden in den untersuchten Hauptbedingungen. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar.

Tabelle 6.4: Modellgüte des SII und des BSIM bzgl. der empirischen Daten (einfache t-Tests) und der statistische Vergleich beider Sprachindizes (unabhängige t-Tests). Die Modellgüte wird durch die Mittelwerte der Differenzen zwischen empirischen Daten und Modellvorhersage repräsentiert.

Bedingung	mittlere Modellgüte in dB	einfacher t-Test SII			einfacher t-Test BSIM			unabhängiger t-Test SII - BSIM			
		T	df	Sig	T	df	Sig	T	df	Sig	
Kombi VR 150	-7,36	-28,957	6	p≤.001	-4,24	-16,684	6	p≤.001	8,678	12	p≤.001
Kombi HR 150	-6,65	-20,846	6	p≤.001	-3,86	-12,095	6	p≤.001	6,188	12	p≤.001
Kombi VR 50	-11,23	-47,847	6	p≤.001	-8,13	-34,640	6	p≤.001	9,338	12	p≤.001
Cabrio zu	-4,57	-12,843	6	p≤.001	-4,81	-13,518	6	p≤.001	-,477	12	n.s.
Cabrio auf	-14,56	-38,403	6	p≤.001	-4,71	-12,438	6	p≤.001	18,361	12	p≤.001
Coupé	-5,16	-16,287	6	p≤.001	-5,13	-16,224	6	p≤.001	,045	12	n.s.
SUV	-3,39	-13,232	6	p≤.001	-2,10	-8,195	6	p≤.001	3,562	12	p≤.01

BSIM erfolgte in Form von unabhängigen t-Tests zwischen den jeweiligen Differenzen. Die Anwendungsvoraussetzungen waren erfüllt (siehe Anhang A1.1).

Für die Bedingung *SUV* war die Differenz zwischen BSIM und dem Mittelwert der Probandendaten mit -2,1dB Abweichung am geringsten bzw. mit -3,4dB beim SII. Die größte Abweichung trat im Falle des SII in der Bedingung *Cabrio auf* mit -14,6dB auf, beim BSIM war dies die Situation *Kombi VR 50* mit -8,1dB.

Wie der Tabelle 6.4 zu entnehmen ist, war in allen Fällen die Differenz signifikant größer als 0. Der Vergleich der Güte des BSIM und des SII ergab eine signifikant bessere Vorhersage des BSIM in allen Fällen, bis auf die Bedingungen *Cabrio zu* und *Coupé*. Hier unterschieden sich die Vorhersagen nicht signifikant. Die Mittelwerte und die Ergebnisse der t-Tests sind ebenfalls der Tabelle 6.4 zu entnehmen.

Zur weiteren Betrachtung der Vorhersagegüte des SII und des BSIM im Fahrzeug wurden Korrelationen zwischen den mittleren empirischen SRTs und den Modell-SRTs berechnet. Die Korrelation zwischen empirischen SRTs und dem SII lag bei $r=.90$ ($p \leq .001$) und mit den Werten des BSIM betrug sie $r=.97$ ($p \leq .001$).

6.3.3.2 Hörgeschädigte

Die Datenauswertung für die Versuchspersonen mit Hörverlust konnte in einem Allgemeinen Linearen Modell erfolgen, weil hier sowohl die empirischen SRTs als auch die SRTs der beiden Sprachindizes Streuungen aufwiesen.

Als Zwischensubjektfaktor wurde *Modell* mit 3 Abstufungen (*Empirie*, *SII*, *BSIM*) festgelegt. Als Messwiederholung wurde dabei die Sprachverständlichkeit in den verschiedenen Fahrzeugen (Faktor *Kfz*; 7 Abstufungen) betrachtet. Zur Spezifizierung signifikanter Ergebnisse auf dem Faktor *Modell* wurden post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur berechnet.

Die empirischen SRTs der Hörgeschädigten und die für diese Gruppe berechneten Modell-SRTs waren normalverteilt (siehe Anhang A1.2). Durch den Levene-Test wurde die Homogenität der Varianzen auf dem Faktor *Modell* bestätigt. Der Box-M-Test dagegen zeigte, dass die Varianzhomogenität auf dem Messwiederholungsfaktor *Kfz* nicht gegeben war. Ebenso wiesen die Daten im Mauchly-Test Abweichungen von der Sphärizität auf (siehe Anhang A1.4). Da die Varianzanalyse robust gegen Abweichungen von der Varianzhomogenität ist, wenn normalverteilte Daten vorliegen (Zöfel, 2003), wurde diese trotzdem durchgeführt. Wegen der Verletzung der Sphärizitätsannahme wurde die Greenhouse-Geisser-Korrektur für die Auswertung der Daten verwendet.

Die empirischen Daten und die Vorhersagen der Modelle sind in der Abbildung 6.6 dargestellt. Auch in dieser Gruppe treten die kleinsten Abweichungen der Vorhersagen im Falle des *SUV* auf. Beim SII beläuft sich der Fehler auf -1,8dB beim BSIM auf -0,4dB. Die größten Abweichungen zeigen sich jeweils in der Bedingung *Cabrio auf* mit -13,4dB für den SII und -6,2dB beim BSIM.

Die inferenzstatistische Untersuchung ergab für den Faktor *Modell* ein signifikantes Ergebnis ($F_{[1,2]} = 4,753; p \leq .05$). Die Ergebnisse des post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den empirischen Daten und dem SII gab ($p \leq .05$). Aufgrund des ebenfalls signifikanten Messwiederholungsfaktors *Kfz* ($F_{[1,6]} = 350,383; p \leq .01$) wurden im Anschluss für die Unterschiede zwischen den empirischen Daten und dem SII einzelne t-Tests für die verschiedenen Fahrzeugbedingungen berechnet. Wie in der Tabelle 6.5 dargestellt, zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen Empirie und SII in allen Bedingungen bis auf den *SUV* und das *Coupé*.

Die Korrelation zwischen den empirischen Daten und dem SII lag bei $r=.93$ ($p \leq .001$). Mit dem BSIM betrug sie $r=.99$ ($p \leq .001$).

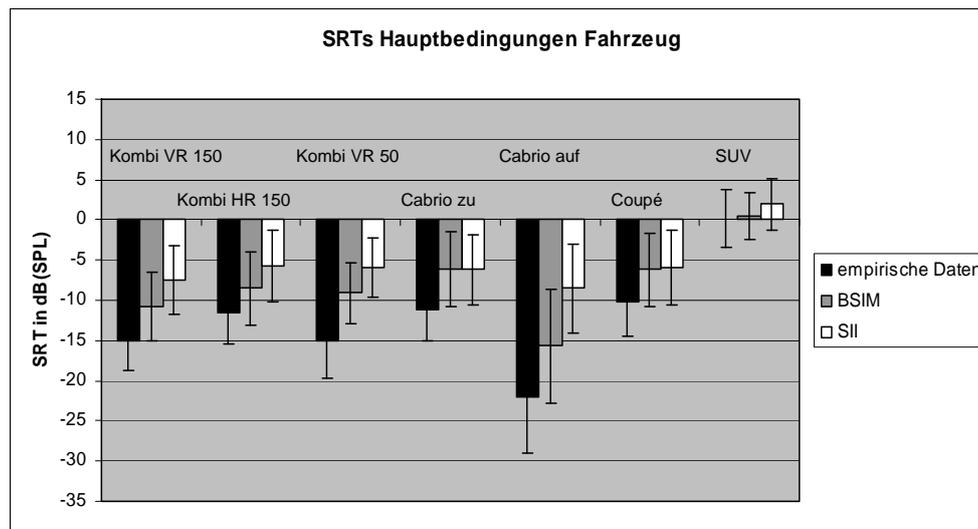


Abbildung 6.6: Mittelwerte der empirischen und der von den Sprachindizes berechneten SRTs für die hörgeschädigten Versuchspersonen in den Hauptbedingungen. Die Konventionen entsprechen Abbildung 6.4.

Tabelle 6.5: Mittelwerte der empirischen SRTs und des SII für die hörgeschädigten Versuchspersonen in den Hauptbedingungen und deren statistischer Vergleich mittels unabhängigem t-Test.

Bedingung	mittlerer SRT in dB		T	df	Signifikanz
	Empirie	SII			
Kombi VR 150	-15,07	-7,48	-3,803	14	p≤.01
Kombi HR 150	-11,49	-5,65	-2,760	14	p≤.05
Kombi VR 50	-15,00	-5,96	-4,261	14	p≤.001
Cabrio zu	-11,16	-6,21	-2,395	14	p≤.05
Cabrio auf	-21,93	-8,53	-4,236	14	p≤.001
Coupé	-10,23	-5,94	-1,946	14	p≤.10
SUV	0,14	1,97	-1,092	14	n.s.

6.3.4 Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte der Sprachindizes

Zur Überprüfung der Stabilität der Sprachindizes in Bezug auf die Einflüsse des Sitzplatzes, der Geschwindigkeit, der Baureihe und des Kabinenzustands wurden gepaarte t-Tests zwischen den betreffenden Situationen berechnet. Dazu wurden die Differenzen zwischen Modellvorhersage und Probandendaten im Sinne der Modellgüte bezüglich jeweils eines Einflussfaktors verglichen. Die Anwendungsvoraussetzungen für die statistischen Berechnungen wurden erfüllt (siehe Anhang A1.1 und A1.2).

6.3.4.1 Normalhörende

Für die Normalhörenden zeigte sich, dass sich die Modellgüte des SII in Bezug auf Sitzplatz, Geschwindigkeit, Kabinenzustand und Baureihe unterschied. Die Modellgüte des BSIM unterschied sich in Bezug auf Geschwindigkeit und Baureihe. Die genauen Werte sind der Tabelle 6.6 zu entnehmen.

Tabelle 6.6: Mittlere Modellgüte des SII und des BSIM und deren statistischer Vergleich mittels gepaarter t-Tests bzgl. der untersuchten Wirkgrößen für die normalhörenden Versuchspersonen.

Wirkgröße	Bedingungen	Modellgüte SII		gepaarter t-Test			Modellgüte BSIM		gepaarter t-Test		
				T	df	Signifikanz			T	df	Signifikanz
Sitzplatz	Kombi VR 150 – Kombi HR 150	-7,36	-6,65	-2,894	6	p≤.05	-4,24	-3,86	-1,560	6	n.s.
Geschwindigkeit	Kombi VR 150 – Kombi VR 50	-7,36	-11,23	11,284	6	p≤.001	-4,24	-8,13	11,343	6	p≤.001
Kabinenzustand	Cabrio zu – Cabrio auf	-4,57	-14,56	29,651	5	p≤.001	-4,81	-4,71	-,703	5	n.s.
Baureihe	Coupé - SUV	-5,16	-3,39	-9,553	6	p≤.001	-5,13	-2,10	-16,419	6	p≤.001

6.3.4.2 Hörgeschädigte

Für die Hörgeschädigten zeigte sich, dass sich die Modellgüte des SII in Bezug auf Sitzplatz, Kabinenzustand und Baureihe unterschied. Die Modellgüte des BSIM unterschied sich in Bezug auf Sitzplatz und Baureihe. Die genauen Werte sind der Tabelle 6.7 zu entnehmen.

Tabelle 6.7: Mittlere Modellgüte des SII und des BSIM und deren statistischer Vergleich mittels gepaarter t-Tests bzgl. der untersuchten Wirkgrößen für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Wirkgröße	Bedingungen	Modellgüte SII		gepaarter t-Test			Modellgüte BSIM		gepaarter t-Test		
				T	df	Signifikanz			T	df	Signifikanz
Sitzplatz	Kombi VR 150 – Kombi HR 150	-7,59	-5,83	-5,607	7	p≤.001	-4,29	-2,99	-3,831	7	p≤.01
Geschwindigkeit	Kombi VR 150 – Kombi VR 50	-7,59	-9,04	2,008	7	n.s.	-4,29	-5,91	2,345	7	n.s.
Kabinenzustand	Cabrio zu – Cabrio auf	-4,95	-13,40	7,410	7	p≤.001	-4,99	-6,23	1,380	7	n.s.
Baureihe	Coupé - SUV	-4,29	-1,83	-4,564	7	p≤.01	-4,03	-0,37	-6,873	7	p≤.001

6.3.5 Auswirkungen von Geschwindigkeit und Sitzposition auf die empirischen SRTs

Zum Vergleich der empirischen SRTs bei verschiedenen Geschwindigkeiten bzw. auf unterschiedlichen Sitzplätzen wurden paarweise t-Tests durchgeführt. Die Anwendungsvoraussetzungen wurden erfüllt (siehe Anhang A1.1 und A1.2).

6.3.5.1 Normalhörende

Bei 50 km/h im Kombi erreichten die normalhörenden Versuchspersonen eine signifikant bessere Sprachverständlichkeit (SRT = -19,9dB) als bei 150 km/h ($t_{[1,6]} = 4,665; p \leq .001$). In dieser Bedingung lag sie auf dem Beifahrersitz bei einem SRT von -18,3dB. Dieser Wert unterschied sich ebenfalls signifikant von der Sprachverständlichkeit im Font. Hier erreichten die Versuchspersonen einen durchschnittlichen SRT von -16,0dB ($t_{[1,6]} = -9,485; p \leq .001$).

6.3.5.2 Hörgeschädigte

Die Sprachverständlichkeit war auf dem Beifahrersitz im Kombi bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h mit einem SRT von -15,0dB nicht signifikant besser als bei 150 km/h, wo die Versuchspersonen einen SRT von -15,1dB erzielten ($t_{[1,7]} = -,147; n.s.$). Im Vergleich dazu erreichten die Versuchspersonen bei 150 km/h im Font eine signifikant schlechtere Sprachverständlichkeit mit einem SRT von -11,5dB ($t_{[1,7]} = -9,337; p \leq .001$).

6.4 Ergebnisse 2

Anhand der Auswertung der Daten, wie sie im Kapitel 6.3 erfolgte, wurde die eklatante Abnahme der Modellgüte bei der Vorhersage der Sprachverständlichkeit im Fahrzeug ersichtlich. Daraufhin wurde die Ursache für diese Fehlberechnung, die im Kapitel 6.5.3 ausführlicher dargestellt wird, gesucht. Die darauf folgende Anpassung des Modells bestand in einer Erweiterung der Gammaton-Filterbank um zwei weitere Tieftonkanäle mit den Mittenfrequenzen 108 und 73 Hz. Dadurch wurde eine Absenkung der unteren Grenzfrequenz des $BSIM_T$ bis auf 11 Hz erreicht. Die genauen Auswirkung auf die Modellierung durch das BSIM werden ebenfalls im Kapitel 6.5.3 dargestellt.

In diesem Teil der Arbeit werden die Ergebnisse mit einer überarbeiteten Version des BSIM, im Nachfolgenden $BSIM_T$ genannt, vorgestellt.

Auf eine erneute Berechnung und Auswertung des SII wurde verzichtet, weil bereits die Ergebnisse mit der ursprünglichen Variante zeigten, dass das BSIM im Fahrzeug eine genauere Vorhersage leistet als der SII. Aufgrund der getätigten Anpassungen sind keine Veränderungen im Vergleich der beiden Ansätze zu erwarten, da im erweiterten Frequenzbereich keine binauralen Effekte auf die Sprachverständlichkeit auftreten.

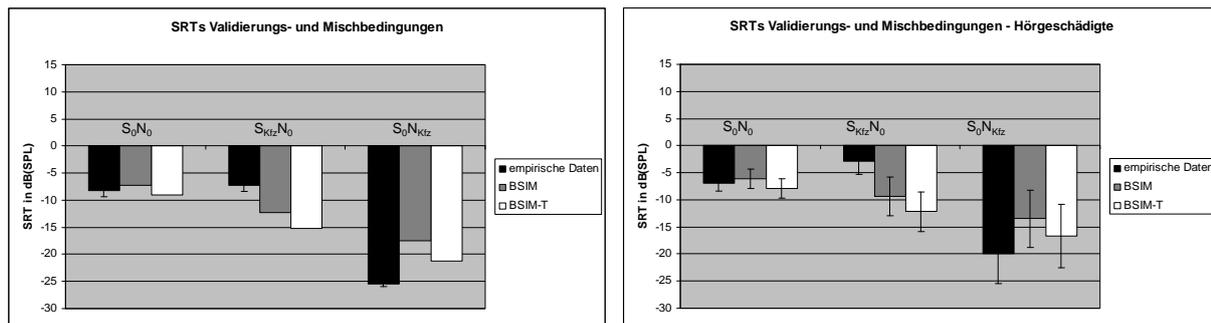
6.4.1 Güte des $BSIM_T$ in den Validierungs- und Mischbedingungen

Der Vergleich der Modellgüte der Validierungs- mit den Mischbedingungen erfolgte für die Normalhörenden und die Hörgeschädigten getrennt im Allgemeinen Linearen Modell mit Messwiederholung auf dem Faktor *Situation*. Die Modellgüte aller Situationen ($OLSA S_0N_0$, $OLSA S_0N_{Kfz}$, $OLSA S_{Kfz}N_0$) wurde auf signifikante Unterschiede untersucht. Zur Spezifizierung dieser Unterschiede wurden wiederum die einfachen Kontraste zwischen den Mischbedingungen und $OLSA S_0N_0$ als Referenzbedingung geplant. Die Voraussetzungen für die Varianzanalysen wurden erfüllt (siehe Anhang A1.8 und A1.9). In der Abbildung 6.7 sind die SRTs der Versuchspersonen, des BSIM und des $BSIM_T$ dargestellt. Das $BSIM_T$ wich in der Bedingung $OLSA S_0N_0$ 0,8dB von den Daten der Normalhörenden ab und 1,0dB von den Hörgeschädigten. Außerdem ergab sich in der Situation $OLSA S_0N_{Kfz}$ eine Verbesserung der Modellgüte. In der Situation $OLSA S_{Kfz}N_0$ verschlechterte sich die Vorhersage. Die genauen Werte sind Tabelle 6.8 zu entnehmen. Die Modellgüte in den Mischbedingungen unterschied sich signifikant von der in $OLSA$

Tabelle 6.8: Modellgüte des $BSIM_T$ für die Validierungs- und Mischbedingungen. Die Modellgüte wird durch die Mittelwerte der Differenzen zwischen empirischen Daten und dem $BSIM_T$ repräsentiert.

Bedingung	mittlere Modellgüte in dB					
	Normalhörende			Hörgeschädigte		
	einfache Kontraste gegen S_0N_0			einfache Kontraste gegen S_0N_0		
	$BSIM_T$	F	Sig	$BSIM_T$	F	Sig
OLSA S_0N_0	0,76			0,97		
$S_{Kfz}N_0$	7,96	351,057	$p \leq .001$	9,34	55,348	$p \leq .001$
S_0N_{Kfz}	-4,37	143,361	$p \leq .001$	-3,77	65,943	$p \leq .001$

S_0N_0 . Dies zeigte sich durch die signifikanten Haupteffekte ($F_{[1,2]} = 365,750; p \leq .001$), ($F_{[1,2]} = 85,340; p \leq .001$) und die signifikanten Kontraste (siehe Tabelle 6.8).



(a) Normalhörende

(b) Hörgeschädigte

Abbildung 6.7: Mittelwerte der empirischen und der von den Modellen berechneten SRTs für die Normalhörenden (a) und die Hörgeschädigten (b). Eine bessere Sprachverständlichkeit drückt sich dabei durch einen negativeren SRT aus. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar.

6.4.2 Güte des $BSIM_T$ im Fahrzeug

Der Vergleich der Modellvorhersage des $BSIM_T$ mit den empirischen Daten erfolgte wie bereits unter Kapitel 6.3.3 beschrieben anhand einfacher t-Tests. Zum Vergleich der Modellgüte des BSIM mit der des $BSIM_T$ wurden unabhängige t-Tests durchgeführt. Die Anwendungsvoraussetzungen wurden erfüllt (siehe Anhang A1.6 und A1.7).

6.4.2.1 Normalhörende

In der Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen im Vergleich zu den Berechnungen des BSIM und des $BSIM_T$ dargestellt.

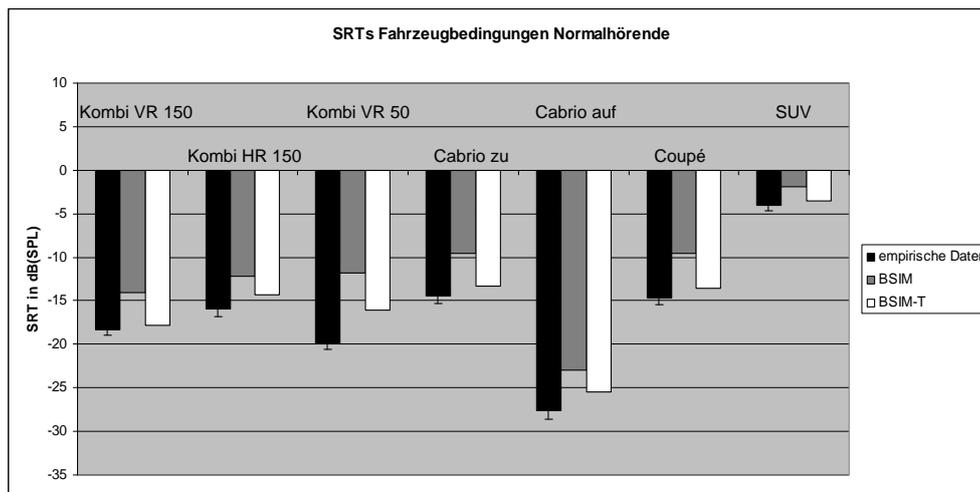


Abbildung 6.8: Mittelwerte und Standardabweichungen der empirischen SRTs und der Berechnungen des BSIM und des $BSIM_T$ für die Normalhörenden.

Die Modellgüte des $BSIM_T$ war in allen untersuchten Fahrzeugbedingungen signifikant besser als die des BSIM. Die Differenzen zwischen empirischen SRTs und $BSIM_T$ verkleinerten sich zwischen 1,7dB im *SUV* und 4,3dB im Kombi bei 50 km/h.

Die Abweichungen zwischen den empirischen SRTs und dem $BSIM_T$ lagen zwischen -0,4dB (*SUV*) und -3,9dB (*Kombi VR 50*). Trotzdem war die Güte lediglich in den Bedingungen *Kombi VR 150* und *SUV* ausreichend hoch, um keine statistisch signifikante Abweichung aufzuweisen. In allen anderen Bedingung unterschied sich die Modellgüte signifikant von 0. Die genauen Werte sind der Tabelle 6.9 zu entnehmen.

Tabelle 6.9: Ergebnisse zur Modellgüte des $BSIM_T$ in den Hauptbedingungen und dessen statistischer Vergleich durch einen einfachen t-Test in Bezug auf die Daten der Normalhörenden und die Ergebnisse des unabhängigen t-Tests zum Vergleich der Modellgüte von BSIM und $BSIM_T$.

Bedingung	mittlere Modellgüte in dB							
	t-Test bei einer Stichprobe				unabhängiger t-Test für BSIM und $BSIM_T$			
	$BSIM_T$	T	df	Signifikanz	BSIM	T	df	Signifikanz
Kombi VR 150	-,55	-2,169	6	n.s.	-4,24	-10,264	12	$p \leq .001$
Kombi HR 150	-1,61	-5,037	6	$p \leq .01$	-3,86	-4,991	12	$p \leq .001$
Kombi VR 50	-3,88	-16,535	6	$p \leq .001$	-8,13	-12,802	12	$p \leq .001$
Cabrio zu	-1,12	-3,145	6	$p \leq .05$	-4,81	-7,335	12	$p \leq .001$
Cabrio auf	-2,21	-5,841	6	$p \leq .01$	-4,71	-4,665	12	$p \leq .001$
Coupé	-1,13	-3,556	6	$p \leq .05$	-5,14	-8,957	12	$p \leq .001$
SUV	-,40	-1,556	6	n.s.	-2,10	-4,694	12	$p \leq .001$

In der Abbildung 6.9 sind die Streudiagramme zwischen den empirischen Daten und den Sprachindizes dargestellt. Die Indexwerte des $BSIM_T$ wurden, wie der SRT, anhand gleich kalibrierter Signale berechnet. Die Korrelation der empirischen SRTs mit dem $BSIM_T$ lag bei $r = .99$ ($p \leq .001$). Da die Berechnung des STI auf dB(A)-Signalen basiert, wurden die empirischen SRT-Werte in dB(A)-Werte umgerechnet und danach die Korre-

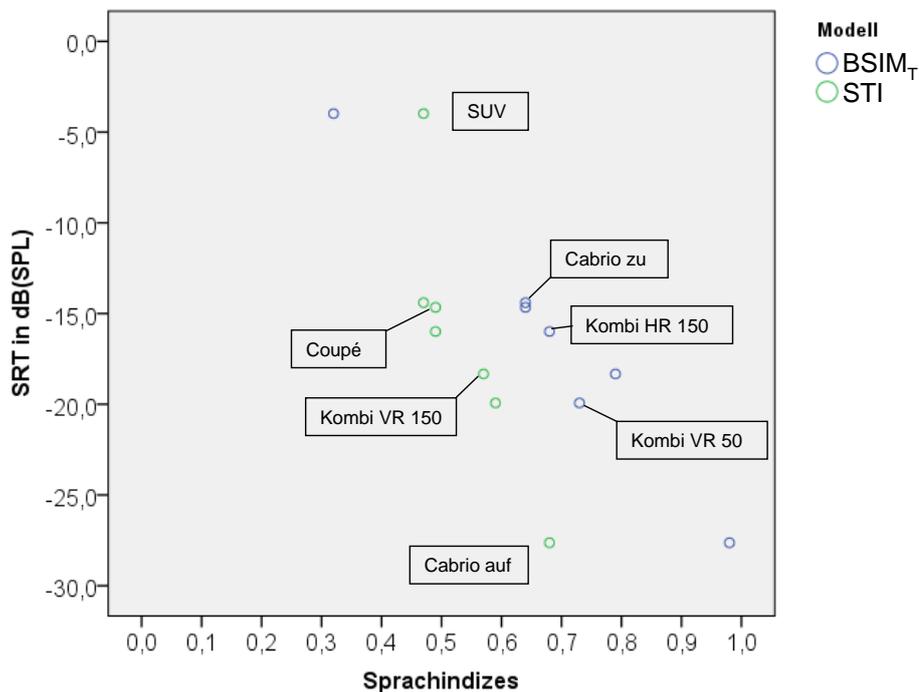


Abbildung 6.9: Streudiagramme zwischen den empirischen SRTs und den Sprachindizes. Die STI-Werte sind für einen besseren Überblick ebenfalls auf die SRTs in dB(SPL) bezogen.

lation berechnet. Für einen einfachen Überblick werden die STI-Werte, wie die Werte des $BSIM_T$ in Bezug auf die empirischen SRT-Schwellen in dB(SPL) dargestellt.

Es ergab sich eine Korrelation in Höhe von $r=.83$ ($p \leq .05$). Es ist zu erkennen, dass der STI im Allgemeinen einen geringeren Wert vorhersagt als das $BSIM_T$. Lediglich in der Bedingung *SUV* ist der Wert des STI größer. Auffällig ist auch die große Differenz zwischen STI und $BSIM_T$ in der Bedingung *Cabrio offen*.

6.4.2.2 Hörgeschädigte

Auch hier wies das $BSIM_T$ im Allgemeinen eine Erhöhung der Modellgüte auf (siehe Abbildung 6.10). Die Verbesserung lag zwischen 2,2dB im *Kombi HR 50* und 4,0dB in der Bedingung *Kombi VR 50*. Die statistische Auswertung ergab allerdings keine signifikante Verbesserung in den Bedingungen *Kombi HR 150*, *Cabrio auf* und *SUV* (siehe Tabelle 6.10). Es zeigte sich außerdem, dass sich die Modellgüte des $BSIM_T$ nicht von 0 unterschied (siehe Tabelle 6.10).

Die Korrelation zwischen den empirischen SRTs und dem $BSIM_T$ lag bei $r=.99$ ($p \leq .001$).

6.4.3 Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte des $BSIM_T$

Zur Überprüfung der Stabilität der Sprachindizes in Bezug auf die Einflüsse des Sitzplatzes, der Geschwindigkeit, der Baureihe und des Kabinenzustands wurden gepaarte t-Tests zwischen den betreffenden Situationen berechnet. Dazu wurden die Differenzen

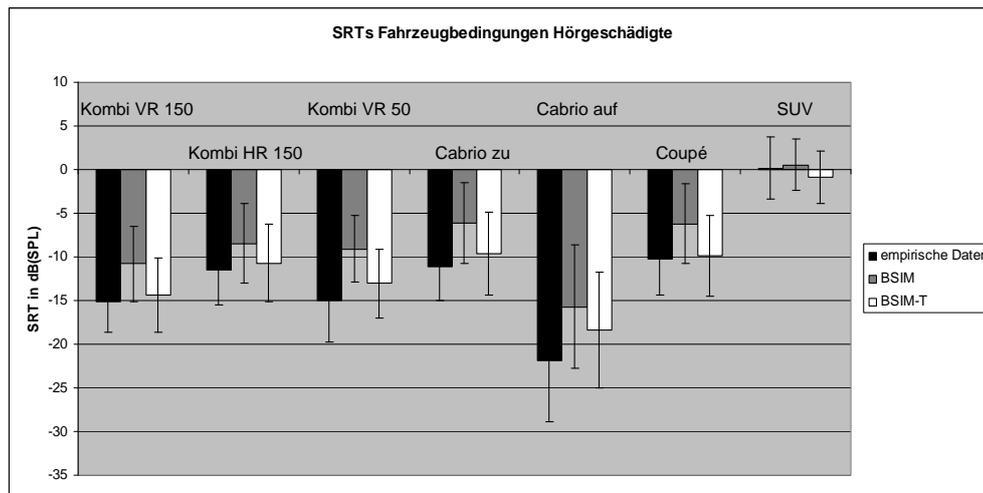


Abbildung 6.10: Mittelwerte und Standardabweichungen der empirischen SRTs und der Berechnungen des BSIM und des $BSIM_T$ für die Hörgeschädigten.

Tabelle 6.10: Ergebnisse zur Modellgüte des $BSIM_T$ in den Hauptbedingungen und dessen statistischer Vergleich durch einen einfachen t-Test in Bezug auf die Daten der Hörgeschädigten und die Ergebnisse des unabhängigen t-Tests zum Vergleich der Modellgüte von BSIM und $BSIM_T$.

Bedingung	mittlere Modellgüte in dB				unabhängiger t-Test für BSIM und $BSIM_T$			
	BSIM _T	T	df	Signifikanz	BSIM	T	df	Signifikanz
Kombi VR 150	-0,72	-,950	7	n.s.	-4,29	-3,102	14	p≤.01
Kombi HR 150	-0,77	-,824	7	n.s.	-3,00	-1,554	14	n.s.
Kombi VR 50	-1,95	-2,192	7	n.s.	-5,91	-2,955	14	p≤.01
Cabrio zu	-1,57	-1,901	7	n.s.	-4,99	-2,776	14	p≤.05
Cabrio auf	-3,58	-2,322	7	n.s.	-6,23	-1,154	14	n.s.
Coupé	-0,36	-,442	7	n.s.	-4,03	-2,962	14	p≤.01
SUV	0,99	1,470	7	n.s.	-0,37	-1,356	14	n.s.

zwischen Modellvorhersage und Probandendaten im Sinne der Modellgüte bezüglich jeweils eines Einflussfaktors verglichen.

Die Anwendungsvoraussetzungen für die t-Tests wurden erfüllt (siehe Anhang A1.6 und A1.7).

6.4.3.1 Normalhörende

Für die Normalhörenden zeigte sich, dass sich die Modellgüte des $BSIM_T$ in Bezug auf Sitzplatz, Geschwindigkeit, Kabinenzustand und Baureihe unterschied. Die genauen Werte sind der Tabelle 6.11 zu entnehmen.

6.4.3.2 Hörgeschädigte

Für die Hörgeschädigten zeigte sich, dass sich die Modellgüte des $BSIM_T$ in Bezug auf die Baureihe unterschied. Die genauen Werte sind der Tabelle 6.9 zu entnehmen.

Tabelle 6.11: Mittlere Modellgüte des $BSIM_t$ und dessen statistischer Vergleich der untersuchten Wirkgrößen mittels gepaarter t-Tests für die normalhörenden und hörgeschädigten Versuchspersonen.

Wirkgröße	Bedingungen	Normalhörende					Hörgeschädigte				
		mittlere Modellgüte in dB		gepaarter t-Test			mittlere Modellgüte in dB		gepaarter t-Test		
				T	df	Signifikanz			T	df	Signifikanz
Sitzplatz	Kombi VR 150 – Kombi HR 150	-0,55	-1,61	4,263	6	$p \leq .01$	-0,72	-0,77	,169	6	n.s.
Geschwindigkeit	Kombi VR 150 – Kombi VR 50	-0,55	-3,88	9,710	6	$p \leq .001$	-0,72	-1,95	2,030	6	n.s.
Kabinenzustand	Cabrio zu – Cabrio auf	-1,12	-2,21	2,881	5	$p \leq .05$	-1,57	-3,58	2,102	5	n.s.
Baureihe	Coupé - SUV	-1,13	-,40	-3,931	6	$p \leq .01$	-0,36	0,99	-2,681	6	$p \leq .05$

6.5 Diskussion

Das Experiment 1 diente der Untersuchung der Modellgüte der Sprachindizes bei deren Anwendung im Fahrzeuginnenraum mit speziellem Fokus auf den Einfluss verschiedener Störgeräuschbedingungen. Dazu wurden die empirisch erhobenen SRTs mit den von SII, BSIM und $BSIM_T$ berechneten Werten verglichen.

Im ersten Schritt sollte überprüft werden, ob mit dem verwendeten Versuchsaufbau die Ergebnisse von Beutelmann und Brand (2006) repliziert werden können. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

6.5.1 Vergleich der Ergebnisse der Validierungsbedingungen mit den Daten aus Beutelmann und Brand (2006)

Die statistischen Auswertungen ergaben, dass in der Validierungsbedingung I die Versuchspersonen den selben SRT erreichten, wie von Beutelmann und Brand (2006) berichtet. Dagegen wurde in der Validierungsbedingung II in der vorliegenden Untersuchung ein um 2,5dB besserer SRT erzielt. Der Unterschied der beiden Bedingungen bestand darin, dass in der Validierungsbedingung I das Störgeräusch von vorn, in der Validierungsbedingung II dagegen von der linken Seite präsentiert wurde.

Die Abweichung in der zweiten Bedingung kann darauf zurückgeführt werden, dass die Kalibrierung im hier dargestellten Versuch anders durchgeführt wurde als von Beutelmann und Brand (2006). Während sie die Signale am rechten und linken Ohr addierten und dann an einem künstlichen Ohr auf 65dB(SPL) kalibrierten, wurde hier aufgrund der Verwendung eines Kunstkopfes der linke Kanal als Referenz benutzt und dieser auf 65dB(SPL) eingepegelt. Dadurch ergibt sich im Falle der symmetrischen Schallverteilung, wie in der Validierungsbedingung I, die gleiche Kalibrierung. Entsprechend ergeben sich bei den empirischen SRTs vergleichbare Ergebnisse.

Ist aber der Pegel auf dem linken Ohr höher, wie in der Validierungsbedingung II, wird das Störgeräusch bei dieser Methode insgesamt leiser kalibriert. Dadurch ist für die glei-

che Verständlichkeit das Sprachsignal im Verhältnis zum Störgeräusch leiser und von den Versuchspersonen wird ein geringerer SRT erzielt.

Da sich bei den nachfolgenden Vergleichen zu Beutelmann und Brand (2006) auf die Validierungsbedingung I bezogen wird, sind die Schlussfolgerungen zulässig. Nachteile bei der Berechnung durch die Sprachindizes sollten sich indes nicht ergeben, weil die Eingangssignale dafür analog zum Versuchsaufbau kalibriert wurden.

Im zweiten Schritt sollte über den Vergleich zwischen Validierungs- und Mischbedingungen eine systematische Abschätzung des Einflusses veränderter Eingangssignale auf die Modellgüte der Sprachindizes erfolgen.

6.5.2 Vergleich der Modellgüte des SII und des BSIM in der Validierung I- und den Mischbedingungen

Sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen wurde die Modellvorhersage bei Verwendung fahrzeugtypischer Signale signifikant schlechter. Während die Abweichung in der Validierungsbedingung I maximal 1,3dB betrug, stieg der Fehler bei Verwendung der Signale aus den Fahrzeugen bis auf 9dB an. Bei Verwendung des Sprachsignals aus dem Fahrzeug zeigte sich auch ein interessanter Unterschied zwischen BSIM und SII. Zum einen war der Fehler des BSIM hier ausnahmsweise höher als der des SII. Zum anderen unterschätzte der SII die empirische Sprachverständlichkeit, während das BSIM diese deutlich überschätzte.

Vermutlich führte die Nutzung zweier unterschiedlicher Signale mit divergenten Quellen- und Rauminformationen zu Fehlern bei der Berechnung der Vorteile des beidohrigen Hörens im BSIM. Der SII, welcher diese Informationen nicht nutzt, zeigte dagegen die offensichtlich typische Unterschätzung der Sprachverständlichkeit. Die unterschiedlichen Rauminformationen könnten die generell höheren Abweichungen der Modellvorhersagen bei Verwendung der Signale aus dem Fahrzeug erklären. Im Vergleich zu den hier aufgetretenen 3 bis 9dB großen Differenzen, berichteten Beutelmann und Brand (2006) für die Anwendung des BSIM im reflektionsarmen Raum eine durchschnittliche Abweichung von 1,6dB.

Bei der Verwendung des Störgeräuschs aus dem Fahrzeug unterschätzten im Unterschied zur Verwendung des Sprachsignals beide Sprachindizes (SII und BSIM) den empirischen SRT. Aufgrund dieser Ergebnisse kann man vermuten, dass im Fahrzeug richtungsabhängige Informationen vor allem im Sprachsignal vorliegen, während das Störgeräusch eher diffus zu sein scheint. Mit dieser Interpretation im Einklang stehen die Erkenntnisse aus dem Kapitel 5, wo anhand der Abbildungen 5.8 und 5.19 zu erkennen ist, dass die Pegeldifferenzen im mittleren bis oberen Frequenzbereich im Sprachsignal im Allgemeinen höher ausfallen als bei den Störgeräuschen. Dieser Frequenzbereich ist, wie bereits im Kapitel 2 beschrieben, für das Sprachverstehen von hoher Bedeutung.

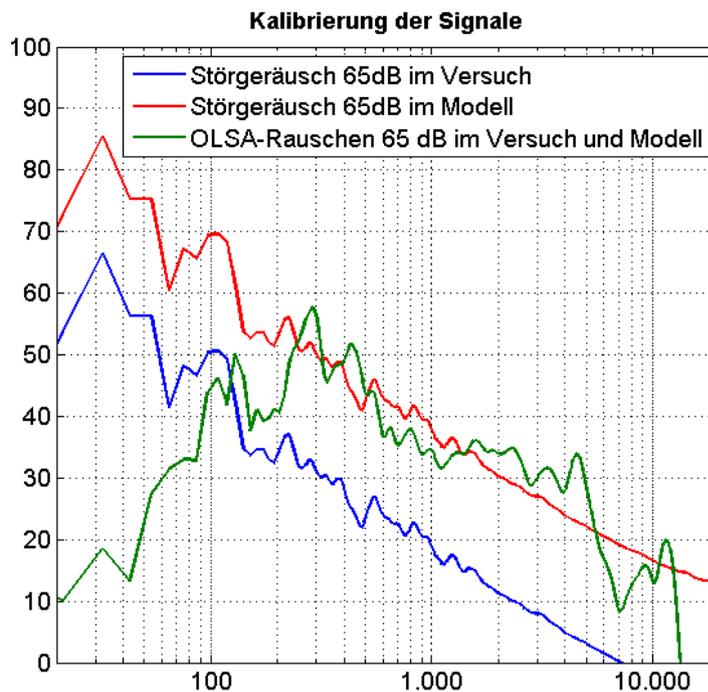


Abbildung 6.11: Darstellung der Pegel von Sprachsignal und Störgeräusch bei einer Kalibrierung auf 65dB(SPL) im BSIM und im Versuchsaufbau.

Der Betrag der Differenz zwischen der Modellvorhersage des SII bzw. des BSIM und der empirischen Sprachverständlichkeit ist im Falle des Sprachsignals aus dem Fahrzeug etwas geringer als für das Störgeräusch. Dies ließ bereits nach Auswertung der Mischbedingungen vermuten, dass sich die Charakteristika der Störgeräusche aus dem Kfz stärker auf die Güte der Sprachindizes auswirken als die des Sprachsignals. Diese Beobachtung führte später zu einer Anpassung des Modells und der Entwicklung des $BSIM_T$, dessen Ergebnisse anschließend diskutiert werden.

6.5.3 Modellgüte des $BSIM_T$

Die Abweichungen des SII und des BSIM von den empirischen SRTs ließen sich zum Großteil darauf zurückführen, dass bei der Kalibrierung der Störgeräusche in den Sprachindizes die Energie im Tieftonbereich vernachlässigt wurde. Dort haben die bis dato untersuchten Signale, wie Sprache bzw. Sprachrauschen, kaum Energie. Die Fahrgeräusche dagegen haben unterhalb von 100Hz ein Energiemaximum. Dadurch kam es bei der Kalibrierung der Eingangssignale in die Sprachindizes und im Versuchsaufbau zu den in Abbildung 6.11 dargestellten Unterschieden. Das Störgeräusch wurde von den Sprachindizes lauter eingestellt als dies im Versuch geschah. Das Sprachsignal wurde dagegen in beiden Fälle gleich laut kalibriert. So ergab sich, dass im Versuch die SRTs deutlich geringer waren als sie von den Sprachindizes berechnet wurden.

Zur Beseitigung dieses Berechnungsfehlers wurden dem BSIM, wie im Kapitel 6.4 bereits beschrieben, zwei weitere Tieftonkanäle hinzugefügt. Dieses Modell wurde $BSIM_T$ genannt. Zur Minimierung des Auswertungsaufwands wurde auf die Darstellung der Auswirkungen dieser Anpassung in Bezug auf den SII verzichtet und nur anhand des $BSIM_T$ untersucht. Die Vergleiche zwischen binauraler (BSIM) und monauraler Modellierung (SII) bleiben gültig, weil die Erweiterung unterhalb des Frequenzbereichs liegt, wo binaurale Unterschiede in der Sprachverständlichkeit zu erwarten sind. Somit sollten sich die SRTs der beiden Modelle durch die Tieftonanpassung um den selben Betrag verändern.

6.5.3.1 Vergleich der Modellgüte in der Validierung I mit den Mischbedingungen

Das $BSIM_T$ zeigte eine deutliche Verringerung des Modellfehlers auf ca. 4dB bei Verwendung des Fahrzeuginnenraumgeräuschs als Störgeräusch. Gleichzeitig stieg der Fehler bei Verwendung des Sprachsignals aus dem Fahrzeug von ca. 5 auf 9dB an. Dies spricht nochmals dafür, dass das binaurale Modell bei divergenten Rauminformationen in verschiedenen Signalen den binauralen Vorteil für das Sprachverstehen falsch berechnet. Für diese Interpretation sprechen auch die Ergebnisse des $BSIM_T$ in der Situation *Kombi VR 150*, wo das selbe Sprachsignal im zugehörigen Störgeräusch dargeboten wurde. In dieser Situation zeigte auch das $BSIM_T$ wieder die typische Unterschätzung der Sprachverständlichkeit bei einer Abweichung von nur -0,6dB.

6.5.4 Modellgüte des $BSIM_T$ in den Hauptbedingungen

Aufgrund der Anpassungen verbesserte sich die Vorhersage des $BSIM_T$ im Vergleich zum BSIM deutlich. Trotzdem wichen die Vorhersagen des $BSIM_T$ immer noch signifikant von den SRTs der Normalhörenden ab. Eine Ausnahme bildeten nur die Bedingungen *Kombi VR 150* und *SUV*, in denen sich die Vorhersage nicht mehr signifikant von den Probandendaten unterschied. Die Größe der Abweichungen entsprach aber nun im Allgemeinen derjenigen, die Beutelmann und Brand (2006) in ihren Untersuchungen berichtet hatten.

Auffallend hoch war die Abweichung in der Bedingung *Kombi VR 50*, die bei 3,9dB lag. Dieses spezielle Ergebnis wird in den Kapiteln 6.5.6 und 6.5.7 ausführlich diskutiert.

Auch die Vorhersagen in der Gruppe der Hörgeschädigten verbesserte sich durch die Anpassung im überwiegenden Teil der Bedingungen signifikant. Die Abweichungen zwischen den empirischen SRTs und den Berechnungen des $BSIM_T$ für die Hörgeschädigten waren, wie bereits das BSIM zeigte, nicht signifikant. Vermutlich führte vor allem die, größere Streuung der SRTs aufgrund des unterschiedlichen Hörvermögens der Versuchspersonen zu diesem Ergebnis (vgl. Kapitel 6.5.5). Denn die Abweichungen waren mit 0,4 bis 3,6dB ähnlich groß wie bei den Normalhörenden.

Die Korrelationen zwischen den empirischen SRTs und den Werten des $BSIM_T$ war für die Normalhörenden und die Hörgeschädigten mit $r=0.99$ sehr hoch. Ausgehend von den Werten des BSIM verbesserte sie sich aber nur noch marginal. Dies lässt sich einerseits auf einen gewissen Sättigungseffekt zurückführen. Andererseits waren die Schwellenverschiebungen aufgrund der Tieftonanpassung relativ homogen, wodurch die Korrelation ebenfalls nur wenig zunimmt.

Im dritten Schritt wurden die Sprachindizes unter verschiedenen Bedingungen im Fahrzeug untersucht. Dabei wurde erwartet, dass das BSIM die SRTs besser vorhersagt als der SII. Außerdem sollten die Werte des BSIM keine Abweichungen von den empirischen SRTs aufweisen. Die Ergebnisse zu diesen beiden Annahmen werden im Folgenden dargestellt.

6.5.5 Vergleich der Modellgüte des SII und BSIM in den Hauptbedingungen

Im Allgemeinen lässt sich für beide Hörergruppen sagen, dass der binaurale Ansatz ($BSIM$) die empirischen SRTs besser modelliert als der monaurale Ansatz des SII. Zum einen sind die absoluten Abweichungen zwischen Empirie und Modellwerten kleiner und zum anderen sind die Vorhersagen über die untersuchten Bedingungen konsistenter, was anhand der höheren Korrelationen des BSIM und des $BSIM_T$ mit den empirischen SRTs zu erkennen ist.

Diese Aussage ließ sich zwar für die Normalhörenden, allerdings nicht für die Hörgeschädigten nachweisen. Dies hat vermutlich mit der sehr hohen Streuung sowohl der empirischen als auch der modellierten SRTs der Hörgeschädigten zu tun. Diese kommt dadurch zustande, dass das Hörvermögen der Versuchspersonen sehr unterschiedlich war. Bei den Hörgeschädigten betrug die Standardabweichung mindestens 3,5dB, bei den Normalhörenden lag sie dagegen unter 1dB. Denn die Unterschiede zwischen den Modellen waren für beide Hörergruppen ähnlich groß. Für eine vergleichbare Aussage, sollten die Untersuchungen mit einer homogeneren Hörgeschädigten-Gruppe wiederholt werden.

Im Falle der Bedingung *Cabrio offen* war der Unterschied zwischen SII und BSIM besonders groß und belief sich auf 10dB. In den anderen Situationen waren die Differenzen zwischen beiden Modellen mit bis zu 4B deutlich kleiner. In den Bedingungen *Cabrio zu* und *Coupé* machten beide Modelle für die Normalhörenden die gleiche Vorhersage. Für die Hörgeschädigten waren in diesen beiden Bedingungen die Unterschiede ebenfalls nur marginal.

Die geringen Unterschiede in der Vorhersage in diesen beiden Bedingungen sprechen für eine sehr homogene Schallverteilung im Cabrio mit geschlossenem Verdeck und im Coupé. Diese führt dazu, dass kaum Pegel- und Laufzeitunterschiede an den Ohren auftreten. Diese Annahme kann anhand der, in der Abbildung 5.19 dargestellten Pegeldifferenzen im Sprachsignal dieser Fahrzeuge unterstützt werden. Diese fallen etwas

kleiner aus als bei den anderen untersuchten Fahrzeugen. Bei der Interpretation dürfen allerdings die Störgeräusche nicht außer Acht gelassen werden, da beide Größen den Sprachsignal-Rausch-Abstand (SNR) und damit die Sprachverständlichkeit bestimmen.

Wie bereits im Kapitel 3.2 beschrieben, können die Vorteile des binauralen Hörens im Sinne der BMLD bis zu 15dB betragen. Die hier auftretenden Differenzen zwischen BSIM und SII entsprechen in Ihrer Größe in etwa denen, die Moore (2003) für unkorrelierte Störgeräusche und gerichtete Signale angibt. Dies würde der Annahme bezüglich der akustischen Situation im Fahrzeug entsprechen, dass die Richtungsinformationen vor allem im Sprachsignal enthalten sind, während das Störgeräusch eher diffus ist.

In der abschließenden Untersuchung sollte die Stabilität der Vorhersage bzgl. der Wirkgrößen Sitzposition, Geschwindigkeit, Baureihe und Kabinenzustand untersucht werden. Es war angenommen worden, dass die Modellgüte des BSIM stabiler ist als die des SII. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

6.5.6 Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte des SII und des BSIM

Die Ergebnisse zur Robustheit der Modelle in Abhängigkeit der untersuchten Wirkgrößen für die Normalhörenden entsprachen nicht den Erwartungen. Zwar zeigte sich das BSIM bei der Vorhersage im Cabrio mit geöffnetem Verdeck und für verschiedene Sitzpositionen innerhalb eines Fahrzeugs robust, während sich die Modellgüte des SII auch in diesen Bedingungen signifikant unterschied.

Allerdings führte offensichtlich die fehlende Tieftonanpassung zu einer Überdeckung der Unterschiede in der Modellgüte. So wurden bei der Berechnung mit dem $BSIM_T$ alle untersuchten Unterschiede signifikant. Die Modellgüte differierte, trotz eines geringen Anstiegs im Vergleich zum BSIM, nur um ca. 1dB. Lediglich bei 50 km/h war sie für die Normalhörenden fast 4dB geringer als bei 150km/h.

In verschiedenen Untersuchungen hatte sich gezeigt, dass Normalhörende Lücken im Störgeräusch für ein besseres Sprachverstehen nutzen können (Bronkhorst, 2000; Ludvigsen, 1987). Bei der Untersuchung der Modulationsspektren dieser beiden Bedingungen fand sich ein Hinweis darauf, dass eine stärkere Modulation bei 50km/h (siehe Abbildung 6.12a im Vergleich zu 150km/h (b)) zu einer Verbesserung des empirischen Sprachverstehens der normalhörenden Versuchspersonen und damit zu der auffallend hohen Differenz zur Modellvorhersage geführt haben könnte. Weitere Hinweise auf die Gültigkeit dieser Interpretation werden im Kapitel 6.5.7 ausgeführt.

Der SII, das BSIM und das $BSIM_T$ berücksichtigen diesen Effekt nicht, weil die Berechnungen des SNR auf dem gemittelten Langzeitspektrum basieren. Dies führt zur Berechnung eines höheren SRT. Somit muss die Modellgüte, also die Differenz zwischen empirischem Wert und Modell-Wert, bei höheren Modulationen zwangsläufig geringer ausfallen.

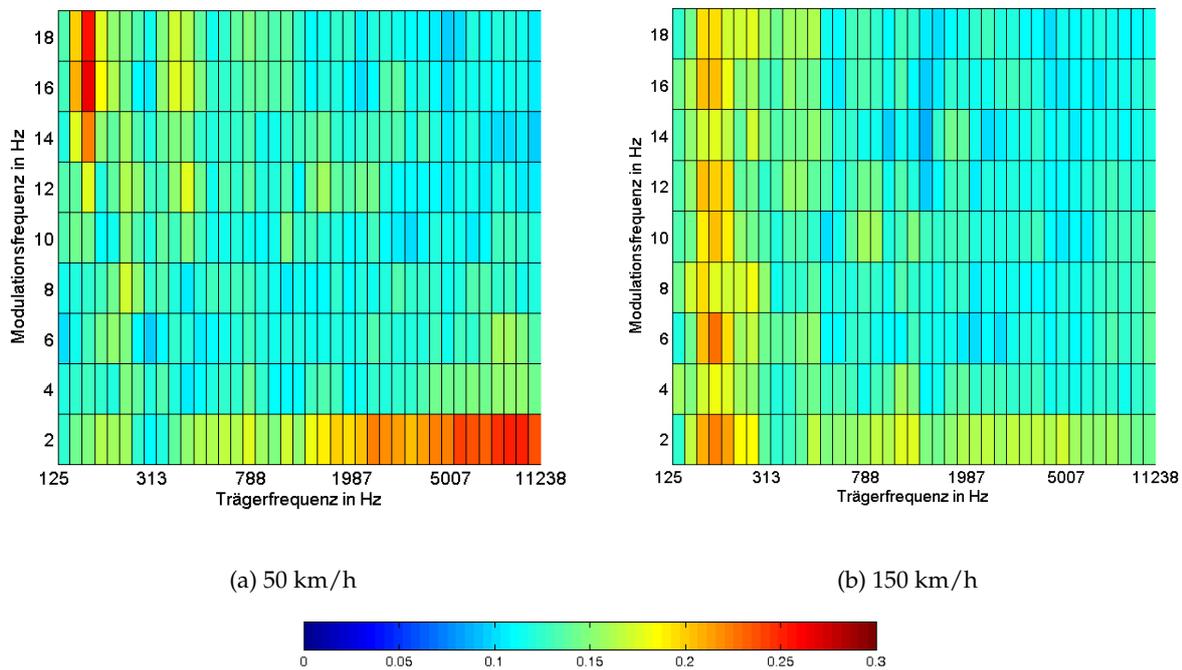


Abbildung 6.12: Modulationspektren bei 50 und 150 km/h auf dem Beifahrersitz im Kombi. Die Farbco-dierung gibt den Modulationsgrad an.

Die Berücksichtigung von Modulationen im Störgeräusch sollte demnach zu einer besseren Schätzung der Sprachverständlichkeit führen. Ein Sprachindex, welcher die Sprachverständlichkeit zu einzelnen Zeitpunkten im Störgeräusch betrachtet, könnte diesbezüglich Vorteile bringen. Rhebergen, Versfeld und Dreschler (2006) benutzten ein auf dem SII basierendes Kurzzeit-Modell, welches innerhalb kurzer Zeitabschnitte den momentanen SII berechnet und abschließend einen gemittelten Gesamtwert berechnet. Die Autoren konnten in einer weiteren Arbeit zeigen (Rhebergen et al., 2008), dass die Vorhersage in einer Vielzahl alltäglicher Störgeräusche mit dem sogenannten E-SII eine höhere Korrelation mit den empirischen SRTs Normalhörender erreichten als mit dem SII nach ANSI S3.5-1997 (ANSI, 1997). Speziell für Sprache im Fahrzeuggeräusch wurde die Berechnung des SRT um 1dB verbessert (Rhebergen et al., 2008).

Für die Hörgeschädigten war die Modellgüte des BSIM in der Hälfte der Bedingungen gleich gut, der SII wies nur in Bezug auf die Geschwindigkeit keine Unterschiede in der Modellgüte auf. Die Ergebnisse mit dem $BSIM_T$ entsprachen im Unterschied zu denen der Normalhörenden eher den Erwartungen. Bis auf den Einfluss der Baureihe (*SUV* und *Coupé*) war die Modellgüte für die untersuchten Wirkgrößen gleich.

Interessant ist weiterhin, dass der SUV die einzige Bedingung ist, in der das $BSIM_T$ einen besseren SRT vorhersagt, als von den Versuchspersonen erreicht wurde. Dies könnte auf Nachhalleffekte aufgrund des deutlich größeren Innenraums des SUV zurückzuführen sein. Hörgeschädigte verstehen Sprache bei Nachhall und Störgeräusch aufgrund von

Zeit- und Frequenzauflösungsdefiziten deutlich schlechter als Normalhörende in einer vergleichbaren Situation (Ludvigsen, 1987). Diese überschwelligen Hördefizite werden von den Sprachindizes aufgrund der Komplexität ihrer Auswirkungen nicht modelliert, genauso wenig wie die generelle Verringerungen der Sprachverständlichkeit aufgrund von Nachhall für alle Hörer. Die Summe der unberücksichtigten Einflüsse auf die empirische Sprachverständlichkeit der Hörgeschädigten könnte diese außergewöhnliche Überschätzung der Sprachverständlichkeit durch das $BSIM_T$ begründen. Für diese Interpretation spricht auch die auffallend geringe Differenz zwischen empirischen und modellierten SRTs in der Bedingung SUV bei den Normalhörenden, deren empirische Sprachverständlichkeit durch Nachhall ebenfalls etwas verringert sein könnte. Diese Interpretation lässt sich allerdings nicht anhand der Auswertungen der Störgeräusch- und Sprachsignalaufnahmen erhärten.

6.5.7 Auswirkungen von Geschwindigkeit und Sitzposition auf die empirischen SRTs

Für den hier untersuchten Kombi konnte gezeigt werden, dass die Sprachverständlichkeit der Normalhörenden auf unterschiedlichen Sitzplätzen (VR; HR) und bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (50 km/h; 150 km/h) signifikant unterschiedlich war. Der SRT bei beiden Geschwindigkeiten unterschied sich ca. 1,5 dB. Dies ist nur insofern interessant, als dass die SRTs der Hörgeschädigten bei beiden Geschwindigkeiten gleich waren. Dieses unterschiedliche Muster deutet darauf hin, dass die Unterschiede im Sprachverstehen der Normalhörenden wirklich auf die stärkeren Schwankungen im Störgeräusch bei 50km/h zurückzuführen sind. Während Normalhörende Lücken im Störgeräusch für ein besseres Sprachverstehen nutzen können, verstehen die Hörgeschädigten in beiden Situationen gleich gut. Vermutlich können Hörgeschädigte mit Innenohrschäden aufgrund überschwelliger temporaler Auflösungsdefizite in kurze Störgeräuschlücken nicht „hineinhören“. Dies ist das Ergebnis, welches u.a. Bormann et al. (2005) aus den Ergebnissen vieler veröffentlichter Studien zusammenfassen konnte. Dies hätte aber auch bei Verwendung eines Kurzzeit-Modells, wie im Abschnitt 6.5.6 beschrieben, den Nachteil, dass sie die Sprachverständlichkeit von Hörgeschädigten in schwankenden Störgeräuschen überschätzen müssten.

Die SRTs aller Versuchspersonen waren auf der Rückbank bis zu 4 dB schlechter als auf dem Beifahrersitz. Hier kann nicht allein das Störgeräusch für den Effekt verantwortlich gemacht werden. Deren Unterschied fiel, wie im Kapitel 5 gezeigt wurde, verhältnismäßig klein aus. Größer fallen die spektralen Unterschiede des Sprachsignals aus (vgl. Abbildung 5.23). Insgesamt wirkt sich aber die Summe der Unterschiede deutlich negativ auf die Sprachverständlichkeit auf der Rückbank aus.

6.5.8 Zusammenfassung

Mit dem hier verwendeten Versuchsaufbau konnten mit der Literatur vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Allerdings muss für Vergleiche dieser Art, die Kalibrierung der Signale berücksichtigt werden.

Es zeigte sich anhand der Ergebnisse mit dem BSIM und dem SII, dass es bei der Anwendung der Indizes im Fahrzeug zu Fehlern bei der Berechnung der Sprachverständlichkeit kommt. Diese entstehen zu einem großen Teil aufgrund der spektralen Unterschiede zwischen Sprachrauschen und Fahrzeuginnenraumgeräuschen. Durch eine Erweiterung des BSIM im Tieftonbereich ($BSIM_T$) konnte eine Verbesserung der Berechnungen erzielt werden.

Die Korrelationen über die untersuchten Bedingungen sprechen für eine gute Vorhersage der Sprachverständlichkeit durch den Sprachindex $BSIM_T$. Trotzdem blieben absolute Differenzen zu den empirischen Daten offen, die allerdings bereits veröffentlichten Ergebnissen zur Anwendung des Modells in einfachen akustischen Bedingungen entsprechen.

Die Interpretation der Ergebnisse wird durch die Komplexität der Bedingungen im Kfz und die nur punktuell mögliche Betrachtung der akustischen Auswirkungen erschwert. Allerdings war das Ziel der Arbeit, die Güte der Indizes in genau diesem Anwendungsfeld zu untersuchen. Einzelne Zusammenhänge und Effekte müssten unter Laborbedingungen genauer betrachtet werden.

Auffallend war für die Normalhörenden die große Differenz in Bezug auf die Vorhersage der Sprachverständlichkeit bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Dieser Unterschied könnte ggf. durch Modulationen im Störgeräusch erklärt werden. Hier könnte eine entsprechende Erweiterung des Modells hin zur Betrachtung einzelner Störgeräuschabschnitte (Kurzzeit-Modell) das $BSIM_T$ verbessern.

Der binaurale Ansatz ist auch für die Berechnung der Sprachverständlichkeit im Kfz vorteilhaft gegenüber den monauralen Modellen. Dies gilt sowohl für die Berechnung der Absolutschwelle als auch bzgl. der Stabilität der Modellgüte in verschiedenen Bedingungen. Allerdings sind die binauralen Vorteile im Fahrzeug verhältnismäßig klein. Im Cabrio bei offenem Verdeck ist die Vorhersage der Sprachverständlichkeit durch das binaurale Modell jedoch deutlich besser als die der monauralen Modelle. Es ist anzunehmen, dass dies für andere Bedingungen, die hohe Pegeldifferenzen an den Ohren erzeugen (Fenster auf, Windverhältnisse, Überholvorgänge), ebenfalls gilt.

Generell ist auffällig, dass die empirische Sprachverständlichkeit innerhalb eines Fahrzeugs in Abhängigkeit des Sitzplatzes deutlich schwankt. Noch größer sind die Unterschiede, die in verschiedenen Baureihen auftreten. Das heißt, dass eine gute Sprachverständlichkeit nur durch unterschiedliche Pegel des Sprachsignals erreicht werden kann. Die im Kapitel 5 aufgezeigten Pegelunterschiede der Innenraumgeräusche werden diesen Effekt in Wirklichkeit noch weiter verstärken.

7. Experiment 2 - Evaluation der Sprachindizes für Sprachsignale im Kfz

Im Experiment 1 konnte gezeigt werden, dass das $BSIM_T$ die empirischen SRTs in verschiedenen Fahrzeugen bzw. Fahrsituationen, d.h. in sehr verschiedenen Störgeräuschen, gut vorhersagen kann. Als Signalquelle wurde dabei in allen Fahrzeugen das Entertainmentsystem genutzt. Daneben gibt es im Fahrzeug auch andere Sprachübertragungswege (vgl. Kapitel 5), für die im folgenden Experiment die Güte der Sprachindizes untersucht werden soll. Wie der Tabelle 7.1 zu entnehmen ist, wird die Modellgüte für verschiedene Signalquellen und Sitzplätze untersucht.

Wiederum wird, wie bereits im Experiment 1, die Güte anhand des Vergleichs zwischen empirischen und modellierten SRTs bestimmt.

Als Sprachindizes werden das $BSIM_T$ und der in gleicher Weise angepasste SII_T genutzt. Da dem Sprachübertragungsindex (STI) ein anderes Berechnungskonzept zugrunde liegt, welches unter Umständen zu unterschiedlichen Vorhersagen führt (vgl. Kapitel 3.3), werden für die weiterführende Diskussion die Werte des STI ergänzt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus diesem Versuch soll bestimmt werden, wie gut die Sprachindizes die Sprachverständlichkeit im Hinblick auf die verschiedenen Sprachübertragungswege im Fahrzeug vorhersagen können. Darüber hinaus soll entschieden werden, ob und wenn ja, welche Modifikationen an den Sprachindizes zur Verbesserung der Vorhersage der Sprachverständlichkeit vorgenommen werden müssen.

7.1 Fragestellung und Hypothesen

Die Untersuchung der Sprachindizes erfolgte im Fahrzeug anhand von sieben ausgewählten Bedingungen, die sich bzgl. der Signalquelle, der Baureihe und der Sitzposition unterscheiden (siehe Tabelle 7.1, Hauptbedingungen I bis VII).

In den, im Kapitel 5 dargestellten Spektren konnten in den verschiedenen Sprachsignalen Pegeldifferenzen nachgewiesen werden. Pegeldifferenzen und Laufzeitunterschiede führen, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, zu einer Verbesserung der Sprachverständlichkeit bei binauralem Hören. Das Experiment 1 hatte bereits gezeigt, dass das $BSIM$ die Sprachverständlichkeit in verschiedenen Sprachsignal-Störgeräusch-Situationen im Fahrzeug besser vorhersagen kann als der SII . Deshalb ist anzunehmen, dass die Modellgüte des $BSIM_T$ auch bei unterschiedlichen Sprachübertragungswegen (Hauptbedingung I bis VII) die Modellgüte höher ist als die des SII_T . Die Modellgüte wird dabei als Differenz zwischen Empirie und Modellvorhersage interpretiert und für die untersuchten Bedingungen verglichen. Die entsprechende Hypothese lautet:

Tabelle 7.1: Experimentelle Bedingungen im Experiment 2.

Bedingung	Sprachsignal	Störgeräusch	Position	Kurzname
Validierung I	OLSA-Sätze 0°	OLSA-Rauschen 0°		OLSA S ₀ N ₀
Hauptbedingung I	Entertainment	Mittelklasse Kombi, 150 km/h	Rückbank	Kombi CD HR
Hauptbedingung II	Fahrer	Mittelklasse Kombi, 150 km/h	Rückbank	Kombi Fahrer HR
Hauptbedingung III	Entertainment	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi CD VR
Hauptbedingung IV	Navigation	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi Nav VR
Hauptbedingung V	Telefon	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi Tel VR
Hauptbedingung VI	Fahrer	SUV, 150 km/h	Rückbank	SUV Fahrer HR
Hauptbedingung VII	Fahrer	SUV, 150 km/h	3. Reihe	SUV Fahrer 3. Reihe

Hypothese 1

Die Modellgüte des $BSIM_T$ ist in den Hauptbedingungen I bis VII höher als die des SII_T .

Im Experiment 1 konnte gezeigt werden, dass das $BSIM_T$ in vielen Fällen die Sprachverständlichkeit fehlerfrei berechnet. Für eine valide Anwendung im Fahrzeug dürfte sich die Vorhersage im Fahrzeug auch dann nicht von den empirischen Daten unterscheiden, wenn verschiedene Übertragungswege untersucht werden. Daraus ergibt sich folgende Hypothese:

Hypothese 2

Die Differenz zwischen der Vorhersage des $BSIM_T$ und den empirischen SRTs (Modellgüte) ist in den Hauptbedingungen I bis VII gleich 0.

Im Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass innerhalb eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der Signalquelle und der Sitzposition unterschiedliche Pegeldifferenzen an den Ohren auftreten. Diese sind als einfachste Manifestation einer binaural wirksamen Sprachsignal-Störgeräusch-Anordnung im Kfz zu verstehen. Für das $BSIM_T$ ist gegenüber dem SII_T eine stabilere Vorhersage in binauralen Hörsituationen zu erwarten, weil es die Vorteile im empirischen Sprachverstehen aufgrund der auftretenden Pegel- und Laufzeitunterschiede zusätzlich modelliert (vgl. Kapitel 3.2.2.3 und 3.3). Dies sollte dazu führen, dass die Modellgüte des $BSIM_T$ in den Bedingungen mit unterschiedlichem binauralen Vorteil gleich hoch ist, während dies für den SII_T nicht zu erwarten ist. Die entsprechenden Hypothesen lauten:

Hypothese 3

Die Modellgüte des $BSIM_T$ unterscheidet sich nicht in Abhängigkeit der Sitzposition und der Signalquelle.

Hypothese 4

Die Modellgüte des SII_T unterscheidet sich in Abhängigkeit der Sitzposition und der Signalquelle.

Wie im Kapitel 5 ebenfalls beschrieben, unterscheiden sich neben den Pegeldifferenzen auch die Frequenz- und Modulationsspektren innerhalb eines Fahrzeuges in Abhängigkeit der Signalquelle und der Sitzposition. Da die empirische Sprachverständlichkeit, wie in den Kapiteln 2 und 3.2.2.3 beschrieben, von diesen Faktoren beeinflusst wird, sollten auch Unterschiede in den SRTs der Versuchspersonen auftreten. Daraus ergibt sich folgende Hypothese:

Hypothese 5

Die empirischen SRTs unterscheiden sich innerhalb eines Fahrzeuges in Abhängigkeit der Signalquelle und der Sitzposition.

Auf einen Vergleich der SRT-Werte des *BSIM* bzw. des SII_T mit den SRT-Werten des STI muss verzichtet werden, da der im Handel erhältliche STI nur die Indexwerte berechnet. Für die weiterführende Diskussion werden deshalb lediglich die Korrelationen zwischen empirischen SRTs und den Indexwerten über die Hauptbedingungen I bis VII dargestellt.

7.2 Methode

7.2.1 Personen

Am Experiment 2 nahmen acht Versuchspersonen teil. Diese waren Studentinnen und Studenten der Universität Erlangen-Nürnberg und deren Bekannte. Sie waren zwischen 23 und 59, im Durchschnitt rund 32 Jahre alt. Jeweils die Hälfte der Versuchspersonen waren weiblichen bzw. männlichen Geschlechts. Alle Versuchspersonen waren normalhörend, d.h. die Hörschwelle überstieg in keiner Frequenz 20dB(HL).

7.2.2 Versuchsaufbau

7.2.2.1 Apparatur

Der Versuch wurde in den selben Räumlichkeiten und mit der selben Apparatur durchgeführt wie das erste Experiment. Die Beschreibung ist Kapitel 6.2.2.1 zu entnehmen.

7.2.2.2 Stimuli

Als Sprachsignal wurde wiederum der Oldenburger Satztest (OLSA, Wagener et al., 1999a) verwendet (vgl. Kapitel 6.2.2.2). Die Sprachsignale wurden, wie im Kapitel 5.2.2 beschrieben, durch Faltung gewonnen und die zugehörigen Störgeräusche aus der Datenbank ausgewählt. Allerdings wurden andere akustische Situationen mit dem Fokus auf den Sprachübertragungsweg im Fahrzeug untersucht.

Der Ausgabepiegel der Signale über den Kopfhörer an die Versuchspersonen entsprach nicht der aufgezeichneten Lautstärke. Für die Sprachaudiometrie wurden sowohl das Sprachsignal als auch das Störgeräusch auf 65 dB(SPL) und damit auf einen SNR von 0dB

kalibriert. Für die Kalibrierung wurden die Signale über den Kopfhörer wiedergegeben und der Pegel am linken Kanal des HMS III-Kunstkopfs bestimmt.

7.2.3 Versuchsplan

Jede Versuchsperson durchlief acht akustische Bedingungen (siehe Tabelle 6.1), in denen jeweils der SRT als abhängige Variable gemessen wurde.

Die Validierungsmessung I und die Übungsdurchläufe entsprachen dem Experiment 1 (vgl. Kapitel 6.2.3). Auf die Darstellung dieser Ergebnisse wird im weiteren Verlauf der Arbeit verzichtet.

Die Hauptbedingungen I - VII simulierten die akustischen Bedingungen im Fahrzeug (vgl. Tabelle 6.1). Dabei wurde in den Bedingungen I und II die Auswirkung der *Signalquelle* (Fahrer als Sprecher; Entertainmentsystem (CD)) auf die Sprachverständlichkeit auf der Rückbank untersucht. In der Hauptbedingung III bis V wurde die Sprachverständlichkeit auf dem Beifahrersitz in Abhängigkeit der *Signalquellen* (Entertainment (CD), Navigation und Telefon) betrachtet. In Bedingung VI und VII wurde die Sprachverständlichkeit der Signalquelle Fahrer als Sprecher in Abhängigkeit der *Sitzposition* (Rückbank bzw. dritte Sitzreihe) untersucht.

Zusätzlich wurden die SRTs durch den SII_T und das $BSIM_T$ für jede der untersuchten Bedingungen modelliert, um diese mit den empirischen SRTs zur Untersuchung der Modellgüte zu vergleichen. Für die Normalhörenden wird, wie bereits im Experiment 1 beschrieben, innerhalb einer Bedingung der selbe SRT berechnet.

7.2.4 Durchführung

Wie der Abbildung 7.1 zu entnehmen ist, wurden die Versuchspersonen zu Beginn von der Versuchsleitung begrüßt und in den Untersuchungsraum geführt. Dort nahmen sie auf dem dafür vorgesehenen Stuhl Platz und wurden mündlich anhand eines Gesprächsleitfadens über den Versuchsablauf informiert. Zuerst wurde bei allen Versuchspersonen eine Audiometrie durchgeführt, um die Hörfähigkeit der Versuchspersonen zu überprüfen.

Nach einer kurzen Pause wurde die Sprachverständlichkeit in den, in der Tabelle 7.1 dargestellten Sprachsignal-Störgeräusch-Kombinationen erhoben. Alle Versuchspersonen durchliefen zuerst die beiden Übungsmessungen, um Trainingseffekte zu vermeiden. Nach einer weiteren Pause wurden die Validierungs- und Hauptbedingungen in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten, um systematische Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Nach dieser in etwa 50 Minuten dauernden Messung füllten die Versuchspersonen einen Fragebogen zu demographischen Angaben und Fahrgewohnheiten aus und wurden durch Bestätigung der Versuchspersonenstunden bzw. ein festgelegtes Entgelt entlohnt. Falls gewünscht erhielten die Versuchspersonen zum Schluss weitere Informa-

tionen über den Versuch und wurden nach sonstigen Anmerkungen gefragt. Die Pausen einbezogen erstreckte sich der Versuch damit über knapp 1,5 Stunden.

Versuchsteil I	Zeit	Versuchsteil II	Zeit
Begrüßung & Instruktion	5 min	Validierungs- und Hauptbedingungen	80 min
Audiometrie	15 min		
Pause			
Übung	30 min		
Pause			
		Fragebogen, Debriefing, Entlohnung	85 min

Abbildung 7.1: Versuchsablauf im Experiment 2.

Instruktion

Die Instruktion der Versuchspersonen erfolgte wie bereits im Experiment 1 beschrieben (vgl. Kapitel 6.2.4).

Tonaudiometrie zur Bestimmung der Hörschwelle

Die Tonaudiometrie erfolgte wie bereits im Experiment 1 beschrieben (vgl. Kapitel 6.2.4).

Sprachaudiometrie

Die Erhebung der Sprachverständlichkeit erfolgte grundsätzlich wie im Experiment 1 (vgl. Kapitel 6.2.4). In diesem Versuch wurden im Unterschied zum Experiment 1 anstatt von 20 Sätzen, 30 dargeboten. Mit dieser ausführlicheren Messung ist es möglich, den 30- und den 70%-Punkt der psychometrischen Funktion zu messen. Dies hat den Vorteil, dass die Steigung der Funktion für jede einzelne Person und Situation bestimmt wird. Hierbei wird der SRT nicht direkt erhoben, sondern aus den beiden gemessenen Punkten (30- und 70%) berechnet. Die Steigungen werden in der folgenden Ergebnisdarstellung nicht berücksichtigt.

7.2.5 Modellierung der Sprachverständlichkeit

Die Sprachverständlichkeit wurde mit dem ($BSIM_T$) berechnet (siehe Kapitel 6.4), das den entsprechenden SII_T ebenfalls modellierte. Der STI wurde, wie bereits unter Kapitel 6.2 beschrieben, bestimmt.

7.2.6 Datenauswertung und Statistik

Die Datenauswertung erfolgte wie im Experiment 1 (vgl. Kapitel 6.2), nur wurden sie im Unterschied dazu mit PASW Statistics 18.0 durchgeführt.

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Güte der Sprachindizes im Fahrzeug

In der Abbildung 7.2 sind die Mittelwerte der empirischen Sprachverständlichkeit und der beiden Modellvorhersagen für die Hauptbedingungen dargestellt. Es zeigte sich, dass in nahezu allen Situationen von beiden Modellen ein höherer SRT vorhergesagt wird, als von den Versuchspersonen erreicht wurde. Die kleinste Abweichung zwischen $BSIM_T$ und den Probandendaten tritt in der Bedingung *SUV Fahrer HR* auf. Hier wich die Modellvorhersage um 0,4dB von den empirischen Werten ab. Der SII_T hatte die beste Vorhersage in der Bedingung *Kombi CD VR* mit einer Abweichung von -0,7dB. Die größten Abweichungen traten in der Bedingung *Kombi Tel VR* mit 6,7dB beim $BSIM_T$ und 9,0dB beim SII_T auf. Dies war die einzige Bedingung, in der beide Modelle einen deutlich höheren SRT vorher sagten als die Versuchspersonen erreichten.

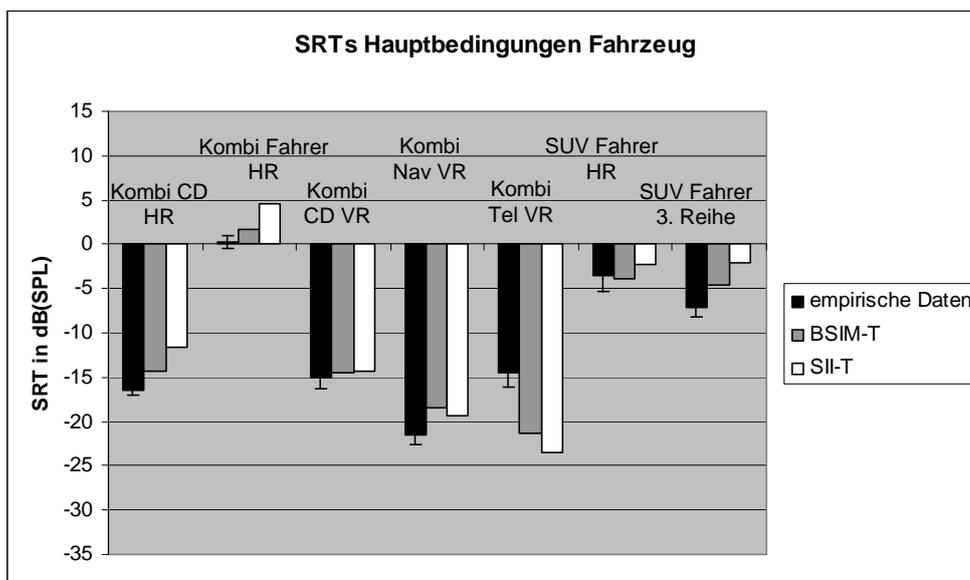


Abbildung 7.2: Mittelwerte der empirischen und der, von den Sprachindizes berechneten SRTs. Eine bessere Sprachverständlichkeit drückt sich dabei durch einen negativeren SRT aus. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar.

Für die statistische Auswertung der Modellgüte wurden die Differenzen zwischen den empirischen Daten und dem jeweiligen Modellwert für alle Situationen und Versuchspersonen berechnet. Eine exakte Modellvorhersage würde eine Abweichung von 0 gegenüber den Probandendaten ergeben. Entsprechend wurden die berechneten Differenzen anhand eines Testwertes von 0 mit einfachen t-Tests auf statistisch signifikante Abweichungen hin untersucht. Der Vergleich der Güte des SII_T und des $BSIM_T$ erfolgte als unabhängiger t-Test zwischen den jeweiligen Differenzen der Modelle. Die Anwendungsvoraussetzungen waren erfüllt (siehe Anhang A2.1).

Tabelle 7.2: Modellgüte des SII_T und des $BSIM_T$ bzgl. der empirischen Daten (einfache t-Tests) und der statistische Vergleich beider Sprachindizes (unabhängige t-Tests). Die Modellgüte wird durch die Mittelwerte der Differenzen zwischen empirischen Daten und Modellvorhersage repräsentiert.

Bedingung	mittlere Modellgüte in dB	SII_T einfacher t-Test			$BSIM_T$ einfacher t-Test			$SII_T - BSIM_T$ unabhängiger t-Test			
		T	df	Sig	T	df	Sig	T	df	Sig	
Kombi CD HR	-4,87	-18,946	7	p≤.001	-2,09	-8,131	7	p≤.001	7,648	14	p≤.001
Kombi Fahrer HR	-4,36	-8,821	7	p≤.001	-1,36	-2,752	7	p≤.05	4,292	14	p≤.001
Kombi CD VR	-0,72	-1,879	7	n.s.	-0,42	-1,093	7	n.s.	,555	14	n.s.
Kombi Nav VR	-2,29	-4,365	7	p≤.01	-3,15	-6,006	7	p≤.001	-1,160	14	n.s.
Kombi Tel VR	8,98	14,232	7	p≤.001	6,74	-10,683	7	p≤.001	-2,510	14	p≤.05
SUV Fahrer HR	-1,29	-3,108	7	p≤.05	,40	,972	7	n.s.	2,885	14	p≤.05
SUV Fahrer 3. Reihe	-5,01	-9,553	7	p≤.001	-2,44	-4,655	7	p≤.01	3,463	14	p≤.01

In den Bedingungen *Kombi CD VR* und *SUV Fahrer HR* unterschieden sich laut der durchgeführten t-Tests die Sprachverständlichkeit der Versuchspersonen und des $BSIM_T$ nicht. Gleiches galt für die Probandendaten und den SII_T in der Bedingung *Kombi CD VR*. In allen anderen Fällen wichen beide Modellvorhersagen signifikant von den Probandendaten ab (siehe Tabelle 7.2).

Im Vergleich der Güte des $BSIM_T$ mit der des SII_T zeigte sich eine bis zu 3dB genauere Vorhersage des $BSIM_T$. In allen Fällen, bis auf die Bedingungen *Kombi CD VR* und *Kombi Nav VR*, war dieser Unterschied signifikant. Die Mittelwerte und die Ergebnisse dieser t-Tests sind ebenfalls in der Tabelle 7.2 dargestellt.

Zur Betrachtung der Vorhersagegüte über alle Bedingungen wurden Korrelationen zwischen den mittleren empirischen SRTs und den Modell-SRTs berechnet. Die Korrelation lag für den SII_T bei $r=.93$ ($p \leq .01$) und für das $BSIM_T$ betrug sie $r=.95$ ($p \leq .001$).

Die Korrelation mit dem STI wurde, wie im Experiment 1, mit den umgerechneten SRT-Werten in dB(A) berechnet. Sie erreichte $r=.77$ ($p \leq .05$). Für einen einfachen Überblick werden die STI-Werte, wie die Werte des $BSIM_T$ in Bezug auf die empirischen SRT-Schwellen in dB(SPL) dargestellt. In der Abbildung 7.3 sind die Streudiagramme für alle Sprachindizes dargestellt. Im Allgemeinen sind die Indexwerte des STI kleiner als die des SII_T und des $BSIM_T$. Besonders auffällig sind die Bedingungen *Kombi Tel VR* und *Kombi Nav VR*, wo der STI-Wert im Verhältnis deutlich kleiner ist als die Werte des SII_T bzw. $BSIM_T$.

7.3.2 Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte der Sprachindizes

7.3.2.1 Fahrer als Sprecher im Vergleich zum Entertainmentsystem

In der Abbildung 7.4a ist die Güte des SII_T und des $BSIM_T$ für die Sprachwiedergabe von Fahrer bzw. Entertainment (CD) dargestellt. Für den statistischen Vergleich der Modellgüte wurden gepaarte t-Tests zwischen den betreffenden Situationen berechnet. Die

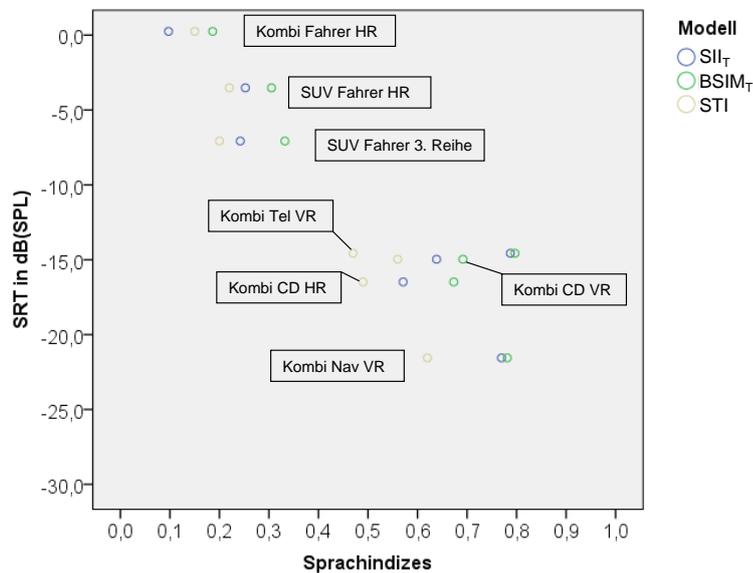


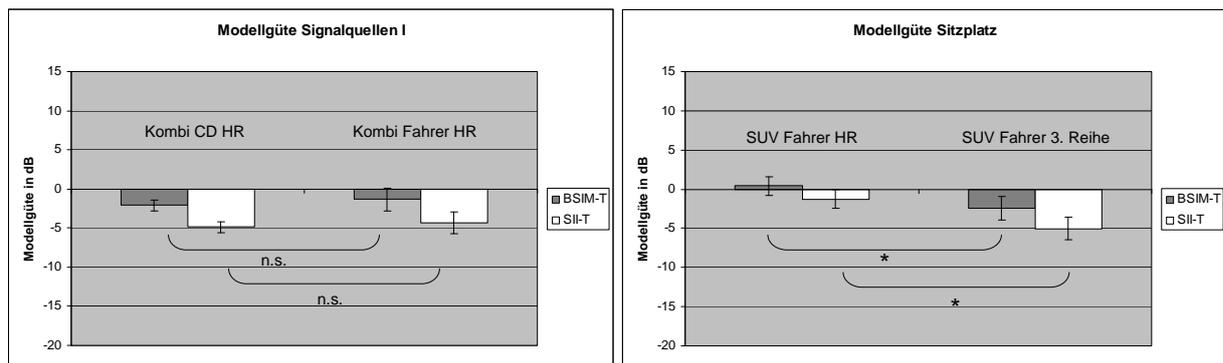
Abbildung 7.3: Streudiagramme zwischen den empirischen SRTs und den Sprachindizes. Die STI-Werte sind trotz dB(A)-Kalibrierung für einen besseren Überblick ebenfalls auf die SPL-Schwellen bezogen.

Anwendungsvoraussetzungen für die statistischen Berechnungen wurden erfüllt (siehe Anhang A2.1). Die Vorhersagegüte des $BSIM_T$ unterschied sich für die Bedingung *Kombi CD HR* mit einer Abweichung von -2,1dB nicht signifikant von der Bedingung *Kombi Fahrer HR* mit -1,4dB ($t_{[1,7]} = -1,316; n.s.$). Selbiges galt für den SII_T (-4,9dB; -4,4dB; $t_{[1,7]} = -,920; n.s.$).

7.3.2.2 Sitzplatz

In der Abbildung 7.4b ist die Güte des SII_T und des $BSIM_T$ für die Sprache des Fahrers auf die Rückbank bzw. in die dritte Reihe dargestellt. Für den statistischen Vergleich der Modellgüte wurden gepaarte t-Tests zwischen den betreffenden Situationen berechnet. Die Anwendungsvoraussetzungen für die statistischen Berechnungen wurden erfüllt (siehe Anhang A2.1).

Die Vorhersagegüte des $BSIM_T$ war für die Bedingung *SUV Fahrer 3. Reihe* mit einer Abweichung von -2,4dB signifikant schlechter als mit 0,4dB in der Bedingung *SUV Fahrer HR* ($t_{[1,7]} = 6,087; p \leq .001$). Selbiges galt für den SII_T (-5,0dB; -1,3dB; $t_{[1,7]} = 7,969; p \leq .001$).



(a) Fahrer als Sprecher

(b) Sitzposition

Abbildung 7.4: Mittelwerte der Modellgüte für Fahrer als Sprecher gegenüber Sprachwiedergabe über das Entertainmentssystem (CD) im Mittelklasse Kombi (a) und bei Fahrer als Sprecher auf verschiedenen Sitzpositionen im SUV (b). Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar. Mit * gekennzeichnete Ergebnisse sind mit $p \leq .001$ statistisch signifikant.

7.3.2.3 Sprachwiedergabesysteme als Signalquelle

Die Datenauswertung zur Modellgüte für verschiedene Sprachwiedergabesysteme erfolgte in einem Allgemeinen Linearen Modell des Zwischensubjektfaktors *Modell* mit zwei Abstufungen (SII_T , $BSIM_T$) und Messwiederholung. Als Messwiederholung wurde dabei die Sprachverständlichkeit bei den verschiedenen Sprachwiedergabesystemen (Faktor *System*: CD, Navigation, Telefon) betrachtet. Zur Spezifizierung signifikanter Ergebnisse auf dem Faktor *System* wurden post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur berechnet. Die Anwendungsvoraussetzungen waren erfüllt (siehe Anhang A2.2).

Die Modellgüte ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Die größte Abweichung trat bei beiden Modellen in der Bedingung *Kombi Telefon VR* auf (SII_T : 9,0 bzw. $BSIM_T$: 6,7dB). Die Abweichungen in den beiden anderen Situationen waren sowohl für das $BSIM_T$ mit -0,4 (*Kombi CD VR*) und -3,2dB (*Kombi Nav VR*) als auch für den SII_T (-0,7 bzw. -2,3dB) deutlich kleiner.

Entsprechend ergab die inferenzstatistische Auswertung für den Messwiederholungsfaktor *System* ein signifikantes Ergebnis ($F_{[1,2]} = 241,817$; $p \leq .001$). Die Wechselwirkung zwischen *System* und *Modell* ($F_{[1,2]} = 3,126$; $n.s.$) und der Zwischensubjektfaktor *Modell* wurde nicht signifikant ($F_{[1,14]} = 4,332$; $n.s.$). Die Ergebnisse des post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur zeigten, dass sich die Modellgüte aller Bedingungen des Faktors *System* signifikant unterschieden ($p \leq .001$).

7.3.3 Auswirkung von Signalquelle und Sitzplatz auf die empirischen SRTs

7.3.3.1 Fahrer als Sprecher im Vergleich zum Entertainmentssystem

Zum Vergleich der empirischen SRTs in den Bedingungen *Kombi Info HR* und *Kombi Fahrer HR* wurden paarweise t-Tests durchgeführt. Die Anwendungsvoraussetzungen wurden

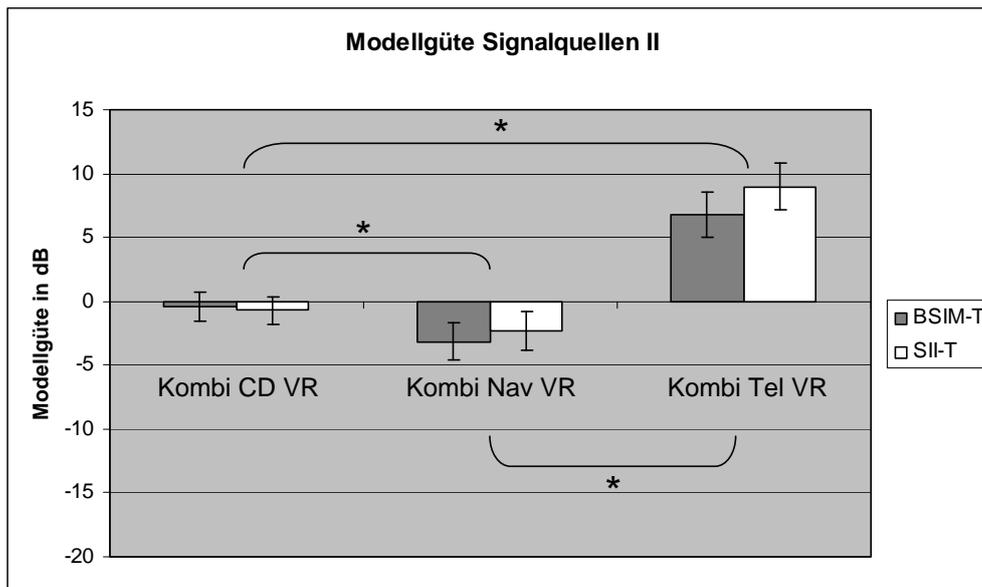


Abbildung 7.5: Mittelwerte der Modellgüte für unterschiedliche Signalquellen. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar. Die mit * gekennzeichneten post-hoc-Vergleiche auf dem Faktor System sind mit $p \leq .001$ signifikant.

erfüllt (siehe Anhang A2.1). In der Bedingung *Kombi Fahrer HR* war die Sprachverständlichkeit mit einem SRT von 0,3dB signifikant schlechter als in der Bedingung *Kombi HR Info*, wo der SRT -16,5dB betrug ($t_{[1,7]} = -30,170; p \leq .001$).

7.3.3.2 Sitzplatz

Zum Vergleich der empirischen SRTs in den Bedingungen *SUV Fahrer HR* und *SUV Fahrer 3. Reihe* wurden paarweise t-Tests durchgeführt. Die Anwendungsvoraussetzungen wurden erfüllt (siehe Anhang A2.1). In der Bedingung *SUV Fahrer HR* war die Sprachverständlichkeit mit einem SRT von -3,5dB signifikant schlechter als in der Bedingung *SUV Fahrer 3. Reihe*, wo der SRT -7,1dB betrug ($t_{[1,7]} = 7,607; p \leq .001$).

7.3.3.3 Sprachwiedergabesysteme als Signalquelle

Zum Vergleich der empirischen SRTs der Sprachwiedergabesysteme wurde ein Allgemeines Lineares Modell mit Messwiederholung berechnet. Der Messwiederholungsfaktor *System* hatte 3 Abstufungen (CD, Navigation, Telefon). Die Anwendungsvoraussetzungen waren erfüllt (siehe Anhang A2.3).

Die Versuchspersonen erzielten in der Bedingung *Kombi CD VR* einen SRT von -15,0dB, im *Kombi Nav VR* -21,6dB und -14,6dB in *Kombi Tel VR*. Entsprechend ergab sich ein signifikanter Effekt auf dem Faktor *System* ($F_{[1,2]} = 59,575; p \leq .001$). Die post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur ergaben, dass sich sowohl die Bedingung *Kombi CD VR* als auch *Kombi Tel VR* signifikant von der Bedingung *Kombi Nav VR* ($p \leq .001$) unterschieden. Die restlichen Bedingungen unterschieden sich nicht signifikant.

7.4 Diskussion

Das Experiment 2 diente der Untersuchung der Modellgüte der Sprachindizes bei deren Anwendung im Fahrzeuginnenraum mit speziellem Fokus auf den Einfluss verschiedener Sprachübertragungswege. Dazu wurden die empirisch erhobenen SRTs mit den von SII_T und $BSIM_T$ berechneten Werten verglichen.

7.4.1 Güte der Sprachindizes im Fahrzeug

Die Modellgüte des $BSIM_T$ war ähnlich derjenigen im Experiment 1. Die Differenz zwischen empirischen und modellierten SRTs lag zwischen 0,4 und 3,2dB. Auffallend hoch war die Abweichung in der Bedingung *Kombi Tel VR*. Diese lag bei 6,7dB und war die einzige Bedingung, in der das $BSIM_T$ den SRT deutlich überschätzte. Bis auf die Abweichungen in Höhe von -0,4dB in der Bedingung *Kombi CD VR* bzw. 0,4dB *SUV Fahrer HR* wurden wiederum alle Differenzen statistisch signifikant.

Das $BSIM_T$ modellierte die empirischen SRTs im Allgemeinen besser als der SII_T . Einerseits sind die absoluten Abweichungen zwischen Empirie und dem Modellwert kleiner und andererseits ist die Korrelation über alle Bedingungen höher als die des SII_T .

Die Abweichungen waren, wie bereits im Experiment 1 gezeigt wurde, auch in diesem Versuch beim SII_T in den meisten Bedingungen signifikant größer als beim $BSIM_T$. Die Vorteile des $BSIM_T$ blieben in der selben Größenordnung wie bei der Untersuchung der verschiedenen Störgeräuschsituationen, d.h. bei maximal 3dB.

Die Pegeldifferenzen zwischen den Ohren reichen offensichtlich für die Interpretation von Unterschieden zwischen binauralem und monauralem Modell nicht aus. Während die Auswertungen der Datenbank z.B. zeigen, dass die Pegeldifferenzen für das Entertainmentsystem im Vergleich zu den beiden Announcementkanälen (Telefon und Navigation) größer sind (siehe Abbildung 5.15), fällt die Differenz zwischen $BSIM_T$ und SII_T für diese beiden Bedingungen kleiner aus.

Generell scheinen die binauralen Effekte im Font des Fahrzeugs größer auszufallen als auf dem Beifahrersitz. Dies ist an den größeren Differenzen zwischen $BSIM_T$ und SII_T in diesen Bedingungen (*Kombi Fahrer HR*, *Kombi CD HR*, *SUV Fahrer HR*, *SUV Fahrer 3.Reihe*) zu erkennen.

Die Größe der Differenzen zwischen binauralem und monauralem Modell erhärtet die These aus dem Experiment 1, dass die akustischen Bedingungen im Fahrzeug am besten durch ein gerichtetes Sprachsignale im unkorrelierten Störgeräusch zu beschreiben sind. Moore (2003) wies den binauralen Vorteil in einer solchen Situation mit 3-4dB aus.

Die Korrelationen waren mit $r=.89$ (SII_T) bzw. $r=.92$ ($BSIM_T$) etwas kleiner als die im Experiment 1 erzielte Korrelation in Höhe von $r=.99$ für den Zusammenhang zwischen den empirischen SRTs der Normalhörenden und den Modellwerten des $BSIM_T$. Schließt man die Bedingung *Kombi Tel VR*, in der beide Sprachindizes eine auffällig schlechte Modellgüte aufwiesen, aus den Berechnungen aus, dann erhöht sich die Korrelation auf das

Niveau des ersten Experiments. Auch die Korrelation mit dem STI war mit $r=.77$ kleiner als im ersten Experiment, zeigte aber in anderen Bedingungen Auffälligkeiten (siehe Kapitel 7.4.2) als das $BSIM_T$ und der SII_T . Die höheren Korrelationen des $BSIM_T$ mit den empirischen Daten zeigt auch in diesem Experiment, dass das $BSIM_T$ eine homogenere Vorhersage für die unterschiedlichen Bedingungen aufweist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des zweiten Experiments aber, dass die Vorteile des $BSIM_T$ nicht nur in den verschiedenen Störgeräuschsituationen im Fahrzeug auftreten, sondern auch bei den Sprachübertragungswegen.

7.4.2 Einfluss einzelner Wirkgrößen auf die Güte des SII_T und des $BSIM_T$

Die Ergebnisse zur Robustheit der Modelle in Abhängigkeit der untersuchten Wirkgrößen für die Normalhörenden entsprachen, wie bereits im Experiment 1, nicht den Erwartungen. Zwar zeigte das $BSIM_T$ in einem Großteil der Bedingungen zwischen den Situationen kleinere Unterschiede als der SII_T , aber es war statistisch nicht stabiler. Anschließend werden aber noch einige interessante Ergebnisse zur Modellgüte auch im Vergleich zu den Ergebnissen des STI dargestellt.

Wie bereits in Kapitel 5 gezeigt wurde, unterscheiden sich die Spektren der Sprachsignale erheblich in Abhängigkeit davon, ob sie über das Entertainmentssystem (CD) wiedergegeben werden oder der Fahrer spricht. Die Modellgüte des $BSIM_T$ und des SII_T war unabhängig von diesen spektralen Unterschieden. Dies spricht dafür, dass die sehr genaue Betrachtung des Spektrums des Signals in 1/3-Oktav-Bändern zu einer adäquaten SRT-Schätzung der beiden Indizes führt.

Interessant ist in diesem Zusammenhang der bessere Indexwert des STI im Vergleich zum SII_T für die Bedingung *Kombi Fahrer HR*. Wie in der Abbildung 5.17 zu erkennen ist, zeichnet sich das Spektrum durch einen ausgeprägten Hochtonabfall aus. In der Norm DIN IEC 60268-16 (DIN, 2009) wurde angegeben, dass der STI in Situationen mit Signalen, die keinen flachen Frequenzverlauf aufweisen, zu hohe Werte berechnet. Dies könnte mit der geringeren Frequenzauflösung in lediglich 5 Oktavbändern und der einfacheren Implementierung der Aufwärtsverdeckung im STI zusammenhängen (siehe Kapitel 3).

Ein ähnlicher, wenn auch nicht so ausgeprägter Effekt, zeigte sich auch in den beiden Insassenkommunikationsbedingungen des SUV, die einen ähnlich Verlauf im Frequenzspektrum aufwiesen (siehe Abbildung 5.25).

Bei der Untersuchung der verschiedenen Sprachwiedergabesysteme zeigte sich, dass die Modellgüte des $BSIM_T$ für die Sprachwiedergabe mittels Navigations- bzw. Entertainmentssystem in dem Bereich lagen, wie sie bereits im Experiment 1 aufgetreten waren. Die Modellierung für die Telefonübertragung fiel dagegen deutlich größer aus. Darüber hinaus war dies die einzige Bedingung, in der die Modelle ein signifikant besseren SRT vorhersagten als von den Versuchspersonen erreicht wurde. Interessant ist der deutlich niedrigere STI-Wert in dieser Situation. Der STI betrachtet im Unterschied zum SII_T bzw.

$BSIM_T$ zusätzlich zum spektralen SNR die Modulationstiefen im Sprachsignal. Diese werden zum einen durch die Störgeräusche und zum anderen durch Nachhall oder sonstige zeitliche Veränderungen im Signal verringert. Nach Houtgast und Steeneken (1973) geht damit eine Verringerung der Sprachverständlichkeit einher.

Betrachtet man die gemessenen Modulationsspektren in Abbildung 5.16 ist zu erkennen, dass das Sprachsignal über Telefon deutlich geringere Modulationen aufweist. Der SII_T bzw. das $BSIM_T$ beachten dagegen diese Veränderungen im Signal nicht, sondern orientieren sich lediglich am Langzeitspektrum des Signals. In diesem weist die Telefonübertragung zwar eine Begrenzung bei 4kHz auf (siehe Abbildung 5.15). Dadurch sind allerdings keine erheblichen Einbußen der Sprachverständlichkeit zu erwarten (Lazarus et al., 2007). Auch die im Verhältnis zum Navigationssystem deutlich lauter übertragenen mittleren Frequenzen sprechen gegen einen so erheblichen Einbruch der empirischen Sprachverständlichkeit für die Telefonübertragung im Verhältnis zum Navigationssystem.

Somit könnte die Diskrepanz zwischen der Vorhersage eines guten SRT durch den SII_T und das $BSIM_T$ einerseits und ein im Verhältnis schlechterer empirischer SRT und der ebenfalls niedrige Wert des STI andererseits als Effekt der verringerten Modulationen im Sprachsignal interpretiert werden. Bereits Humes et al. (1986) hatten darauf hingewiesen, dass der STI eine genauere Vorhersage für zeitlich verzerrte Signale macht als der AI. Larm und Hongisto (2006) hatten gezeigt, dass der SII bei Verringerung der Modulationen im Sprachsignal eine schlechtere Vorhersage erzielte als der STI und der SII mit integrierter Modulations-Transfer-Funktion. Eine weitere Arbeit belegt auch die Verbesserung der Vorhersage des BSIM durch die Einbeziehung verschiedener raumakustischer Parameter (Rennies, Brand & Kollmeier, in Druck). Diese Verbesserung sollte grundsätzlich auch für Veränderungen der Modulationen im Sprachsignal bei der Telefonübertragung gelten.

Die Modellgüte war in der dritten Sitzreihe sowohl für den SII_T als auch für das $BSIM_T$ signifikant schlechter als in der zweiten Sitzreihe. Es deutete sich aber durch einen kleineren Unterschied in der Vorhersage der beiden Situationen an, dass sich das $BSIM_T$ etwas stabiler verhält.

Bereits im ersten Experiment hatte sich ein ähnlicher Effekt angedeutet. Dort war die Vorhersage für die Verständlichkeit des Entertainmentsystems auf dem Beifahrerplatz signifikant besser als auf der Rückbank. Da sich aber dort Sprachsignal und Störgeräusch unterschieden, konnte die Ursache nicht klar zugeordnet werden.

Vermuten lässt sich, dass die akustischen Verhältnisse im Front eines Fahrzeuges komplexer sind als auf den vorderen Plätzen und dadurch größere Unterschiede zwischen empirischen und modellierten SRTs auftreten. Der Unterschied wurde aber auch in diesem Versuch nicht explizit untersucht und könnte Gegenstand eines zukünftigen Experiments sein.

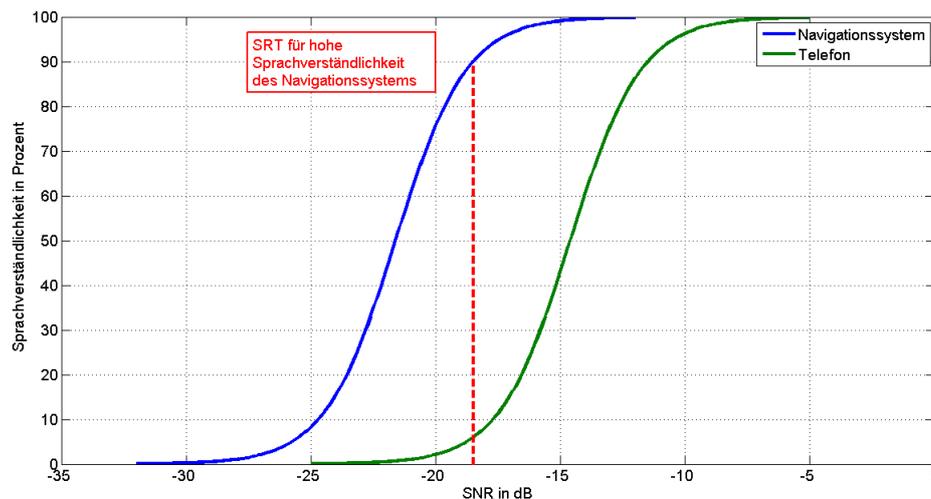


Abbildung 7.6: Empirische Sprachverständlichkeit des Navigationssystems und der Telefonübertragung im Oberklasse Kombi. Die SRTs entstammen der Sprachaudiometrie im Experiment 2 und beziehen sich auf einen SNR von 0dB von Sprachsignal und Störgeräusch.

7.4.3 Auswirkung von Signalquelle und Sitzplatz auf die empirischen SRTs

Es zeigte sich, dass die untersuchten Sprachübertragungswege, z.T. zu eklatant unterschiedlichen empirischen SRTs führten. Während für die Übertragung der Sprache über das Entertainmentsystem der Unterschied bei verschiedenen Störgeräuschbedingungen innerhalb eines Fahrzeuges bis zu 4dB betrug (vgl. Kapitel 6 Hauptbedingungen I, VI und VII), waren die Unterschiede in Abhängigkeit des Sprachübertragungsweges deutlich größer. Im Oberklasse Kombi ist die Sprachverständlichkeit der Navigationsansage mit einem SRT-Unterschied von ca. 7dB deutlich besser als für die CD-Wiedergabe über das Entertainmentsystem. Den gleichen Vorteil weist die Telefonfreisprechanlage, die ebenso wie das Navigationssystem vor allem sprachliche Inhalte wiedergibt, nicht auf. In der Abbildung 7.6 ist die psychometrische Funktion des OLSA für die Sprachverständlichkeit des Navigationssystems und der Telefonübertragung dargestellt. Bei gleichem Sprachpegel kann sich zwischen beiden Systemen ein Unterschied von „sehr gutem Verstehen“ der Navigationsansage zu „kaum Verstehen“ eines Telefonanrufs ergeben.

Weit über 10dB ist der SRT für Insassen auf der Rückbank schlechter, wenn der Fahrer zu ihnen spricht und nicht die Wiedergabe über das Entertainmentsystem erfolgt. Dieser Effekt erklärt sich bei Betrachtung der Abbildung 5.17, wo zu erkennen ist, dass die hohen Frequenzen bei diesem Weg der Sprachübertragung sehr stark gedämpft werden. Unberücksichtigt ist hier aufgrund der Verwendung des Kunstkopfes als „Sprecher“, der sogenannte Lombard-Effekt. Dieser führt dazu, dass ein Sprecher seinen Sprechpegel in Anwesenheit von Störgeräuschen erhöht. Diese liegt bei ca. 0,5dB pro 1dB Zunahme an Störgeräuschpegel (Nijs, Saher & Ouden, 2008). Diese Erhöhung geht mit einer, in der Abbildung 7.7 dargestellten, deutlichen Anhebung des mittleren und oberen Frequenzbereichs einher (vgl. ANSI, 1997).

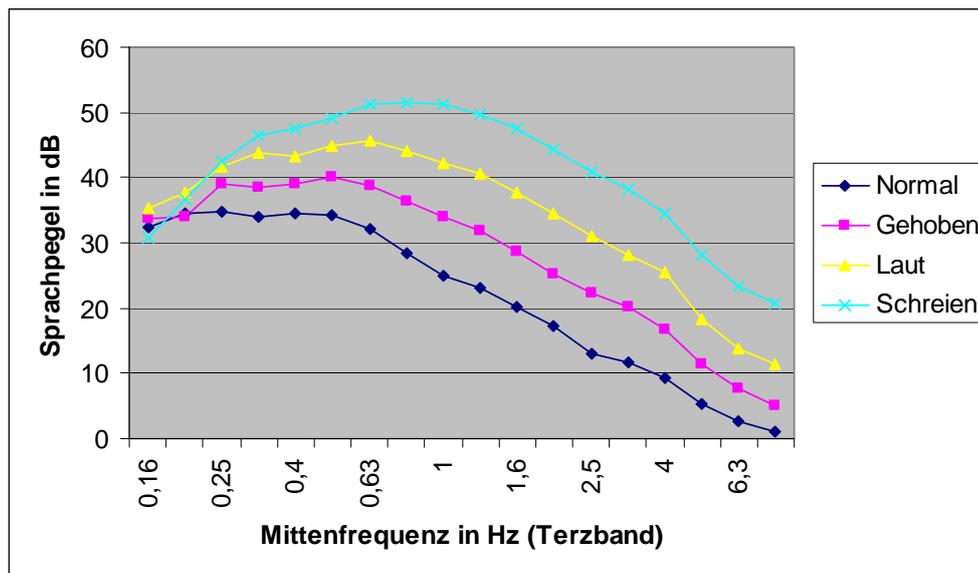


Abbildung 7.7: Spektrale Standardsprachpegel für verschiedene Sprechweisen nach ANSI S3.5-1997 (Jun. 1997).

In der realen Fahrsituation sollte dies zu einer besseren Sprachverständlichkeit, als der hier erzielten, führen. Überträgt man die Ergebnisse des vorgestellten Experiments unkorrigiert auf die akustischen Bedingungen im Fahrzeug, muss man bspw. für den Mittelklasse Kombi von einem Störgeräuschpegel in Höhe von ca. 97dB(SPL) ausgehen. Bei dem in dieser Situation ermittelten SRT von ca. 0dB ist der erforderliche Sprachpegel bereits deutlich größer als derjenige, der für Schreien in 1m Abstand vom Mund nach vorn angenommen wird. Dieser liegt bei ca. 82dB (Bormann et al., 2005). Die Einberechnung des Lombard-Effektes mag den SRT verbessern, aber gleichzeitig wird Pegel durch die Entfernung zwischen Sprecher und Hörer wieder verringert.

Trotzdem kann dieses Ergebnis als weiterer empirischer Nachweis der ungünstigen akustischen Bedingung für Insassenkommunikation im Vergleich zu den elektronischen Wiedergabesystemen gelten. Die Ergebnisse von Schucht et al. (2008), die mit dem STI Messungen der Sprachverständlichkeit in einem Kleinbus bei 100 km/h durchführten, zeigten bereits, dass die Sprachkommunikation auf den hinteren Plätzen unter 0.6 (schwach bis ausreichend) lag. Auch subjektiv wird die Insassenkommunikation von Autofahrern als unzureichend beurteilt (Fischer et al., 2008).

Interessanterweise erreichten die Versuchspersonen in der dritten Sitzreihe des untersuchten SUV einen besseren SRT als in der zweiten. Dies erscheint im ersten Moment kontraintuitiv, weil in einer realen Fahrsituation der Sprachpegel mit der Entfernung zwischen Sprecher und Hörer abnimmt. Es muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass dieser Pegelabfall, wie bereits beschrieben, in der durchgeführten Sprachaudiometrie keine Berücksichtigung findet. Diese Differenz spiegelt lediglich die spektralen Unterschiede der beiden Situationen bei gleichem Pegel wider. Wie in der Ab-

bildung 5.25 zu erkennen ist, ist das Sprachsignal in der dritten Reihe auch etwas hochfrequenter. Damit erscheint auch ein besserer SRT in der 3. Sitzreihe des SUV plausibel.

7.4.4 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die binaurale Modellierung $BSIM_T$ auch für die Sprachübertragungswege im Fahrzeug eine bessere Vorhersage der Sprachverständlichkeit zeigt. Der Vorteil gegenüber der monauralen Modellierung war ähnlich groß wie im Experiment 1. Dabei sind die binauralen Effekte im Font des Fahrzeugs offensichtlich größer als auf dem Beifahrersitz. Gleichzeitig scheinen aber die akustischen Bedingungen komplexer zu sein, weil die Modellgüte für die Sprachübertragung des Entertainmentsystems und für den Fahrer als Sprecher im Font im Allgemeinen schlechter ausfällt als auf dem Platz davor.

Die Korrelationen zwischen den Sprachindizes und den empirischen SRTs waren etwas geringer als im Experiment 1 genau wie der Unterschied der Korrelationen des binauralen und des monauralen Modells. Dies spricht dafür, dass Wirkgrößen im Sprachsignal sich ungünstig auf die Modellstabilität für verschiedene Situationen auswirken. In diesem Sinne haben die Sprachindizes noch Optimierungspotential. Ein Hinweis darauf, dass die Einbeziehung der Modulationen in die Berechnungen des $BSIM_T$ und des SII_T einen Vorteil bringen könnte, geben die Berechnung der Indizes für die Telefonübertragung. Hier waren die berechneten Indexwerte des $BSIM_T$ und des SII_T deutlich zu gut, während die Berechnungen des STI plausibler erschienen. Die Korrelationen zwischen den Sprachindizes und den empirischen SRTs waren etwas geringer als im Experiment 1 genau wie der Unterschied der Korrelationen des binauralen und des monauralen Modells. Dies spricht dafür, dass Wirkgrößen im Sprachsignal sich ungünstig auf die Modellstabilität für verschiedene Situationen auswirken. In diesem Sinne haben die Sprachindizes noch Optimierungspotential. Ein Hinweis darauf, dass die Einbeziehung der Modulationen in die Berechnungen des $BSIM_T$ und des SII_T einen Vorteil bringen könnte, geben die Berechnung der Indizes für die Telefonübertragung. Hier waren die Indexwerte des $BSIM_T$ und des SII_T deutlich zu gut, während die Berechnungen des STI plausibler erschienen.

Interessant war weiterhin das Ergebnis für die empirische Sprachverständlichkeit innerhalb eines Fahrzeugs. Hier zeigten sich teilweise so deutliche Unterschiede, dass bei gleichem Sprachpegel ein Wiedergabesystem sehr gut verstanden werden kann, während das zweite völlig unverständlich ist.

8. Experiment 3 - Sprachindizes und Kommunikationsqualität im Kfz

In den Experimenten 1 und 2 wurde gezeigt, dass das $BSIM_T$ die Sprachverständlichkeit, erhoben als SRT, unter verschiedensten akustischen Bedingungen im Fahrzeug bestimmen kann. Der SRT entspricht nach Beutelmann und Brand (2006) einem SII-Wert von 0,2. Bei diesem Wert werden demnach bereits 50% Sprachverstehen erreicht, obwohl die Sprachindizes Werte von 0 bis 1 berechnen.

Die Beziehung der Indexwerte zur Sprachverständlichkeit lässt sich grundsätzlich als monoton steigende Funktion beschreiben. Der genaue Zusammenhang hängt aber u.a. vom verwendeten Sprachmaterial ab. Betrachtet man die psychometrische Funktion des Oldenburger Satztests (OLSA; Wagener et al., 1999b; vgl. Abbildung 2.2), ist zu erkennen, dass die Sprachverständlichkeit ausgehend vom SRT relativ schnell, d.h. innerhalb von 2-3dB, in den Sättigungsbereich übergeht.

Wie im Kapitel 3.2 beschrieben, sind Transferfunktionen zwischen den Werten des SII und der Sprachverständlichkeit in der Norm ANSI S3.5-1997 für verschiedenes englischsprachiges Material angegeben (vgl. ANSI, 1997). Im $BSIM_T$ wird die Transferfunktion für den englischen Worttest SPIN verwendet. Dieser Ansatz führt, wenn man die Ergebnisse der Experimente 1 und 2 und von Beutelmann und Brand (2006) betrachtet, zu guten Ergebnissen bei der Bestimmung des SRT. Möchte man aber, wie die Audi AG, eine wesentlich höhere Sprachverständlichkeit und eine gute Kommunikationsqualität erzielen, ist der Bereich oberhalb des SRT wesentlich interessanter. Somit stellt sich die Frage, wie die Sprachverständlichkeit oberhalb des SRT mit den Werten der Sprachindizes zusammenhängt.

Darüber hinaus gibt es erste Befunde, dass die Sprachindizes mit subjektiven Bewertungen stärker korrelieren als mit der Sprachverständlichkeit (Sato et al., 2008), sodass sich die Frage auf den Zusammenhang zwischen den Sprachindizes und der subjektiven Wahrnehmung der Hörsituation ausweiten lässt.

Zur Untersuchung dieser Frage wurde ein weiteres Experiment entwickelt, in dem einzelne Hörsituationen aus den Experimenten 1 und 2 untersucht werden (siehe Tabelle 8.1). In den Experimenten 1 und 2 wurden die Sprachsignale und Störgeräusche auf 65dB(SPL) kalibriert. Dagegen werden im Experiment 3 die Fahrgeräusche bei realen Pegeln wiedergegeben. Die Sprachsignale werden, ausgehend vom SRT jeder Bedingung, bei einheitlichen, steigenden Sprachsignal-Störgeräusch-Abständen (SNR) dargeboten. In Abhängigkeit dieser SNRs werden die Sprachverständlichkeit und die Bewertung der Hörsituation von normalhörenden und hörgeschädigten Versuchspersonen erhoben.

Im Kapitel 2.3 wurden verschiedene Konstrukte und Skalen zur subjektiven Bewertung der Hörsituation vorgestellt. Volberg et al. (2004), Volberg et al. (2006) und Sust et al.

Tabelle 8.1: Untersuchungsbedingungen im Experiment 3.

Bedingung	Sprachsignal	Störgeräusch	Position	Kurzname
SRT-Messung				
a)	Telefon	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi Tel VR
b)	Entertainment	SUV, 150 km/h	Beifahrer	SUV
Bewertung I	Fahrer	SUV, 150 km/h	Rückbank	SUV Fahrer HR
Bewertung II	Entertainment	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi CD VR
Bewertung III	Navigation	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi Nav VR
Bewertung IV	Telefon	Oberklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi Tel VR
Bewertung V	Fahrer	Mittelklasse Kombi, 150 km/h	Rückbank	Kombi Fahrer HR
Bewertung VI	Entertainment	Mittelklasse Kombi, 150 km/h	Beifahrer	Kombi 150 km/h
Bewertung VII	Entertainment	Mittelklasse Cabrio, 150 km/h, offenes Verdeck	Beifahrer	Cabrio auf
Bewertung VIII	Entertainment	Mittelklasse Kombi, 180 km/h	Beifahrer	Kombi 180 km/h

(2007) nutzten den Begriff Kommunikationsqualität und untersuchten dafür die Konzentration, Belästigung, Situationsbewältigung und die subjektive Sprachverständlichkeit. Diesem Konzept liegt eine ergonomische Sichtweise zugrunde, die auch für die Beurteilung der Hörsituation im Kfz sinnvoll erscheint. Denn die Sprachwiedergabe im Fahrzeug soll den Fahrer nicht zusätzlich belasten, aber gleichzeitig die Leistung und den Komfort verbessern (DIN, 2007). Die DIN EN ISO 15006 weist außerdem darauf hin, dass im Fahrzeug auch ein Kompromiss zwischen Hörbarkeit und Hörkomfort in Bezug auf die Lautstärke des Signals hergestellt werden muss (DIN, 2007). So wurde in Anlehnung an die Arbeiten von Volberg et al. (2004), Volberg et al. (2006) und Sust et al. (2007) und die Empfehlungen für akustische Fahrerinformationssysteme nach DIN EN ISO 15006 (DIN, 2007) die Hörsituation anhand der Kommunikationsqualität mit folgenden vier Items bewertet:

- Konzentration bzw. Höranstrengung
- subjektive Sprachverständlichkeit
- Belästigung durch Störgeräusche
- Lautstärke der Sprache

Inhaltlich wurden die ersten drei Items bereits im Kapitel 2.3 beschrieben. Die *Lautstärke der Sätze* soll, wie in DIN EN ISO 15006 (DIN, 2007) gefordert, die wahrgenommene Lautheit des Signals in Bezug auf dessen Hörbarkeit (zu leise) und Komfortempfinden bis zur Unbehaglichkeitsschwelle (zu laut) abbilden.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Experiments sollen Aussagen zum Zusammenhang zwischen den Sprachindizes und der Sprachverständlichkeit bzw. der Kommunikationsqualität oberhalb des SRT getroffen werden.

8.1 Fragestellung und Hypothesen

Die Untersuchungen der Kommunikationsqualität, der Sprachverständlichkeit und des $BSIM_T$ erfolgte anhand von acht ausgewählten Bedingungen, die sich hinsichtlich der Karosserie, Sitzposition und Signalquelle unterschieden (siehe Tabelle 8.1). In den Experimenten 1 und 2 hatte sich gezeigt, dass sich die Sprachverständlichkeit zwischen den untersuchten Bedingungen stark unterschied. Für generell gültige Aussagen zur Sprachverständlichkeit und Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR müssen diese vergleichbar sein. Deshalb wurde der SRT der Hörergruppen (normalhörend und hörgeschädigt) und in den einzelnen Bedingungen als Ankerpunkt genutzt. Der SNR wurde dann ausgehend vom SRT in 4dB-Abständen variiert und die subjektive Bewertung der Kommunikationsqualität erfasst.

Im ersten Schritt werden die Auswirkungen dieses methodischen Vorgehens auf die Ergebnisse in diesem Experiment qualitativ betrachtet.

Die deskriptive und inferenzstatistische Auswertung der Resultate erfolgt ausgehend von den nachfolgend dargestellten empirischen Untersuchungen.

Sust et al. (2007) und Sust et al. (2009) hatten zeigen können, dass die untersuchten Items der Kommunikationsqualität hoch miteinander korrelierten. Diese Ergebnisse legen nahe, dass auch die hier untersuchten Items der Kommunikationsqualität im Kfz generell eine gemeinsames Konstrukt erheben, d.h. eine hohe interne Konsistenz aufweisen. Entsprechend lautet die Hypothese:

Hypothese 1

Die Bewertungen der *Konzentration*, der *subjektiven Sprachverständlichkeit*, der *Belästigung* und der *Lautstärke der Sätze* weisen unabhängig vom SNR eine hohe interne Konsistenz auf. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Dieser Zusammenhang zwischen verschiedenen Qualitätsdimensionen nimmt aber ab, wenn die Sprachverständlichkeit ein hohes Niveau erreicht (Preminger & Van Tassel, 1995a). Das heißt, wenn die Sprachverständlichkeit gut ist, stellen die Items unterschiedliche Qualitätsaspekte der Hörsituation dar, die innerhalb einer umfassenden Bewertung Berücksichtigung finden sollten. Entsprechend lautet die Hypothese:

Hypothese 2

Die Korrelationen zwischen den Bewertungen der Items nehmen mit steigendem SNR ab. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

In vielen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Veränderungen oberhalb des SRT durch subjektive Beurteilungen besser wiedergegeben werden als durch die Sprachverständlichkeit (Volberg et al., 2004, 2006; Sust et al., 2007, 2009; Sato et al., 2005, 2008;

Morimoto et al., 2004). Dies sollte auch für die subjektiv erhobene Kommunikationsqualität im Experiment 3 gelten. Die entsprechende Hypothese lautet:

Hypothese 3

Die Zunahme der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR ist größer als die Zunahme der Sprachverständlichkeit. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Anschließend wird der Zusammenhang zwischen der Bewertung der Kommunikationsqualität, der Sprachverständlichkeit und den Sprachindizes untersucht. Sato et al. (2008) hatten gezeigt, dass in verschiedenen akustischen Situationen mit Nachhall der Sprachindex STI hoch mit der Höranstrengung korreliert. Dieser Zusammenhang wurde noch nicht unter Störgeräuschbedingungen untersucht.

Allerdings können sowohl in Situationen mit Nachhall als auch mit Störgeräuschen Wahrnehmungsunterschiede anhand der Höranstrengung gemessen werden (Sato et al., 2005). Ebenso misst der STI Wahrnehmungsunterschiede sowohl in Nachhall- als auch in Störgeräuschbedingungen (Houtgast & Steeneken, 1971, 1973; Steeneken & Houtgast, 2002b). Somit ist zu erwarten, dass der STI auch einen Zusammenhang mit der Höranstrengung unter Störgeräuschbedingungen aufweist.

Außerdem haben Untersuchungen zu den Sprachindizes gezeigt, dass die Werte des STI und des SII miteinander korrelieren (Larm & Hongisto, 2006; Bowden & Wang, 2007). Deshalb kann angenommen werden, dass es auch einen Zusammenhang zwischen Höranstrengung und SII gibt.

Die Höranstrengung bzw. die synonym verwendete Konzentration ist eines der Items der Kommunikationsqualität, die hoch miteinander korrelieren (Volberg et al., 2004, 2006; Sust et al., 2007). Somit ist anzunehmen, dass der STI auch mit dem Gesamt-Konstrukt Kommunikationsqualität korreliert.

Somit lässt sich vermuten, dass der Zusammenhang zwischen Höranstrengung und STI übertragbar ist auf:

- die Kommunikationsqualität
- den SII_T und das $BSIM_T$
- die Anwendung im Fahrzeug

Die entsprechende Hypothese lautet:

Hypothese 4

Die Kommunikationsqualität im Fahrzeug korreliert mit dem SII_T , dem $BSIM_T$ und dem STI. Dies gilt sowohl für die normalhörenden als auch die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Für den STI (DIN, 2009) gibt es eine Zuordnung der Indexwerte zu Qualitätsstufen für Sprachverständlichkeit (vgl. Tabelle 3.1). Der STI ist, wie im Kapitel 3.2 ausgeführt, nicht

für deutsches sondern für niederländisches CVC- und englisches PB-Sprachmaterial evaluiert. Außerdem wurde die Gültigkeit seiner Berechnungen nicht unter den speziellen akustischen Bedingungen eines Fahrzeuginnenraums systematisch überprüft. Das heißt, die angegebenen Qualitätsstufen für Sprachverständlichkeit sind nicht zwangsläufig auf den in dieser Arbeit untersuchten Anwendungsbereich Kfz übertragbar. Diese Auffassung vertreten auch Bormann et al. (2005) und nehmen an, dass für jede Hörsituation und jedes Vorhersagemodell die Sprachverständlichkeit empirisch erhoben werden muss, um konkrete Aussagen zur Sprachverständlichkeit treffen zu können.

Aus diesem Grund wird die Zuordnung der Indexwerte des STI zu den Qualitätsstufen für die Kommunikationsbedingung im Fahrzeug überprüft und gegebenenfalls angepasst. Darüber hinaus soll auf Basis der im Experiment 3 erhobenen Daten eine ähnliche Zuordnung des SII_T bzw. des $BSIM_T$ zu diesen Qualitätsstufen erfolgen.

8.2 Methode

8.2.1 Personen

Am Experiment 3 nahmen 40 Personen aus dem Probandenpool des Hörzentrums Oldenburg teil. Die 20 normalhörenden Versuchspersonen waren zwischen 36 und 64, im Durchschnitt rund 47 Jahre alt. Davon waren 14 Versuchspersonen weiblichen und sechs männlichen Geschlechts. Die 20 hörgeschädigten Versuchspersonen waren zwischen 33 und 74 Jahren, im Mittel ca. 64 Jahre alt. Davon waren elf Personen weiblichen und neun männlichen Geschlechts. Keine der Versuchspersonen war mit Hörgeräten versorgt.

8.2.2 Versuchsaufbau

8.2.2.1 Apparatur

Der Versuch wurde im Hörzentrum Oldenburg in einer schallgedämmten Hörkabine durchgeführt. In der Abbildung 8.1 ist die Versuchsanordnung dargestellt. Für die Erhebung der Sprachverständlichkeit kam ein Dell Optiplex GX 620 mit einer RME DIGI 96/8 als Soundkarte und als Kopfhörerverstärker der HIFI-Vollverstärker NAD 306 zum Einsatz.

Als Kopfhörer wurde ein Sennheiser HDA 200 verwendet. Als Audiometer wurde das Siemens Unity 2 verwendet und diente zusammen mit der Software NOAH 3.05 der Audiometrie und der Archivierung der Hörfähigkeit der Versuchspersonen.

Die Sprachverständlichkeit wurde mit dem Oldenburger Satztest (OLSA; Wagener et al., 1999a) ermittelt, der in den Oldenburger Messprogrammen der Firma Hoertech in der Version 1.3.0.8 integriert war.

Die Bewertung der Kommunikationsqualität wurde von den Versuchspersonen mündlich anhand einer Papierversion der vier Items der Kommunikationsqualität vorgenommen (siehe Kapitel 8.2.3). In der Abbildung 8.2 sind die vier Bewertungsbalken abgebil-



Abbildung 8.1: Versuchsanordnung im Experiment 3 in einer Hörkabine am Hörzentrum Oldenburg.

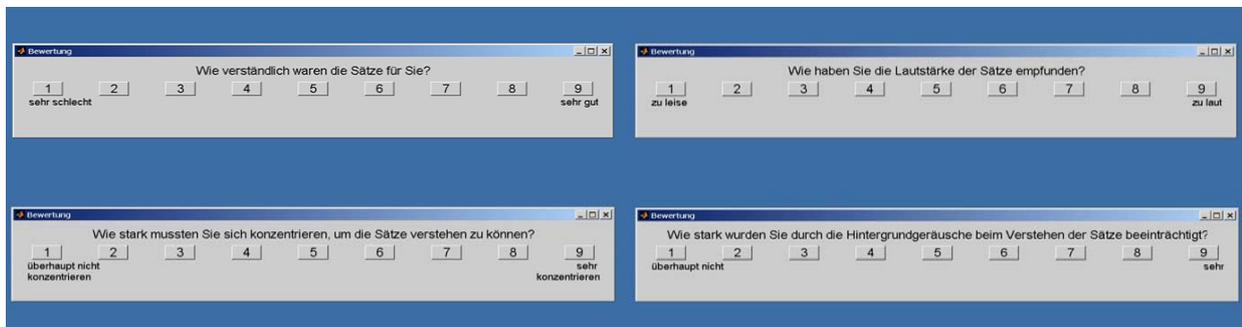


Abbildung 8.2: Die Bewertungsbalken zur Beurteilung der dargebotenen SNRs.

det. Die Beurteilung erfolgte auf Skalen mit neun Bewertungsmöglichkeiten, die den Versuchspersonen ermöglichen sollte, die verschiedenen SNR-Bedingungen pro akustischer Situation differenziert beurteilen zu können. Die Pole waren mit den extremen Urteilen beschriftet, um Boden- und Deckeneffekte der Bewertungen zu vermeiden.

Die Versuchsleitung gab durch Anwählen der genannten Zahl auf der graphischen Oberfläche am PC die Bewertung in MathWorks MATLAB ein, wo diese dann geordnet abgespeichert wurden.

8.2.2.2 Stimuli

Als Sprachsignal wurde wiederum der OLSA (Wagener et al., 1999a) verwendet (vgl. Kapitel 6.2.2.2). Die Sprachsignale wurden, wie im Kapitel 5.2.2 beschrieben, durch Faltung gewonnen und die zugehörigen Störgeräusche aus der Datenbank ausgewählt.

Die Kalibrierung für diesen Versuch wurde im Unterschied zu den Experimenten 1 und 2 in dB(A) durchgeführt. Für die Sprachaudiometrie zur Bestimmung der SRTs wurden die Signale über den linken Kanal des Kopfhörers an dem künstlichen Ohr 4135 von Brüel & Kjær auf 65dB(A) und damit auf einen SNR von 0dB kalibriert.

Für die Bewertungsbedingungen wurden die Störgeräusche auf die realen dB(A)-Pegel im Fahrzeug kalibriert (siehe Tabelle 8.2 bzw. 8.3). Lediglich in der Bedingung *Cabrio auf* wurde der Pegel aus technischen und Gründen des Gehörschutzes um 12dB reduziert. Dazu wurden die Sprachsignale anhand festgelegter SNRs in dB(A) präsentiert (vgl. Kapitel 8.2.6).

8.2.3 Versuchsplan

Jede Versuchsperson durchlief neun akustische Bedingungen (siehe Tabelle 8.1).

In der ersten Bedingung (SRT-Messung) wurde der SRT als abhängige Variable gemessen. Davor durchlief jede der Versuchspersonen zwei zugehörige Übungsmessungen. Der SRT wurde bei der Hälfte der Versuchspersonen in der Bedingung *Kombi Tel VR*, bei der anderen Hälfte in der Bedingung *SUV* erhoben. Auf die Darstellung dieser Ergebnisse wird im weiteren Verlauf der Arbeit verzichtet.

Die Bewertungsbedingungen I - VIII simulierten die realen akustischen Bedingungen im Fahrzeug (vgl. Tabelle 8.1), wobei die Karosserie, der Sitzplatz und die Signalquelle variiert wurden. Die Sprachverständlichkeit und die Bewertung der Kommunikationsqualität wurden in jeder Bedingung in Abhängigkeit des SNR erhoben.

Im Allgemeinen wurden sechs SNRs pro Versuchsbedingung dargeboten, die ausgehend vom SRT der Bedingung 4dB auseinander lagen. So ergaben sich SNRs von +4dB bis +24dB (vgl. Kapitel 8.2.6).

Die Bewertung der Kommunikationsqualität wurde anhand der folgenden Fragen (vgl. Abbildung 8.2) auf einer Skala von 1 bis 9 vorgenommen. In den Klammern sind die Bezeichnungen der Pole ausgewiesen.

- Belästigung: Wie stark wurden Sie durch die Hintergrundgeräusche beim Verstehen der Sätze beeinträchtigt? (überhaupt nicht - sehr)
- Konzentration: Wie sehr mussten Sie sich konzentrieren, um die Sätze verstehen zu können? (überhaupt nicht - sehr)
- subjektive Bewertung der Sprachverständlichkeit: Wie verständlich waren die Sätze für Sie? (sehr schlecht - sehr gut)
- Lautstärke der Sätze: Wie haben Sie die Lautstärke der Sätze empfunden (zu leise - zu laut)?

Die Sprachverständlichkeit wurde pro SNR anhand von vier Sätzen gemessen und ist der Prozentsatz der verstandenen an den dargebotenen Wörtern.

8.2.4 Durchführung

Die Versuchspersonen wurden von der Versuchsleitung begrüßt und in den Untersuchungsraum geführt. Dort nahmen sie auf dem dafür vorgesehenen Stuhl Platz und wurden mündlich anhand eines Gesprächsleitfadens über den Versuchsablauf informiert.

Zuerst wurde bei allen Versuchspersonen eine Audiometrie durchgeführt. Danach folgten die beiden Übungsmessungen, in deren Anschluss der SRT in dieser akustischen Situation erhoben wurde.

Nach einer kurzen Pause wurden die Bewertungen zur Kommunikationsqualität im Fahrzeug durchgeführt. Zur Vermeidung von Reihenfolge- und Trainingseffekten, wurden die Bedingungen in pseudorandomisierter Reihenfolge dargeboten. Die innerhalb einer Bedingung dargebotenen SNRs und deren anschließende Wiederholung wurden ebenfalls pseudorandomisiert. Dabei wurde Wert darauf gelegt, keine zu großen Pegelsprünge bei aufeinanderfolgenden SNRs zu produzieren.

Nach dieser in etwa 40 Minuten dauernden Messung füllten die Versuchspersonen noch einen Fragebogen mit ihren demographischen Angaben aus und wurden durch ein festgelegtes Entgelt entlohnt. Falls es gewünscht wurde, erhielten die Probanden zum Schluss weitere Informationen über den Versuch und wurden nach sonstigen Anmerkungen gefragt.

Die Pausen einbezogen erstreckte sich der Versuch damit über ca. 1,25 Stunden (siehe Abbildung 8.3).

Versuchsteil I	Zeit	Versuchsteil II	Zeit
Begrüßung & Instruktion	5 min	Bewertung der Kommunikationsqualität	
Audiometrie			
Pause	15 min		
Übung und Schwellenmessung			
Pause	30 min		
		Pause	75 min
		Fragebogen, Debriefing, Entlohnung	80 min

Abbildung 8.3: Versuchsablauf im Experiment 3.

Instruktion

Zusätzlich zu der bereits im ersten Experiment (6.2.4) beschriebenen Instruktion der Versuchspersonen für die Sprachaudiometrie wurde der Ablauf der Bewertung der Kommunikationsqualität erklärt. Die Versuchspersonen wurden darauf aufmerksam gemacht, dass die dargebotenen Geräusche laut sein würden, so wie sie in einem Fahrzeug bei ei-

ner schnellen Fahrt auf der Autobahn aufträten. Dazu kämen Sätze in unterschiedlichen Lautstärken. Sie wurden gebeten, die Sätze nachzusprechen und danach anhand der gezeigten Skalen die Bewertung der Kommunikationsqualität vorzunehmen. Ihnen wurde erklärt, dass sie die Frage anhand der gezeigten Skala durch verbalisieren einer Zahl, die ihrer Empfindung entspräche, beantworten sollten. Die Beurteilung solle möglichst spontan erfolgen und es gäbe keine richtigen oder falschen Antworten. Im Anschluss hätten Sie noch einen Fragebogen auszufüllen. Außerdem wurde den Versuchspersonen erklärt, dass Pausen zwischen den Testblöcken vorgesehen seien, die die Versuchsleitung durch Handzeichen anzeigen würde.

Tonaudiometrie zur Bestimmung der Hörschwelle

Die Tonaudiometrie erfolgte wie bereits im Experiment 1 beschrieben (vgl. Kapitel 6.2.4).

Sprachaudiometrie

Die Erhebung der SRTs erfolgte wie im Experiment 2 (vgl. Kapitel 7.2.4).

In den Bewertungsbedingungen wurde die Sprachverständlichkeit pro SNR erhoben. Dazu wurde den Versuchspersonen bei jedem SNR zwei Sätze dargeboten und die nachgesprochenen Worte in die Oldenburger Messapplikationen eingegeben. Da jeder SNR innerhalb einer Bedingung wiederholt wurde, basiert die angegebene Sprachverständlichkeit auf dem Prozentsatz der verstandenen Worte von vier dargebotenen Sätzen.

8.2.5 Modellierung der Sprachverständlichkeit

Die Sprachverständlichkeit wurde, wie bereits im Experiment 2, mit dem $BSIM_T$ berechnet (siehe Kapitel 6.4). Der STI wurde, wie unter 6.2 beschrieben, bestimmt.

8.2.6 Bestimmung der Messpunkte für die Kommunikationsqualität

Es hatte sich in den Experimenten 1 und 2 gezeigt, dass sich die empirischen SRTs in den verschiedenen Hörsituationen teilweise eklatant unterscheiden. Deshalb wurde eine SRT-bezogenen Messung für die Erhebung der Kommunikationsqualität gewählt. Damit sollte eine bessere Vergleichbarkeit der Bewertungen erzielt werden.

Die Messpunkte stellen einen Kompromiss aus Dauer der Messung, Breite der Hörfläche und Auflösungsschärfe dar. Die Bewertung der Kommunikationsqualität sollte im Bereich sehr guter Sprachverständlichkeit erfolgen. Da der Anstieg der psychometrischen Funktion im Fahrzeug etwas flacher ist als im Originalmaterial des OLSA und die empirischen SRTs bei den Normalhörenden Standardabweichungen zwischen ca. 0,5 - 1,5dB aufwiesen, wurde ausgehend vom SRT der erste Messpunkt in einem Abstand von 4dB festgelegt. Damit sollte bereits die erste Messung in einem Bereich sehr guter Sprachverständlichkeit, d.h. bei mindestens 80%, erfolgen. Die konkrete Umsetzung der Messabfolgen wird im Folgenden beschrieben.

Tabelle 8.2: Sprach- und Störgeräuschpegel für die Untersuchung der Normalhörenden im Experiment 3.

Bedingung	Kurzname	Störgeräusch- Pegel in dB(A)	Sprachpegel in dB(A)					
			+4dB	+8dB	+12dB	+16dB	+20dB	+24dB
SNR _{SRT}								
Bewertung I	SUV Fahrer HR	70	76	80	84	88	92	96
Bewertung II	Kombi CD VR	73	65	69	73	77	81	85
Bewertung III	Kombi Nav VR	73	59	63	67	71	75	79
Bewertung IV	Kombi Tel VR	73	71	75	79	83	87	91
Bewertung V	Kombi Fahrer HR	74	76	80	84	88	92	96
Bewertung VI	Kombi 150 km/h	73	64	68	72	76	80	84
Bewertung VII	Cabrio	84	67	71	75	79	83	87
Bewertung VIII	Kombi 180 km/h	76	67	71	75	79	83	87

8.2.6.1 Normalhörende

Ausgehend von den mittleren empirischen SRTs der Experimente 1 und 2, wurden sechs Messpunkte in einem Abstand von 4dB gewählt, um die Hörfläche bis kurz vor die Unbehaglichkeitsschwelle (UCL) auszufüllen. Als Maximalpegel für die Hörgesunden wurde ein Pegel von 95 dB(A) angenommen. Die resultierenden Sprachpegel sind Tabelle 8.2 zu entnehmen.

8.2.6.2 Hörgeschädigte

Anhand des mittleren Audiogramms von Männern und Frauen einer ungescreenten Population (ISO, 1990, Tabelle B.1, Altersgruppe 60, 50. Perzentil) wurde eine Auswahl möglicher Versuchspersonen aus dem Datenpool des Hörzentrum Oldenburgs getroffen. Die 45 so ausgewählten Audiogramme wurden gemittelt (siehe Abbildung 8.4) und als Eingang in das $BSIM_T$ genutzt. Zu den modellierten SRTs der verschiedenen Bedingungen wurde ein durchschnittlicher Korrekturfaktor aus dem in Experiment 1 und 2 generierten Wissen über die Modellgüte hinzugerechnet und diese geschätzten Werte als Bezugs-SRT genutzt. Anschließend wurden analog zu den Normalhörenden die Messpunkte festgelegt. Dabei wurde berücksichtigt, dass bei Hörgeschädigten aufgrund des auftretenden Recruitments die UCL bei einem geringeren Pegel liegt. Somit wurde als Maximalpegel 90 dB(A) festgesetzt. Durch die schmalere Hörfläche ergeben sich in einigen Situationen weniger Messpunkte. Die resultierenden Sprachpegel sind der Tabelle 8.3 zu entnehmen.

8.2.7 Datenauswertung und Statistik

Die Bewertungen zur Kommunikationsqualität wurden mit Hilfe eines Programms in MathWorks MATLAB in eine Excel-Tabelle exportiert und nach Versuchsperson, Bedingung und SNR sortiert abgespeichert. Die Datenauswertung und Statistik erfolgte analog zu den Experimenten 1 und 2 (vgl. Kapitel 6.2).

Tabelle 8.3: Die Sprach- und Störgeräuschpegel für die Untersuchung der Hörgeschädigten im Experiment 3.

Bedingung	Kurzname	Störgeräusch- Pegel in dB(A)	Sprachpegel in dB(A)					
			+4dB	+8dB	+12dB	+16dB	+20dB	+24dB
SNR_{SRT}								
Bewertung I	SUV Fahrer HR	70		75	79	83	87	91
Bewertung II	Kombi CD VR	73	65	69	73	77	81	85
Bewertung III	Kombi Nav VR	73	59	63	67	71	75	79
Bewertung IV	Kombi Tel VR	73	71	75	79	83	87	
Bewertung V	Kombi Fahrer HR	74	78	82	86	90		
Bewertung VI	Kombi 150 km/h	73	68	72	76	80	84	
Bewertung VII	Cabrio	84	68	72	76	80	84	88
Bewertung VIII	Kombi 180 km/h	76	71	75	79	83	87	

Zur Spezifizierung von Mittelwertsunterschieden innerhalb der im Experiment 3 durchgeführten Univariaten Varianzanalysen wurden wiederholte Kontraste berechnet.

8.3 Ergebnisse

8.3.1 Tonaudiometrie

In der Gruppe der Normalhörenden überstieg die Hörschwelle bei keiner Frequenz 20dB(HL). Das mittlere Audiogramm der Hörgeschädigten ist in der Abbildung 8.4 dargestellt. Im Vergleich dazu ist das Audiogramm abgebildet, welches die Basis für die Kalkulation der verwendeten Sprachpegel war (HTL BSIM).

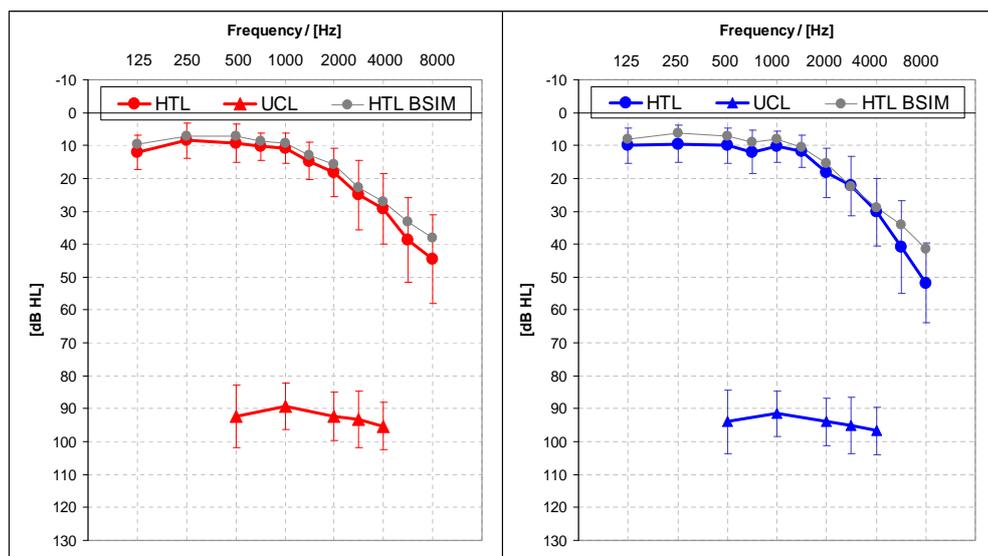


Abbildung 8.4: Mittleres Audiogramm (HTL) und Unbehaglichkeitsschwelle (UCL) der hörgeschädigten Versuchspersonen und das Basis-Audiogramm für die SRT-Kalkulation (HTL BSIM). Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung gemittelt über die Versuchspersonen dar. Die roten Markierungen stehen für das rechte Ohr, blaue Markierungen für das linke Ohr.

8.3.2 Methodische Betrachtungen

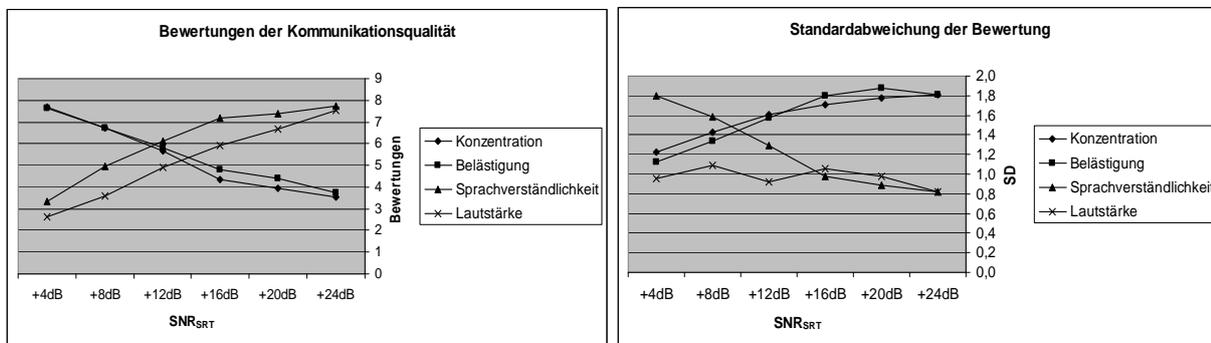
8.3.2.1 Mittelwerte der Items in Abhängigkeit des SNR

8.3.2.1.1 Normalhörende

In der Abbildung 8.5a sind die über alle Fahrzeugbedingungen gemittelten Bewertungen der *Konzentration*, *Belästigung*, *Lautstärke der Sätze* und der *subjektiven Sprachverständlichkeit* in Abhängigkeit des SRT-bezogenen SNR (SNR_{SRT}) dargestellt.

Die *Belästigung* und *Konzentration* nehmen mit zunehmendem SNR ab, während die *Lautstärke der Sätze* und die *subjektive Sprachverständlichkeit* zunehmen. Die Mittelwerte der Bewertungen reichen in etwa von 2,5 bis 8. Die Veränderung zwischen den SNRs beträgt für die Bewertung der Lautstärke in etwa 1 Einheit. Für die anderen Skalen beträgt die Veränderung bis +16dB ebenfalls in etwa 1 Einheit, danach verringert sie sich auf ca. 0,5. *Belästigung* und *Konzentration* verlaufen nahezu parallel, wobei die *Belästigung* in den letzten drei Kategorien höher eingeschätzt wird als die *Konzentration*.

Die Standardabweichungen der Bewertungen sind in der Abbildung 8.5b zu sehen. Es ist zu erkennen, dass bei den Skalen *Belästigung* und *Konzentration* die Streuung mit zunehmendem SNR ebenfalls zunimmt. Die Standardabweichung der Bewertung der *Lautstärke der Sätze* ist gleichbleibend, dagegen nimmt diese bei der Bewertung der Sprachverständlichkeit ab.



(a) Mittelwert

(b) Standardabweichung

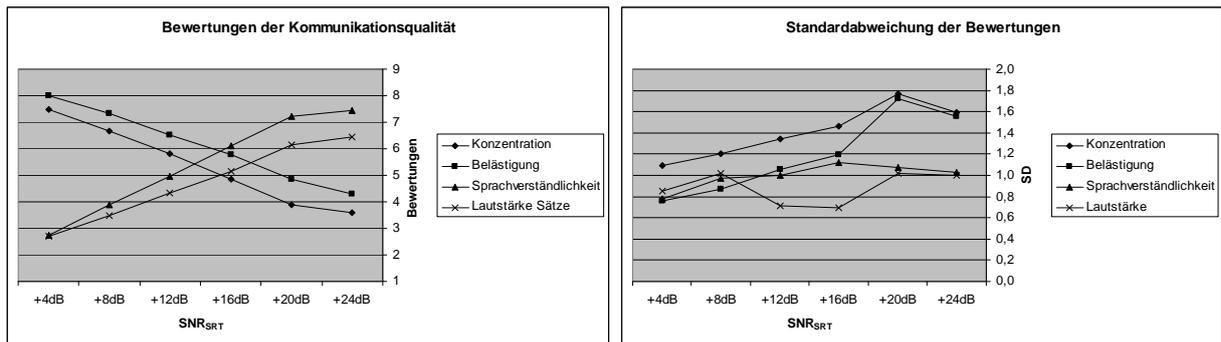
Abbildung 8.5: Die Bewertungen der Items (a) und die Standardabweichungen (b) der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR_{SRT} für die normalhörenden Versuchspersonen. Die Werte sind über alle Fahrzeugbedingungen und Versuchspersonen gemittelt.

8.3.2.1.2 Hörgeschädigte

In der Abbildung 8.6a sind die über die Fahrzeugbedingungen gemittelten Bewertungen der *Konzentration*, *Belästigung*, *Lautstärke der Sätze* und der *subjektiven Sprachverständlichkeit* in Abhängigkeit des SNR_{SRT} dargestellt. Die Verläufe der Skalen entsprechen denen der Normalhörenden. Die Mittelwerte der Bewertungen reichen in etwa von 3 bis 8 und

die Veränderung zwischen den SNRs beträgt bis +20dB in etwa 1 Einheit. Im Vergleich zu den Normalhörenden liegen die Bewertungen für die *Belästigung* höher.

Die Standardabweichungen der Bewertungen sind in der Abbildung 8.6b zu sehen. Sie entwickeln sich über die SNRs wie die der Normalhörenden mit dem Unterschied, dass sich die Standardabweichung der *Sprachverständlichkeit* kaum verändert. Insgesamt sind die Standardabweichungen der Hörgeschädigten kleiner als die der Normalhörenden.



(a) Mittelwert

(b) Standardabweichung

Abbildung 8.6: ie Bewertungen der Items (a) und die Standardabweichung (b) der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR_{SRT} für die hörgeschädigten Versuchspersonen. Die Werte sind über alle Fahrzeugbedingungen und Versuchspersonen gemittelt.

8.3.2.2 Beiträge der Items zur Kommunikationsqualität

Für diese Auswertungen werden die Ergebnisse als Prozentsatz nicht-negativer Bewertungen (Positivbewertungen) dargestellt.

Die Positivbewertungen wurden anhand folgender Kriterien bestimmt: Die Items *Belästigung* und *Lautstärke der Sätze* sollten die Begrenzungen für die maximal erreichbare Kommunikationsqualität abbilden. Die Grenzen wurden an den äußeren Quartilen gesetzt. Es wurden für die Skala *Belästigung* alle Wertungen der ersten drei Quartile bis einschließlich 7 als nicht-negativ deklariert. Da die Bewertung der Satzlautstärke bezüglich mangelnder Kommunikationsqualität zwei Pole besaß (zu leise, zu laut) wurden die mittleren beiden Quartile (Wertungen 3-7) in oben beschriebener Form in der Auswertung berücksichtigt.

Für die beiden sukzessiven Qualitätsskalen *subjektive Sprachverständlichkeit* und *Konzentration* wurden höhere Maßstäbe angelegt. Für die *subjektive Sprachverständlichkeit* wurden alle Bewertungen ab dem Mittelpunkt der Skala, also einschließlich 5, als nicht-negativ eingestuft. Dasselbe galt für die *Konzentration*, wo allerdings wegen der entgegengesetzten Polung, die Quartile 1 und 2 (bis einschließlich 5) der positiven Bewertung entsprechen.

Dies sollte die Betrachtung der Beiträge der einzelnen Items zur Kommunikationsqualität und die Bestimmung von Qualitätsniveaus gegenüber einer reinen Mittelwertsbetrachtung verbessern.

Die Darstellungen zur Kommunikationsqualität beziehen sich auf die mittleren positiven Bewertungen gemittelt über die vier genannten Items.

8.3.2.2.1 Normalhörende

Die Bewertungen der Items der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR_{SRT} sind in Abbildung 8.7 dargestellt.

Die Bewertung der *Lautstärke der Sätze* einen deutlich U-förmigen Verlauf. Die maximale Anzahl an Positivbewertungen trat augenscheinlich bei einem SNR von +12dB auf (siehe Abbildung 8.7a).

Der Anteil der positiven Bewertungen bezüglich der *Belästigung* nimmt mit dem SNR zu. Bei +16dB lagen die positiven Bewertungen bei 75%. Auf diesem Niveau verblieb sie weitestgehend (siehe Abbildung 8.7b).

Der Anteil positiver Bewertungen der *Konzentration* stieg bis zu dem SNR von +24dB im Allgemeinen an. Der Anstieg ist offensichtlich flacher als bei den anderen Skalen. Bei maximalem Pegel erreichte die *Konzentration* mindestens 70%, nur die Bedingung *Kombi Fahrer HR* wurde durchgehend schlechter bewertet und erreichte maximal 50% positive Bewertungen (siehe Abbildung 8.7c).

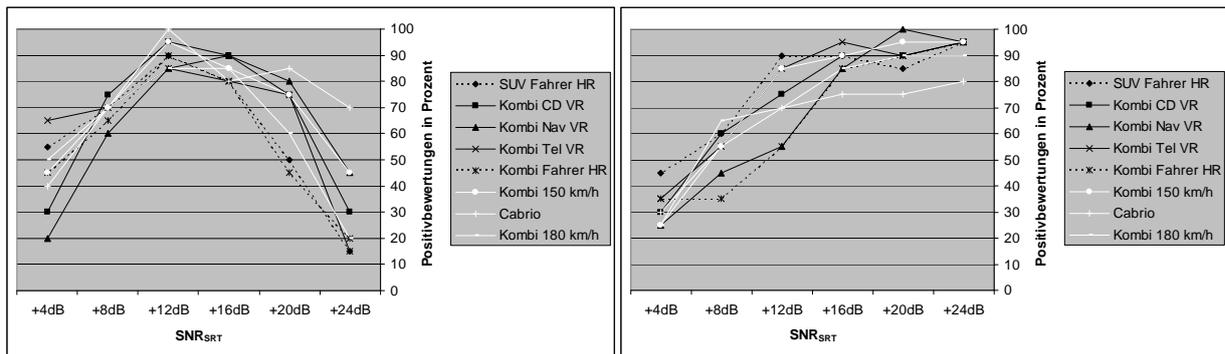
Die *subjektive Verständlichkeit* ähnelt im Verlauf der *Belästigung*. Sie stieg augenscheinlich bis +16dB für alle Bedingungen an und erreichte mindestens 90%. Danach gehen die Bedingungen im Allgemeinen in die Sättigung. Die Bewertung in der Bedingung *Kombi Fahrer HR* war schlechter als in den anderen Bedingungen (siehe Abbildung 8.7d).

8.3.2.2.2 Hörgeschädigte

Die Bewertungen der Items der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR für die Hörgeschädigten sind in der Abbildung 8.8 dargestellt. Augenscheinlich streuen die Bewertungen über die akustischen Bedingungen stärker als bei den Normalhörenden.

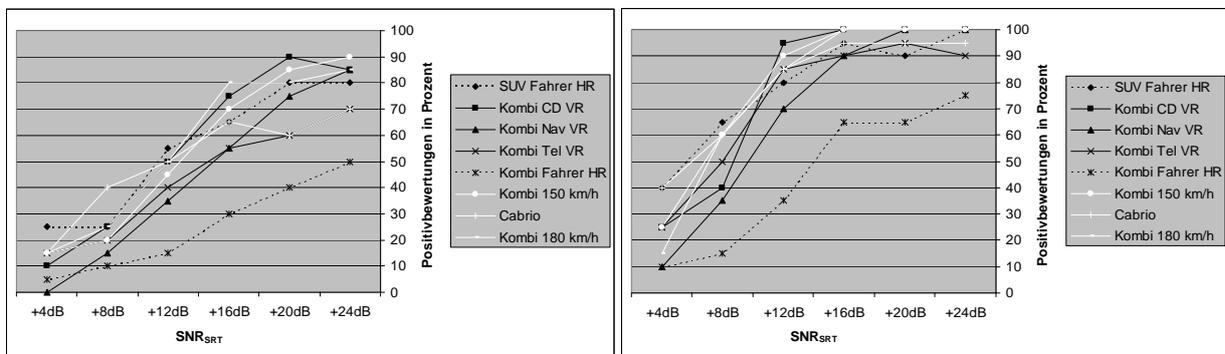
Auch hier zeigte sich wiederum der typische U-förmige Verlauf der Bewertung der Satzlautstärke. Die maximale Anzahl an Positivbewertungen trat augenscheinlich bei einem SNR von +16dB auf. Dort nahmen mindestens 80% der Versuchspersonen eine positive Bewertung vor (siehe Abbildung 8.8a).

Der Anteil der positiven Bewertungen bezüglich der *Belästigung* nahm mit zunehmendem SNR zu. Bei +16dB lag die Bewertung der *Belästigung* bei 80%. Auf diesem Niveau verblieb sie bis zu einem SNR von +24dB. Lediglich in den Bedingungen *Kombi Fahrer HR* und *SUV Fahrer HR* lag der Anteil der positiven Bewertungen bei den gemessenen SNRs deutlich darunter (siehe Abbildung 8.8b).



(a) Lautstärke der Sätze

(b) Belästigung



(c) Konzentration

(d) Verständlichkeit

Abbildung 8.7: Prozentsatz nicht-negativer Bewertungen der Items der Kommunikationsqualität der Normalhörenden für die untersuchten Fahrzeugbedingungen in Abhängigkeit des SNR_{SRT} .

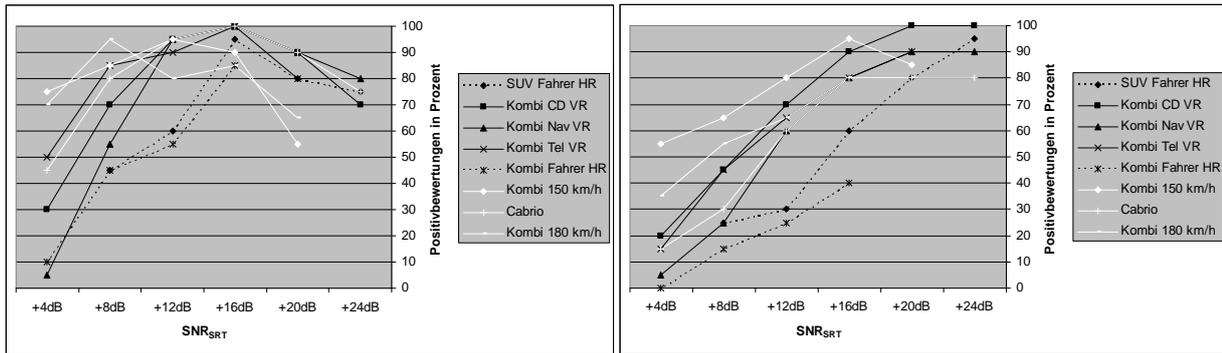
Die positiven Bewertungen der Konzentration nahmen offensichtlich im Verhältnis zu den anderen Items weniger stark zu und streuten über die Bedingungen auch am meisten. Der Anteil positiver Bewertungen der Konzentration stieg bis zu dem SNR von +24dB im Allgemeinen an. Bei +24dB erreichten alle gemessenen Bedingungen mindestens 65%, wobei die Bedingungen *Kombi Fahrer HR* und *SUV Fahrer HR* auffällig schlecht bewertet wurden (siehe Abbildung 8.8c).

Die Verständlichkeit stieg bis +12dB für alle Bedingungen an, danach gehen die Bedingungen nacheinander in die Sättigung. Wiederum lagen die Bewertungen in den Bedingungen *SUV Fahrer HR* und *Kombi Fahrer HR* schlechter als in den restlichen (siehe Abbildung 8.8d).

8.3.2.3 Qualitativer Vergleich der SNR- und SRT-basierten Kommunikationsqualität im Kfz

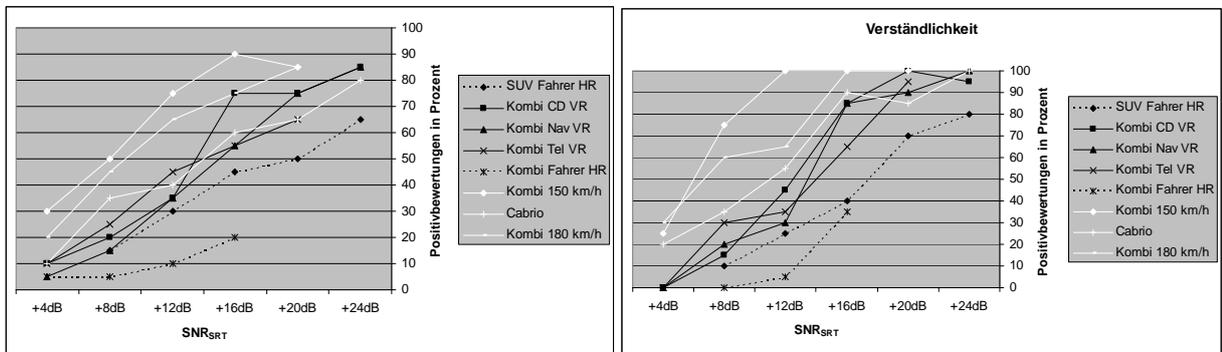
8.3.2.3.1 Normalhörende

Die Ergebnisse der Positivbewertungen der Kommunikationsqualität anhand der real dargebotenen SNRs, also ohne SRT-Bereinigung, sind in der Abbildung 8.9a dargestellt.



(a) Lautstärke der Sätze

(b) Belästigung



(c) Konzentration

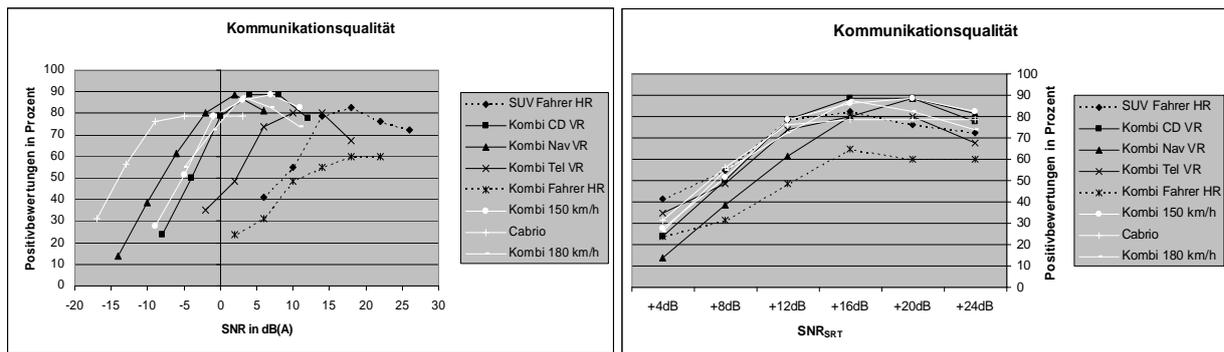
(d) Verständlichkeit

Abbildung 8.8: Prozentsatz nicht-negativer Bewertungen der Items der Kommunikationsqualität der Hörgeschädigten für die untersuchten Fahrzeugbedingungen in Abhängigkeit des SNR_{SRT} .

Es ist zu erkennen, dass das Erreichen einer bestimmten Kommunikationsqualität in den untersuchten Bedingungen deutlich unterschiedlicher SNRs bedarf. Die Abbildung 8.9b zeigt die Bewertungen in Abhängigkeit der SNR-Kategorien basierend auf den SRTs. Bereinigt man die Daten also anhand des zugrunde liegenden SRT, wird augenscheinlich, dass sich ein Maximum an Kommunikationsqualität bei +16dB ergibt. Für das Erreichen der selben KQ ohne SRT-Bereinigung bedarf es eines SNR zwischen -5dB(A) (*Cabrio*) und ca. 17dB(A) (*Kombi Fahrer HR*).

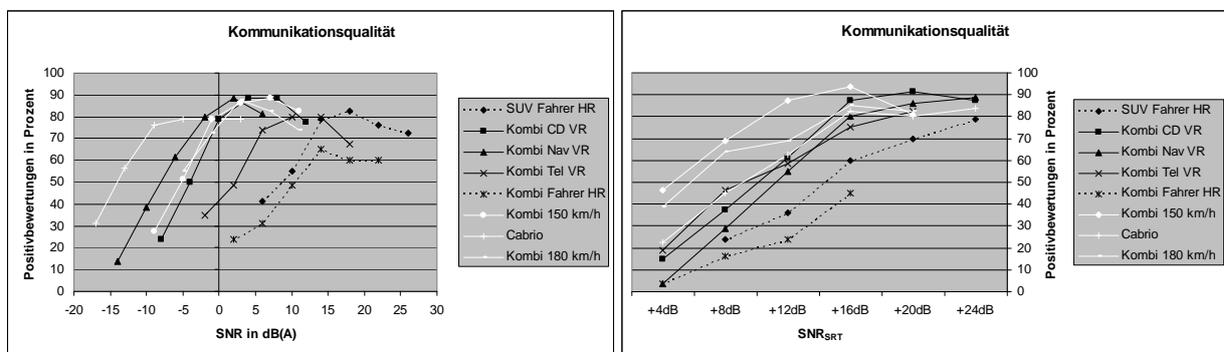
8.3.2.3.2 Hörgeschädigte

Wie bereits bei den Normalhörenden, zeigte sich auch hier eine offensichtlich homogenere Bewertung, wenn diese SRT-basiert erfolgte (siehe Abbildung 8.9d) als bei der SNR bezogenen (c). Dabei war aber kein deutliches Maximum der Kommunikationsqualität erkennbar. Außerdem streute die Bewertung der Kommunikationsqualität über die akustischen Bedingungen augenscheinlich mehr als bei den Normalhörenden. Trotzdem ist



(a) SNR-bezogene KQ Normalhörende

(b) SRT-bezogene KQ Normalhörende



(c) SNR-bezogene KQ Hörgeschädigte

(d) SRT-bezogene KQ Hörgeschädigte

Abbildung 8.9: Prozentsatz nicht-negativer Bewertungen der Kommunikationsqualität (KQ) in den untersuchten Fahrzeugbedingungen.

wiederum ein SRT-Vorteil von ca. 20dB gegenüber dem SNR zu beobachten (Cabrio, -5dB(A); Kombi Fahrer HR, 17dB(A)).

8.3.3 Zusammenhänge der Items der Kommunikationsqualität

Für die Untersuchung der internen Konsistenz der vier Items, wurden die *Konzentration* und die *Belästigung* umkodiert. D.h. die Bewertung wurde ausgehend vom positiven Pol (überhaupt nicht konzentrieren bzw. belästigt) umgekehrt. So erhielt dieser anstelle der kleinsten Bewertung (1) die höchste Bewertung (9). Die restlichen Stufen wurden entsprechend umkodiert. Damit nahm für alle Items die positive Bewertung mit der Größe der Zahl zu.

8.3.3.1 Normalhörende

Die anschließende Reliabilitätsanalyse der Items für die Normalhörenden ergab $\alpha=.93$. Betrachtet man die Korrelationen in Abhängigkeit des SNR (siehe Tabelle 8.4), ist zu erkennen, dass alle Korrelationen mit zunehmendem SNR abnehmen.

Tabelle 8.4: Die Korrelationen zwischen Belästigung (Bel), Konzentration (Konz), Lautstärke der Sätze (LS) und Sprachverständlichkeit (sSV) für die Normalhörenden gemittelt über die untersuchten Bedingungen. Mit * gekennzeichnete Korrelationen sind auf $p \leq .05$, mit ** auf $p \leq .01$ signifikant.

SNR _{SRT}	Korrelationen					
	LS x sSV	LS x Konz	LS x Bel	sSV x Konz	sSV x Bel	Konz x Bel
+4dB	,70**	-,58**	-,58**	-,75**	-,81**	,89**
+8dB	,54*	-,54*	-,60**	-,74**	-,72**	,78**
+12dB	,51*	-,50*	-,50*	-,79**	-,61**	,61*
+16dB	,41	-,47*	-,48*	-,77**	-,56*	,53*
+20dB	,11	-,33	-,30	-,67**	-,34	,54*
+24dB	,17	-,24	-,15	-,61**	-,21	,50*

Tabelle 8.5: Die Korrelationen zwischen Belästigung (Bel), Konzentration (Konz), Lautstärke der Sätze (LS) und Sprachverständlichkeit (sSV) für die Hörgeschädigten gemittelt über die untersuchten Bedingungen. Mit * gekennzeichnete Korrelationen sind auf $p \leq .05$, mit ** auf $p \leq .01$ signifikant.

SNR _{SRT}	Korrelationen					
	LS x sSV	LS x Konz	LS x Bel	sSV x Konz	sSV x Bel	Konz x Bel
+4dB	,65**	-,57**	-,58**	-,37	-,56*	,64**
+8dB	,56**	-,32	-,61**	-,43	-,54*	,57**
+12dB	,52*	-,25	-,30	-,62**	-,52*	,53*
+16dB	,43	-,18	,00	-,73**	-,33	,46*
+20dB	,51*	-,17	,07	,70**	-,43	,59**
+24dB	,36	,04	,13	-,74**	-,49*	,71**

8.3.3.2 Hörgeschädigte

Die Reliabilitätsanalyse zur Untersuchung der internen Konsistenz der vier Items für die Hörgeschädigten ergab $\alpha = .93$. Betrachtet man die Korrelationen in Abhängigkeit des SNR (siehe Tabelle 8.5), ist zu erkennen, dass die Korrelationen mit dem Item *Lautstärke der Sätze* mit zunehmendem SNR abnehmen. Die Korrelationen zwischen *Konzentration* und *Belästigung* bzw. *subjektive Sprachverständlichkeit* und *Belästigung* sind bei einem SNR von +16dB am geringsten. Die Korrelation zwischen *subjektiver Sprachverständlichkeit* und *Konzentration* nimmt mit steigendem SNR ab.

8.3.4 Veränderung der Kommunikationsqualität, der Sprachverständlichkeit und des $BSIM_T$ in Abhängigkeit des SNR

Die vier Bewertungsskalen wurden für die Untersuchung der Kommunikationsqualität zusammengefasst. Dazu wurden die umkodierten Items der *Konzentration* und der *Belästigung* (siehe Kapitel 8.3.3) genutzt und anschließend der Mittelwert aller vier Items

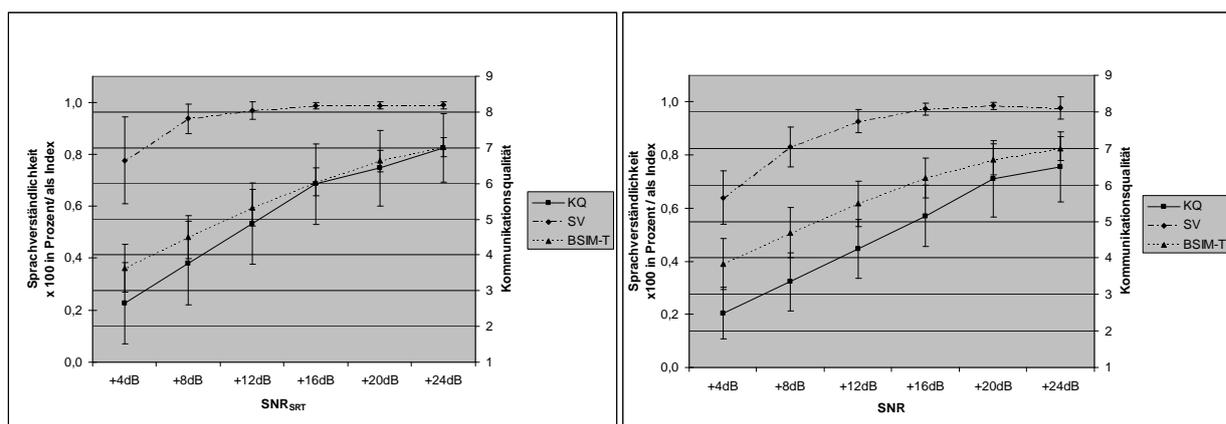
gebildet. Der Vergleich der Messgenauigkeit der objektiven Sprachverständlichkeit (SV) und der Kommunikationsqualität (KQ) sollte über alle Fahrzeugbedingungen getroffen werden und wurden deshalb darüber gemittelt. Danach wurden die neuen Variablen getrennt einer univariaten Varianzanalyse mit SNR als festem Faktor unterzogen. Es wurden wiederholte Kontraste geplant, um die Differenzen im Sinne der Zunahme der abhängigen Variablen zwischen den SNR s auf Signifikanz zu untersuchen.

Die selben Auswertungen wurden für den Sprachindex $BSIM_T$ durchgeführt und die Ergebnisse zum Vergleich dargestellt.

8.3.4.1 Normalhörende

Wie in der Abbildung 8.10a zu erkennen ist, stieg die Sprachverständlichkeit der Normalhörenden von 78 auf 99% und ging ab +12dB augenscheinlich in die Sättigung. Die Bewertung der KQ stieg von 2,7 auf 7,0 wobei der Zuwachs pro SNR bis zum SRT +16dB bei ca. 1 Einheit lag und danach auf 0,5 Einheiten zurückging. Die Standardabweichung der SV nahm über den SNR ab, für die KQ blieb sie weitestgehend konstant. Die Werte des $BSIM_T$ stiegen von 0,36 auf 0,83 und die Standardabweichung nahm von 0,09 auf 0,04 ab.

Die Daten waren normalverteilt (siehe Anhang A3.1). Der Levene-Test zeigte, dass die Varianzhomogenität für die KQ und das $BSIM_T$ gegeben war (siehe Anhang A3.3). Das Signifikanzniveau der statistischen Auswertungen der SV wurde wegen der Verletzung der Varianzhomogenität (siehe Anhang A3.3) auf $\alpha = .01$ angepasst (Zöfel, 2003).



(a) Normalhörende

(b) Hörgeschädigte

Abbildung 8.10: Mittelwerte der Sprachverständlichkeit (SV) und der Kommunikationsqualität (KQ) bei den dargebotenen SNR_{SRT} . Die rechte y-Achse steht für die Kommunikationsqualität von 1 (überhaupt keine) bis 9 (sehr gute), die linke y-Achse steht für die Sprachverständlichkeit in Prozent bzw. als Index ($BSIM_T$). Die Fehlerbalken stellen die gemittelte Standardabweichung dar. Die Werte sind über die Versuchspersonen und Bedingungen gemittelt.

Tabelle 8.6: Wiederholte Kontraste für die Veränderung der Sprachverständlichkeit (SV), die Kommunikationsqualität (KQ) und das $BSIM_T$ mit zunehmendem SNR_{SRT} für die Normalhörenden und die Hörgeschädigten.

SNR _{SRT}	wiederholte Kontraste zwischen den SNR _{SRTs}											
	Normalhörende						Hörgeschädigte					
	SV		KQ		BSIM _T		SV		KQ		BSIM _T	
MW	Sig.	MW	Sig.	MW	Sig.	MW	Sig.	MW	Sig.	MW	Sig.	
+4dB	0,77		2,7		0,36		0,64		2,5		0,38	
+8dB	0,94	p≤.001	3,8	p≤.01	0,48	p≤.001	0,83	p≤.001	3,3	p≤.01	0,51	p≤.01
+12dB	0,97	p=n.s.	4,9	p≤.01	0,59	p≤.01	0,93	p≤.001	4,2	p≤.001	0,62	p≤.01
+16dB	0,99	p=n.s.	6,0	p≤.01	0,69	p≤.01	0,97	p≤.05	5,2	p≤.001	0,71	p≤.05
+20dB	0,99	p=n.s.	6,4	p=n.s.	0,77	p≤.05	0,99	p=n.s.	6,2	p≤.001	0,78	p=n.s.
+24dB	0,99	p=n.s.	7,0	p=n.s.	0,82	p=n.s.	0,98	p=n.s.	6,5	p=n.s.	0,82	p=n.s.

Die varianzanalytische Auswertung ergab einen signifikanten Haupteffekt SNR sowohl für SV ($F_{[1,5]} = 25,383; p \leq .001$) als auch KQ ($F_{[1,5]} = 45,975; p \leq .001$) und das $BSIM_T$ ($F_{[1,5]} = 57,671; p \leq .001$). Bei der Auswertung der Kontraste zeigte sich, dass die Sprachverständlichkeit nur von +4dB auf +8dB signifikant zunahm. Die Kommunikationsqualität stieg signifikant bis zum SNR +16dB, der weitere Anstieg war nicht mehr signifikant. Die Werte des $BSIM_T$ stiegen signifikant bis +20dB (siehe Tabelle 8.6).

8.3.4.2 Hörgeschädigte

Wie in Abbildung 8.10b zu erkennen ist, stieg die Sprachverständlichkeit von 64 auf 98% und ging oberhalb von +12dB in die Sättigung. Die Bewertung der KQ stieg von 2,5 auf 7,7, wobei der Zuwachs pro SNR bis auf die letzte Kategorie (+24dB) relativ konstant war. Die Standardabweichung der SV nahm mit zunehmendem SNR von 0,10 auf 0,02 ab, während diese bei der KQ von 0,7 auf 1,1 zunahm. Die Werte des $BSIM_T$ stiegen von 0,39 auf 0,83. Die Standardabweichung verringerte sich von 0,1 auf 0,05.

Die Daten waren bis auf die SV bei SNR +24dB normalverteilt (siehe Anhang A3.2). Der Levene-Test zeigte, dass die Varianzhomogenität zwar für die KQ und das $BSIM_T$ gegeben war, allerdings waren die Fehlervarianzen der SV nicht homogen (siehe Anhang A3.4). Um das angestrebte faktische Signifikanzniveau von $\alpha = .05$ zu erreichen, wurde für die Untersuchung der SV $\alpha = .01$ zugrunde gelegt (Zöfel, 2003). Die varianzanalytische Auswertung ergab einen signifikanten Haupteffekt SNR sowohl für SV ($F_{[1,5]} = 109,775; p \leq .001$) als auch KQ ($F_{[1,5]} = 66,480; p \leq .001$) und $BSIM_T$ ($F_{[1,5]} = 37,057; p \leq .001$). Bei der Auswertung der Kontraste zeigte sich, dass sowohl die Sprachverständlichkeit als auch das $BSIM_T$ bis +16dB signifikant zunahmen, danach waren die Unterschiede zwischen den SNRs nicht mehr signifikant. Die Kommunikationsqualität stieg signifikant bis zum SNR +20dB. Der Anstieg an KQ bei +24dB war nicht signifikant (siehe Tabelle 8.6).

8.3.4.3 Korrelationen zwischen Sprachverständlichkeit bzw. Kommunikationsqualität und den Sprachindizes

Für die Normalhörenden ergab sich zwischen der Kommunikationsqualität und den Werten des $BSIM_T$ eine Korrelation von $r=.94$ ($p \leq .001$), mit dem SII_T von $r=.93$ ($p \leq .001$) und dem STI in Höhe von $r=.86$ ($p \leq .001$). Die zugehörigen Streudiagramme sind in der Abbildung 8.11a dargestellt.

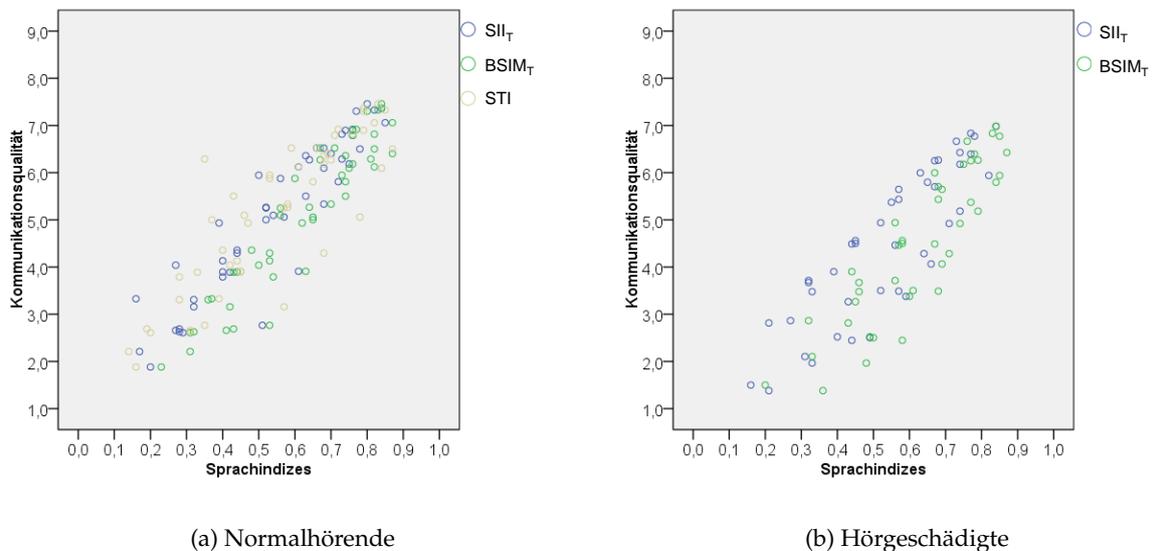


Abbildung 8.11: Korrelationen zwischen der Kommunikationsqualität und den Sprachindizes für die normalhörenden und die hörgeschädigten Versuchspersonen.

Die Korrelation zwischen der Sprachverständlichkeit und $BSIM_T$ lag bei $r=.71$ ($p \leq .001$), mit dem SII_T bei $r=.69$ ($p \leq .001$) und mit dem STI bei $r=.68$ ($p \leq .001$).

In der Abbildung 8.11b sind die Streudiagramme für die Korrelationen zwischen den Sprachindizes und der Kommunikationsqualität für die hörgeschädigten Versuchspersonen dargestellt. Es ergab sich zwischen der Kommunikationsqualität und den Werten des $BSIM_T$ eine Korrelation von $r=.88$ ($p \leq .001$) und mit dem SII_T in Höhe von $r=.87$. Da der hier verwendete STI keine Korrekturen für Hörverluste vorsieht, werden diese Werte nicht dargestellt. Die Korrelation zwischen Sprachverständlichkeit und $BSIM_T$ lag bei $r=.68$ ($p \leq .001$), die mit dem SII_T bei $r=.63$ ($p \leq .001$).

8.3.5 SRT-basierte Qualitätsniveaus für Kommunikation im Kfz

Für die Formulierung der Qualitätsniveaus wurde ebenfalls auf die, im Kapitel 8.3.2.2 beschriebenen Positivbewertungen zurückgegriffen. Diese spiegeln zum einen den Anteil der Personen wider, die die Situation als positiv bewerten und zum anderen ist hierin auch im Unterschied zu einer Mittelwertsbetrachtung ein Rückgang der Kommunikationsqualität zu erkennen.

Die Beschreibung der Qualitätsniveaus erfolgt in Anlehnung an die bereits existierenden Verständlichkeitsqualifikationen des STI (vgl. Tabelle 3.1). Dazu wurde die Skala der Positivbewertungen in fünf äquidistante Bereiche zu je 20% aufgeteilt und den Qualitätsniveaus zugeordnet

Es werden die Ergebnisse zu allen untersuchten Bedingungen zuerst bildlich dargestellt. Für die Beschreibung der Qualitätsniveaus wurden sowohl die Positivbewertungen der Kommunikationsqualität als auch die Werte der Sprachindizes über alle untersuchten Bedingungen gemittelt und tabellarisch zusammengefasst, um eine generelle Anwendung im Kfz zu ermöglichen.

8.3.5.1 Normalhörende

In den Abbildungen 8.12a bis 8.12c ist die Kommunikationsqualität der untersuchten Bedingungen in Abhängigkeit der Werte der Sprachindizes dargestellt. Es ist zu erkennen, dass trotz der SRT-Anpassung gleiche Indexwerte in den untersuchten Bedingungen unterschiedlichen Bewertungen der Kommunikationsqualität entsprechen.

Die Abbildung 8.12d stellt die Bewertungen gemittelt über alle Bedingungen dar. Es ist zu erkennen, dass die beiden monauralen Sprachindizes (STI und SII_T) bei der gleichen Beurteilung der Kommunikationsqualität geringere Werte aufweisen als das $BSIM_T$. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die maximale Kommunikationsqualität, die in den untersuchten Fahrzeugbedingungen erreicht werden kann, 80% beträgt. Dies entspricht einem Wert von 0,7 (STI, SII_T) bzw. 0,8 ($BSIM_T$). Höhere Indexwerte gehen mit einer erneuten Verringerung der Kommunikationsqualität einher. Diese Werte sind in der Tabelle 8.7 zusammengefasst.

Tabelle 8.7: SRT-bezogene Qualitätsniveaus für die Kommunikation Normalhörender und Hörgeschädigter im Kfz. *) Der STI wurde für die Hörgeschädigten nicht berechnet. ^a) Zum Vergleich sind die Werte für den STI nach DIN IEC 60268-16 (2009) und für den SII nach ANSI S5.5-1997 (1997) ergänzt.

Bewertung	Positiv- bewertungen	Normalhörende		Hörgeschädigte			
		STI / SII_T	$BSIM_T$	STI* / SII_T	$BSIM_T$	STI ^a	SII ^a
schlecht	0 – 20%	< 0,25	< 0,3	< 0,3	< 0,4	< 0,3	
schwach	20 – 40%	0,25 – 0,35	0,3 – 0,45	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,3 - 0,45	<0,45
ausreichend	40 – 60%	0,35 – 0,45	0,45 – 0,55	0,4 – 0,55	0,5 – 0,65	0,45 - 0,6	
gut	60 – 80%	0,45 – 0,7	0,55 – 0,8	0,5 – 0,7	0,65 – 0,75	0,6 - 0,75	>0,75
sehr gut	80 – 100%	/	/	>0,7	>0,75	> 0,75	

8.3.5.2 Hörgeschädigte

In der Abbildung 8.13 ist die Kommunikationsqualität und die Werte der Sprachindizes der Hörgeschädigten dargestellt. Es sind deutlichere Unterschiede zwischen den Bedingungen zu erkennen als sie bei den Normalhörenden aufgetreten waren. Für die Hör-

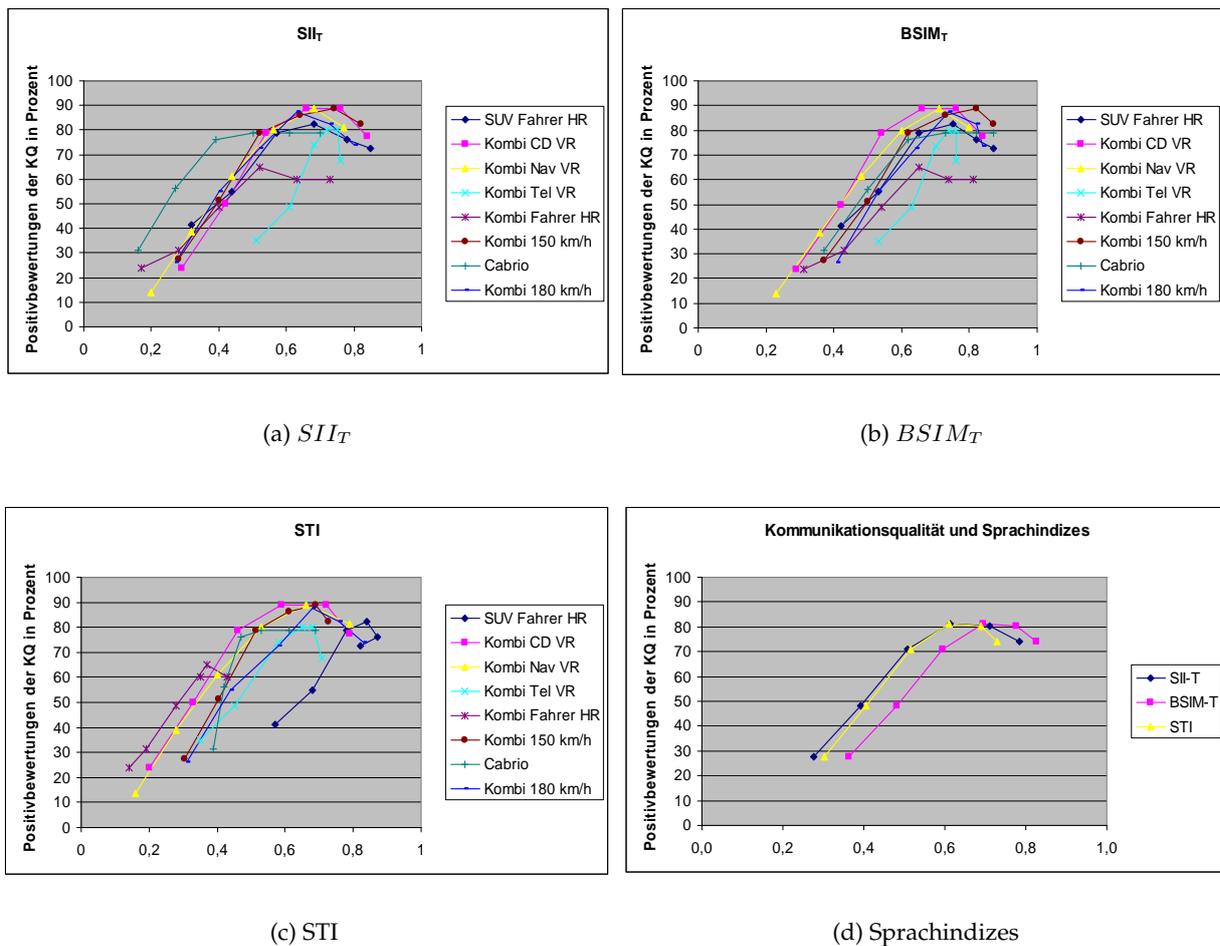
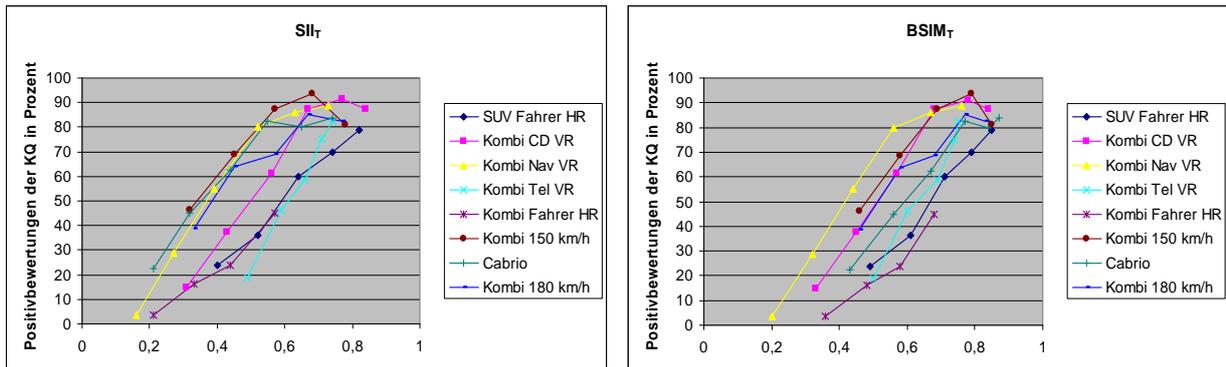
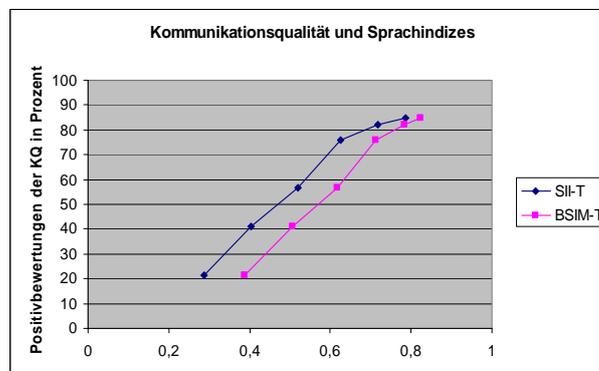


Abbildung 8.12: Zusammenhang der Kommunikationsqualität mit den Sprachindizes für die Normalhörenden in den untersuchten Bedingungen im Kfz. In Abbildung (d) sind die Mittelwerte für die Sprachindizes gemittelt über alle Bedingungen dargestellt.

geschädigten ist nur für einzelne Bedingungen mit zunehmendem Index-Wert ein Rückgang der Kommunikationsqualität zu erkennen.

Wie bereits bei den Normalhörenden wiesen die gemittelten Kurven (siehe Abbildung 8.13c) einen deutlichen Unterschied zwischen SII_T und $BSIM_T$ auf. Wiederum waren die Werte des SII_T bei gleicher Kommunikationsqualität geringer. Die maximal erreichbare Kommunikationsqualität lag bei den Hörgeschädigten bei ca. 85%. Auch hier deutet sich bereits eine Sättigung der Zunahme an Kommunikationsqualität an. Die Werte sind in der Tabelle 8.7 zusammengefasst.

Für die Hörgeschädigten konnten die Werte des STI nicht direkt berechnet werden, weil das verwendete Messinstrument keine Korrekturen anhand der Hörschwelle implementiert hatte.

(a) SII_T (b) $BSIM_T$ 

(c) Sprachindizes

Abbildung 8.13: Zusammenhang der Kommunikationsqualität mit den Sprachindizes für die Hörgeschädigten in den untersuchten Bedingungen im Kfz. In Abbildung (c) sind die Mittelwerte für die Sprachindizes gemittelt über alle Bedingungen dargestellt.

8.4 Diskussion

Im Experiment 3 sollte untersucht werden, wie die Sprachverständlichkeit bzw. die Kommunikationsqualität oberhalb des SRT mit den Werten der Sprachindizes zusammenhängen. Dazu wurden die empirisch erhobene Sprachverständlichkeit und die Bewertungen der Kommunikationsqualität mit den Indexwerten des $BSIM_T$, des SII_T und des STI verglichen.

In den Experimenten 1 und 2 hatte sich gezeigt, dass die Sprachverständlichkeit im Kfz in Abhängigkeit der untersuchten Situation und der Hörfähigkeit der Versuchspersonen stark schwankt. Um die Bewertungen der Situationen vergleichbar zu machen, musste deshalb eine Möglichkeit gefunden werden, möglichst gleichmäßige SNRs in den verschiedenen Situationen und die untersuchten Hörergruppen darzubieten. Außerdem mussten die Items für die Bewertung der Kommunikationsqualität für die Anwendung

im Kfz angepasst werden. Die wichtigsten Ergebnisse zur verwendeten Methodik werden anschließend diskutiert.

8.4.1 Methodische Betrachtungen

8.4.1.1 Mittelwerte der Items in Abhängigkeit des SNR

Das verwendete Konstrukt Kommunikationsqualität mit den vier Items *Konzentration*, *Belästigung*, *Lautstärke der Sätze* und *subjektive Verständlichkeit* hat sich aus folgenden Gründen bei der Untersuchung im Kfz bewährt: Die Items wurden von den Versuchspersonen offensichtlich richtig interpretiert, denn die Zu- bzw. Abnahme der Bewertungen in Abhängigkeit des SNR war wie inhaltlich zu erwarten und wie sie bereits von anderen Autoren gezeigt wurde (Volberg et al., 2004, 2006; Sust et al., 2007; Morimoto et al., 2004; Preminger & Van Tassel, 1995a; Sato et al., 2005, 2008).

Die Ausnutzung der Skalen war gut und ausgeprägte Boden- und Deckeneffekte waren nicht zu beobachten. Darüber hinaus ließ die Beurteilung absolute Unterschiede sowohl zwischen den untersuchten Skalen als auch den Versuchsbedingungen und Hörergruppen zu. Die zunehmenden Standardabweichungen mit steigendem SNR deuten auf hin, dass die Belästigung und die Konzentration besonders sensitiv für Wahrnehmungsunterschiede zwischen unterschiedlichen Situationen und Versuchspersonen sind. Ausführlicher wird dies im nachfolgenden Abschnitt anhand der Positivbewertungen dargestellt.

8.4.1.2 Beiträge der Items zur Kommunikationsqualität

Die unterschiedlichen Schwerpunkte der vier einzelnen Items deutete sich bereits in den Mittelwerts- und Varianzbetrachtungen an. Einen genaueren Einblick gaben die Darstellungen anhand des Anteils der positiven Bewertungen an allen Bewertungen. Die Konzentration muss als ein sehr kritisches Item für die Kommunikationsqualität gewertet werden. Die Zunahmen an positiven Bewertungen ist augenscheinlich wesentlich geringer als bei den anderen Items. Auch streuten diese Beurteilungen für die unterschiedlichen akustischen Situationen im Kfz stärker, insbesondere für die Hörgeschädigten.

Die Beurteilung der Lautstärke der Sätze zeigte dagegen ein deutliches Maximum bei SRT + 16dB. Ab hier nahm der Anteil der positiven Bewertungen der Satzlautstärke und damit die Kommunikationsqualität wieder ab. Somit ist davon auszugehen, dass mit der im Experiment 3 untersuchten reinen Pegelanhebung das Maximum an Kommunikationsqualität für die Normalhörenden bei SRT + 16dB erreicht wird. Betrachtet man dies im Zusammenhang mit der Beurteilung der Konzentration, kann man davon ausgehen, dass eine weitere Verbesserung der Kommunikationsqualität im Fahrzeug nur durch eine zusätzliche Frequenzanpassung des Signals zu erreichen ist. Denn die Verständlichkeit kann nicht nur durch Erhöhung des SNR sondern auch durch die Betonung der mittleren und hohen Frequenzen im Spektrum verbessert werden (vgl. Kapitel 2.1). Dadurch könnte das Ausmaß an benötigter Konzentration im Zuge einer besseren Verständlich-

keit verringert werden, ohne dass der Pegel des Sprachsignals deutlich erhöht werden müsste.

Auch die subjektive Verständlichkeit enthält bei gleichzeitiger Betrachtung der gemessenen Sprachverständlichkeit eine interessante Aussage. Bereits geringe Einbußen beim Verstehen (SV) führen zu einer sehr schlechten subjektiven Bewertung der Sprachverständlichkeit (sSV). Dies unterstützt die Annahme von Lazarus et al. (2007), dass die Sprachverständlichkeit das wichtigste Merkmal für Kommunikationsqualität ist.

Sust et al. (2007) untersuchten die Bewertung der Belästigung sowohl in Abhängigkeit des absoluten Pegels des Störgeräusch als auch des SNR. In den Ergebnissen wurde deutlich, dass sich beide Faktoren auf die Bewertung der Belästigung auswirkten. Die Frage zielte in der Arbeit von Sust et al. (2007) zwar ausdrücklich auf die Belästigung der Situation ab, aber die Antworten der Versuchspersonen ließen darauf schließen, dass die in Abhängigkeit des SNR variierende Sprachverständlichkeit in die Bewertung einfluss. Dieser Effekt wurde im vorliegenden Versuch durch die explizite Frage nach der Belästigung beim Sprachverstehen und die Variation der SNRs innerhalb einer Messreihe forciert und zeigte sich entsprechend deutlich. Das Ausmaß der Positivbewertungen bzgl. der Belästigung beim Sprachverstehen ist im Fahrzeug trotz der hohen Störgeräuschpegel erstaunlich hoch. Aufgrund dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass der Pegel der Innenraumgeräusche keine direkten negativen Auswirkungen auf die wahrgenommene Kommunikationsqualität hat. Erst im Zusammenspiel mit dem erforderlichen Pegel der Sprachsignale und deren negativer Bewertung müsste im Sinne der Kommunikationsqualität eine Verringerung der Innenraumgeräusche angestrebt werden.

8.4.1.3 Qualitativer Vergleich der SNR- und SRT-basierten Kommunikationsqualität im Kfz

Die Bestimmung der Messpunkte für die Normalhörenden erfolgte auf Basis der empirischen SRTs aus den Experimenten 1 und 2. Die SNRs waren offensichtlich gut gewählt, da die Bewertung der Lautstärke einen weiten Bereich der Bewertung von 1 (zu leise) bis 9 (zu laut) abdeckte. Die Sprachverständlichkeit lag beim kleinsten Sprachpegel (+4dB) mit einem Mittelwert von 78% nur knapp unter dem angestrebten Wert von 80%. Die mittlere Bewertung der Satzlautstärke bleibt auch beim höchsten Sprachpegel (SNR +24dB) deutlich unterhalb des Wertes „zu laut“ (Bewertung 9). Das heißt, der Komfortbereich der Lautheit wurde mit den dargebotenen Pegeln offensichtlich sehr selten verlassen.

Für die Hörgeschädigten wurden die SRTs anhand eines Standardaudiogramms geschätzt. Die letztendlich untersuchten Versuchspersonen wiesen dann aber im hohen Frequenzbereich im Mittel einen etwas höheren Hörverlust auf. Für die Hörgeschädigten zeigten sich in den Ergebnissen konkret, dass die mittlere Sprachverständlichkeit beim geringsten Sprachpegel (+4dB) mit nur 64% deutlich unter dem angestrebten Wert von 80% lag. Auch die maximale Bewertung der Lautstärke war im Mittel 1 Einheit niedriger lag als bei den Normalhörenden. So ist davon auszugehen, dass die Schätzung der SRTs

und das im Mittel schlechtere Audiogramm der Versuchspersonen zur Darbietung von zu geringen SNRs bzw. Sprachpegeln geführt haben.

In oberen Frequenzbereich streuen die individuellen Hörschwellen auch relativ stark. Dies hat vermutlich in den Untersuchungen dazu geführt, dass die individuellen SNRs auch innerhalb der SNR-Kategorien stark gestreut haben. Dies sollte zu der im Vergleich zu den Normalhörenden größeren Varianz der Sprachverständlichkeit und der Bewertungen innerhalb der SNR-Kategorien geführt haben. Dieser Nachteil konnte in Kauf genommen werden, weil die Steuerung des Versuchsablaufs anhand der individuellen Hörschwellen einen Aufwand bedeutet hätte, dem ein geringer Informationsvorteil für die Formulierung von Qualitätsniveaus gegenüber gestanden hätte. Die Qualitätsniveaus können, wie die Indexwerte auch (Bormann et al., 2005), nur für Gruppen von Hörern vergleichbarer Höreigenschaften gelten.

Anhand der dargestellten Ergebnisse zeigte sich aber, dass die Methode der SRT-basierten Untersuchung der Kommunikationsqualität grundsätzlich den gewünschten Effekt auf die Vergleichbarkeit der SNRs in den untersuchten Bedingungen und der Versuchspersonen hatte.

Die Ergebnisse können darüber hinaus als Hinweis darauf interpretiert werden, dass sich die Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SRT für verschiedene akustische Bedingungen im Kfz weitestgehend gleichmäßig und linear entwickelt. Dies galt natürlich, aus den eben dargestellten Gründen, in wesentlich höherem Maße für die Normalhörenden als für die Hörgeschädigten. In diesem Sinne wären auch die SRT + 16dB (Normalhörende) bzw. + 20dB (Hörgeschädigte) als Richtwert für das Erreichen einer hohen Kommunikationsqualität im Fahrzeug zu interpretieren. Diese Werte wurden auch durch die statistische Auswertung der Zunahme der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SNR unterstrichen. Es ist zu vermuten, dass der Wert für die hörgeschädigten Versuchspersonen aufgrund der hier gezeigten Ergebnisse durch die Differenz zwischen dem Standard- und dem tatsächlichen mittleren Audiogramm etwas zu hoch ausgefallen ist.

In den anschließenden Kapiteln werden zuerst die Ergebnisse der statistischen Auswertungen zu den Korrelationen der Items der Kommunikationsqualität und anschließend zur Zunahme der Sprachverständlichkeit, der Kommunikationsqualität und der Sprachindizes und deren Zusammenhänge oberhalb des SRT dargestellt.

8.4.2 Zusammenhänge der Items der Kommunikationsqualität

Die interne Konsistenz der vier Items war für die beiden untersuchten Hörergruppen sehr hoch. Dies lässt darauf schließen, dass sie, wie von Sust et al. (2007) und Sust et al. (2009) angenommen, grundsätzlich ein gemeinsames Konstrukt erheben. Bei differenzierter Betrachtung über die SNRs kommen allerdings feine Unterschiede der einzelnen Items und der Hörergruppen zum Vorschein.

Für die Normalhörenden ergab sich der erwartete Effekt, dass mit zunehmendem SNR die Korrelation zwischen den Items abnahm. Für die Hörgeschädigten war dieser Zusammenhang etwas komplizierter: Mit zunehmendem SNR nahmen lediglich die Korrelationen zwischen der Lautstärke der Sätze und den anderen Items deutlich ab. Dies deutet darauf hin, dass die Lautheit bei hohen SNRs zunehmend unabhängig von den anderen Items bewertet wird. Der Zusammenhang zwischen den anderen Items scheint komplexer zu sein. Grundsätzlich geht eine hohe Konzentration mit einer hohen Sprachverständlichkeit einher. In Abhängigkeit des SNR zeigen sich allerdings Unterschiede. Zu diesem Effekt tragen die unterschiedlichen Streuungen in Abhängigkeit des SNR bei. Beim höchsten SNR zeigte sich, dass die Konzentration deutlich stärker streut als die Sprachverständlichkeit. Das heißt, die subjektive Sprachverständlichkeit wird von den Versuchspersonen einheitlich hoch bewertet, während die aufzuwendende Konzentration unterschiedlich eingeschätzt wird. Die Bewertung der Belästigung entwickelt sich über die SNRs in ähnlicher Weise. Beide Items scheinen individuelle Unterschiede der Wahrnehmung deutlicher widerzuspiegeln als die subjektive Sprachverständlichkeit und die Lautstärke der Sätze.

Somit können die Schlussfolgerungen von Preminger und Van Tassel (1995a) aufgrund der Ergebnisse des Experiments 3 nur für Normalhörende unterstützt werden. Die hörgeschädigten Versuchspersonen können in diesem Versuch offensichtlich nur die Lautstärke der Sätze unabhängig von den anderen Items bewerten.

Es muss berücksichtigt werden, dass die SNRs in der vorliegenden Untersuchung nicht individuell für die einzelnen Hörgeschädigten bestimmt wurden (vgl. Abschnitt 8.4.1). So könnte es durch die stärkere individuellen Streuung der SNRs innerhalb einer SNR-Kategorie zu einer Überdeckung dieses Effektes gekommen sein. Hier könnten in einer weiteren Datenauswertung anhand der individuellen SRTs, die SNR-Kategorien neu zusammengefasst werden. Dies könnte evtl. zu einer Verringerung der Streuung und damit zu den erwarteten Korrelationen in Abhängigkeit der SNRs führen.

Insgesamt hat sich in diesem und dem Abschnitt 8.4.1.2 gezeigt, dass die Erhebung der Kommunikationsqualität im Fahrzeug anhand verschiedener Items lohnenswerte Informationen enthält. Dies sollte aber generell für die Qualität von Kommunikationssituationen gelten, wo zusätzlich zum mentalen Aufwand auch externe Einflüsse aufgrund hoher Störgeräusch- und Sprachpegel für die Bewertung eine Rolle spielen.

8.4.3 Veränderung der Kommunikationsqualität, der Sprachverständlichkeit und des $BSIM_T$ in Abhängigkeit des SNR

Wie angenommen, verändert sich die Kommunikationsqualität im Fahrzeug oberhalb des SRT stärker und vor allem länger als die Sprachverständlichkeit. Dies ist ein Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen sowohl für die Normalhörenden als auch für hörgeschädigte Versuchspersonen. Grundsätzlich zeigten zwar sowohl die objektive Sprachver-

ständigkeit als auch die Kommunikationsqualität signifikante Veränderungen über die SNRs. Bei genauerer Betrachtung war die Kommunikationsqualität aber für die Normalhörenden bis zu einem SNR von +16dB (Normalhörende) bzw. +20dB (Hörgeschädigte) aussagekräftig. Auch das $BSIM_T$ verändert sich bis zu einem höheren SNR signifikant.

Diese Aussage wird durch die höheren Korrelationen zwischen den Sprachindizes und der Kommunikationsqualität im Vergleich zu den Korrelationen zwischen den Sprachindizes und der Sprachverständlichkeit untermauert.

Bereits andere Autoren hatten zeigen können, dass dies für die Bewertung der Kommunikation bei verschiedensten Störgeräuschen (Volberg et al., 2004, 2006; Sust et al., 2007, 2009) gilt. Der selbe Zusammenhang wurde auch in verhallter Umgebung (Morimoto et al., 2004; Sato et al., 2005) gezeigt. Sato et al. (2008) zeigten darüber hinaus erstmalig, dass der STI in dieser akustischen Umgebung hoch mit der Konzentration korrelierte.

Dies war ein interessanter Befund, da die Sprachindizes laut ihrer Definition eigentlich Sprachverständlichkeit messen sollten. Unklar war, ob der Zusammenhang zur Konzentration auch unter den akustischen Bedingungen im Fahrzeug und mit anderen Sprachindizes auftritt. In dieser Situation ist weniger Nachhall das Problem als hohe Störgeräuschpegel. Anhand der vorliegenden Untersuchung konnte ein Zusammenhang zwischen dem STI und der subjektiven Bewertung der Kommunikationsqualität, die die Konzentration als ein Item enthält, für diese Störgeräusch behaftete Situation nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde dieser Zusammenhang ebenfalls für das $BSIM_T$ und den SII_T gezeigt.

Damit muss festgehalten werden, dass die Sprachindizes oberhalb von 0,2 stärker die subjektive Bewertung der Kommunikationssituation widerspiegeln als die erzielte Sprachverständlichkeit.

Die in dem vorliegenden Experiment untersuchte Kommunikationsqualität beinhaltet neben der Konzentration die Belästigung, Lautstärke der Sätze und die subjektive Sprachverständlichkeit. Weil durch die Störgeräusche sowohl die Belästigung als auch der für die Verständlichkeit erforderliche Sprachpegel die Kommunikationsqualität beeinflussen, zeigte sich für die Kommunikationsqualität eine gewissen Sättigung. Diese weist die Bewertung der Konzentration allein nicht auf, weder in den Daten von Sato et al. (2008) noch in den hier gefundenen Ergebnissen. Dadurch erklärt sich wahrscheinlich auch der höhere Zusammenhang des STI mit der Konzentration, die in der Untersuchung von Sato et al. (2008) bei $r=-.97$ lag, während die Korrelation zwischen STI und Kommunikationsqualität in diesem Experiment bei $r=.86$ lag.

Obwohl der SII Korrekturen für Verzerrungen aufgrund zu hoher Sprachpegel implementiert hat (vgl. ANSI, 1997), zeigen die Werte des SII_T und das $BSIM_T$ nur geringe Sättigungseffekte. Hier liegt offensichtlich die subjektive Toleranz bzgl. der Lautheit eines Sprachpegels bei einem Wert, der noch nicht zu der in Bormann et al. (2005) physiologisch bedingten Sättigung der Sprachverständlichkeit führt.

Das $BSIM_T$ weist höhere Korrelationen mit der Kommunikationsqualität auf als der SII_T und der STI. Der selbe Vorteil bei der Stabilität der Vorhersage in den verschiedenen akustischen Bedingungen im Kfz wurden bereits im Experiment 1 und 2 für die Vorhersage der Sprachverständlichkeit gezeigt.

Im nächsten Abschnitt wird die Zuordnung der Sprachindizes zu den Qualitätsniveaus für die Kommunikationsqualität im Kfz diskutiert.

8.4.4 SRT-basierte Qualitätsniveaus für Kommunikation im Kfz

Für beide Hörergruppen kann man insgesamt sagen, dass mit einer bestimmten Verbesserung des Sprachindex-Wertes ein ähnlicher Zuwachs an Kommunikationsqualität in den verschiedenen untersuchten Bedingungen einhergeht. Aber die Kommunikationsqualität bei einem Index-Wert variiert in Abhängigkeit der Situation um ein bis zwei Qualitätsniveaus.

8.4.4.1 Normalhörende

Vergleicht man die STI-Werte in der Norm DIN IEC 60268-16 DIN (2009) mit den hier gefundenen Qualitätsniveaus, fällt auf, dass im Kfz geringere Grenzwerte angenommen werden können. D.h. die wahrgenommene Kommunikationsqualität ist in dieser speziellen Situation, bei der durchgeführten Bewertung und mit diesem Sprachmaterial (OLSA) bei dem selben Indexwert etwas höher. Besonders auffallend ist, dass anhand der hier vorgelegten Daten festgehalten werden muss, dass aufgrund reiner Pegelanhebung nur schwer eine sehr gute Kommunikationsqualität im Kfz erreicht werden kann. Dies gilt insbesondere für die Insassenkommunikation und die Telefonübertragung. Beim Vergleich der SII-Werte mit denen des SII_T fällt direkt auf, dass mit dem Wert von 0,75, der lt. der Norm S3.5-1997 (ANSI, 1997) einer guten Sprachverständlichkeit entspräche, einer sehr gute Kommunikationsqualität im Kfz entsprechen würde.

Für einzelne Situationen sind die Bewertungen durch die Sprachindizes teilweise zu gut bzw. zu schlecht. Für den SII_T und das $BSIM_T$ betrifft dies, wie sich bereits im Experiment 2 gezeigt hatte, die Telefonübertragung. Der SII_T würde außerdem die Kommunikationsqualität im offenen Cabrio deutlich zu schlecht bewerten. Für alle anderen Bedingungen ist die Streuung bei der Bewertung durch den SII_T offensichtlich am geringsten. Das $BSIM_T$ zeichnet sich allerdings dadurch aus, dass es in keiner Bedingung eine so eklatant abweichende Vorhersage macht, wie das der SII_T und der STI für einzelne Bedingungen tun.

Der STI weist die größten Abweichungen in den beiden Bedingungen der Insassenkommunikation auf. Die Bedingung *SUV Fahrer HR* bewertet er zu gut, *Kombi Fahrer HR* zu schlecht. In diesen Situationen ist der besonders ausgeprägte Hochtonabfall auffällig (siehe Abbildung). Ähnliche Ergebnisse erhielten bereits (Humes et al., 1986) beim retrospektiven Vergleich der Vorhersagen von AI und STI. Die Autoren schlussfolgerten, dass der

AI im Vergleich zum STI bessere Vorhersagen in Situationen machen würde, in denen die Signale spektral verfärbt sind. Dies könnte, wie bereits im Experiment 2 diskutiert, mit seiner geringeren Frequenzauflösung und der einfacheren Implementierung der Aufwärtsverdeckung im Vergleich zum SII_T und $BSIM_T$ zusammenhängen. Auch die DIN IEC 60268-16 (DIN, 2009) vermerkt, dass der STI bei Spektren, die nicht flach sind, zu hohe Werte berechnet. Bei dieser Begründung bleibt jedoch offen, warum der STI trotz der ähnlichen spektralen Verläufe beider Bedingungen für *SUV Fahrer HR* eine deutlich bessere und für *Kombi Fahrer HR* eine schlechtere Vorhersage im Vergleich zu den anderen akustischen Bedingungen macht.

Die Zuordnung der Qualitätsniveaus für die beiden monauralen Ansätze (SII_T und STI) ist gleich, während für die gleiche Bewertung das $BSIM_T$ einen höheren Wert ausgeben müsste. Die höheren Korrelationen über alle Bedingungen kann aber wiederum als höhere Stabilität der Vorhersage des $BSIM_T$ im Vergleich zu den beiden monauralen Ansätzen interpretiert werden.

8.4.4.2 Hörgeschädigte

Bei den Hörgeschädigten streuen die Werte ebenfalls in Abhängigkeit der akustischen Bedingungen. Allerdings sind keine offensichtlich falschen Vorhersagen zu erkennen wie bei den Normalhörenden. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass allein die Hörschwelle einen Großteil der Unterschiede in der Sprachverständlichkeit (Kryter, 1946; Lazarus et al., 2007) und damit vermutlich auch der Kommunikationsqualität erklärt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist noch einmal zu beachten, dass die Werte der Sprachindizes auf Basis eines Standardaudiogramms berechnet wurden. Dies muss zwangsläufig zu Abweichungen zwischen Indexwerten und Kommunikationsqualität führen.

Der Bezug zwischen Kommunikationsqualität und SII_T bzw. $BSIM_T$ ist ähnlich dem der Normalhörenden: der SII_T weist wiederum niedrigere Werte aus als das $BSIM_T$. Im Gegensatz zu den Normalhörenden war es mit den untersuchten Pegeln des Sprachsignals möglich, eine gute bis sehr gute Kommunikationsqualität zu erreichen. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Bewertungen der Lautstärke erst bei einem höheren SNR ihr Maximum erreichen und mit weiter zunehmendem Pegel auch nicht so stark negativ bewertet werden. Dadurch geht die Gesamtbewertung der Kommunikationsqualität nicht so stark zurück wie bei den Normalhörenden, obwohl die Verständlichkeit und die Konzentration von den Hörgeschädigten bei gleichem Pegel sogar etwas weniger häufig positiv bewertet werden.

Hier lässt sich insgesamt eine Diskrepanz zwischen den Normalhörenden und den Hörgeschädigten verzeichnen. Beide Gruppen sollten wegen der SRT-Korrektur gleiche Qualitätsniveaus aufweisen. Es ist denkbar, dass eher die methodischen Unterschiede bei der Messwertbestimmung (vgl. Kapitel 8.4.1) und weniger überschwellige Defizite bei den Hörgeschädigten zu diesen Diskrepanzen führen. Die Sprachindizes haben vermutlich

wegen der angenommenen geringeren Hörschwelle bessere Werte für die SNRs berechnet als sie bei der wahren Hörschwelle auftreten würden. Hier würde eine weitere Auswertung mit der wahren mittleren Hörschwelle der Versuchspersonen Aufschluss geben können. Diese Auswertungen waren nicht Gegenstand der Untersuchung da im Kfz davon auszugehen ist, dass kein individuelles Wissen über die Hörschwelle der Insassen vorhanden sein wird.

Wenn man davon ausgeht, dass für die Hörgeschädigten der selbe Zusammenhang zwischen SII_T und STI gilt, könnte man die Qualitätsniveaus für den STI daraus ableiten. Die aus dem Experiment 3 abgeleiteten Werte dürfen keinesfalls mit den Werten des STI für Hörgeschädigte verglichen werden. Die hier dargestellten Werte sind SRT-basiert, d.h. sie sind bereits um die Differenz zur Hörschwelle der Normalhörenden korrigiert. Vergleichbare Werte könnten anhand der Sprachindizes ohne Korrektur der Hörschwelle modelliert werden.

8.4.5 Zusammenfassung

Es lässt sich festhalten, dass die SRT-bezogene Betrachtung als methodisches Vorgehensweise die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowohl in unterschiedlichen Hörsituationen als auch für unterschiedliche Hörergruppen erhöhte. Wobei dies für die Normalhörenden besser gelang als für die Hörgeschädigten.

In der Arbeit konnte weiterhin gezeigt werden, dass sich die Kommunikationsqualität in den verschiedenen akustischen Bedingungen im Fahrzeug mit zunehmendem SNR verhältnismäßig ähnlich entwickelt, wenn der SRT als Ankerpunkt verwendet wird. Dabei wurde aufgrund reiner Pegelanhebung ein Maximum an Kommunikationsqualität bei +16dB für die Normalhörenden bzw. +20dB bei den Hörgeschädigten erreicht.

Für das Anwendungsfeld Kfz konnte bestätigt werden, dass die Kommunikationsqualität oberhalb des SRT sensitiver für Unterschiede in den akustischen Bedingungen ist als die Sprachverständlichkeit. Die hohen Korrelationen zwischen Kommunikationsqualität und den Werten der Sprachindizes weisen außerdem darauf hin, dass die Sprachindizes oberhalb des SRT besser die subjektive Kommunikationsqualität widerspiegeln.

Außerdem untermauern die Ergebnisse des Experiments 3, dass mehrere Items zu einer umfassendere Bewertung der Kommunikationsqualität bei hohen SNRs führt. Die unterschiedlichen Bewertungen dieser Items konnten anhand der Darstellung von Positivbewertungen noch deutlicher gemacht werden.

Die Gegenüberstellung der Sprachindexwerte und der Qualitätsniveaus erfolgte aus diesem Grund ebenfalls anhand der Positivbewertungen. Dabei zeigte sich, dass die Werte für die Qualitätsniveaus für die monauralen Indizes SII_T und STI im Kfz etwas niedriger liegen als sie in den Normen für die Sprachindizes ausgewiesen sind. Die Werte des $BSIM_T$ entsprechen dagegen in etwa diesen ausgewiesenen Werten. Außerdem weisen

die Daten darauf hin, dass eine rein pegelbezogene Verbesserung des SNR nicht unter allen Bedingungen zu einer sehr guten Kommunikationsqualität im Kfz führt.

9. Gesamtdiskussion

In dieser Arbeit wurde erstmalig die Vorhersage der Sprachverständlichkeit durch verschiedene Sprachindizes im Fahrzeug systematisch untersucht. Dazu wurden zuerst die akustischen Bedingungen im Fahrzeug aufgezeichnet und anhand verschiedener Wirkgrößen analysiert. Im Ergebnis zeigte sich, dass im Fahrzeug eine sehr komplexe akustische Situation vorliegt, die sich in unterschiedlichen Frequenz- und Modulationsspektren und Pegeldifferenzen manifestiert.

Das Experiment 1 diente der Untersuchung der Modellgüte der Sprachindizes bei deren Anwendung im Fahrzeuginnenraum mit speziellem Fokus auf den Einfluss verschiedener Störgeräuschbedingungen, im Experiment 2 lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung verschiedener Sprachübertragungswege. In beiden Experimenten wurden in den akustischen Bedingungen die SRTs empirisch erhoben und mit den von SII_T und $BSIM_T$ berechneten Werten verglichen. Zusätzlich wurden die Indexwerte des STI berechnet.

Im Experiment 3 wurde untersucht, wie die Sprachverständlichkeit bzw. die Kommunikationsqualität jenseits des SRT mit den Werten der Sprachindizes zusammenhängen. Dazu wurden die objektive Sprachverständlichkeit und die Bewertungen der Kommunikationsqualität in Abhängigkeit vergleichbarer SNRs in verschiedenen akustischen Bedingungen erhoben und mit den Indexwerten des $BSIM_T$, des SII_T und des STI verglichen.

Zuerst werden die Ergebnisse der Experimente 1 und 2 mit denen des Experiments 3 für einen Gesamtüberblick über die Modellgüte der Sprachindizes bei der Vorhersage der Sprachverständlichkeit und der Kommunikationsqualität im Fahrzeug zusammengefasst und anschließend daran Einsatzmöglichkeiten der Sprachindizes in der Infotainmententwicklung der Audi AG beschrieben.

9.1 Modellgüte der Sprachindizes im Kfz

Grundsätzlich ist bei der Anwendung der Sprachindizes im Fahrzeug darauf zu achten, dass diese unter anderen akustischen Bedingungen, im Speziellen für andere Störgeräusche evaluiert sind (Hargus & Gordon-Salant, 1995; Humes et al., 1986; Larm & Hongisto, 2006; Beutelmann & Brand, 2006; Beutelmann, 2008; Van Wijngaarden & Drullman, 2008). Entsprechend zeigten sich im Experiment 1 auch deutliche Abweichungen bei der Berechnung der SRTs, die zu einer Tieftonanpassung der Sprachindizes in dieser Arbeit und damit zu einer signifikant besseren Vorhersage der Sprachverständlichkeit führten. Insgesamt wurde die beste Vorhersage für Sprachverständlichkeit im Fahrzeug durch den binauralen Ansatz erzielt. Bei diesem waren sowohl die absoluten Abweichun-

gen von den empirischen SRTs am kleinsten als auch die Korrelationen zwischen den modellierten und den empirischen SRTs über alle Bedingungen am höchsten.

In den einzelnen untersuchten Fahrzeugbedingungen ist die Modellgüte der Sprachindizes aber unterschiedlich hoch. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge sind diese Unterschiede nicht durch einfache Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zu beschreiben. Anhand des Vergleichs der Vorhersagen des $BSIM_T$ und des SII_T mit der empirischen Sprachverständlichkeit und den Werten des STI lässt sich aber vermuten, dass eine Verbesserung ihrer Vorhersage durch zwei Erweiterungen möglich wäre.

Zum einen könnte ein Kurzzeit-Ansatz bei der Betrachtung der Störgeräuschspektren zu einer Verbesserung der Vorhersage in verschiedenen Störgeräuschen führen. Hier konnte bereits in einer Untersuchung mit einer Kurzzeit-Erweiterung zum SII eine Verbesserung der Vorhersage für Sprache im Fahrzeuggeräusch um 1dB gezeigt werden (Rebergen et al., 2008). Zum anderen könnte die Implementierung der Modulations-Transfer-Funktion (MTF) in das $BSIM_T$ bzw. den SII_T die Vorhersage für die Sprachsignale im Fahrzeug verbessern. Diese weisen Veränderungen der typischen Sprachmodulationen auf (vgl. Kapitel 5). Die Verbesserung der Vorhersage der SRTs des BSIM durch die Implementierung der MTF und anderer raumakustischer Parameter wurde bereits in einer ersten Studie belegt (Rennies et al., in Druck). Im Unterschied zu den von Rennies et al. (in Druck) untersuchten Bedingungen entstehen aber die Veränderungen der Modulationen im Fahrzeug kaum durch Nachhall. Hier sind vor allem die digitale Signalverarbeitung der Sprache und die speziellen Absorptions- und Reflektionsverhältnisse mit den daraus entstehenden lokalen Überhöhungen und Auslöschungen in den Signalen für diese Veränderungen verantwortlich (Meroth, 2008).

Die Ergebnisse der Experimente 1, 2 und 3 zeigten auch, dass der STI im Vergleich zum $BSIM_T$ und dem SII_T im Allgemeinen geringere Indexwerte berechnete. Somit ist davon auszugehen, dass die zugehörigen SRTs des STI ebenfalls höher liegen, also stärker von den empirischen SRTs abweichen als die SRTs der beiden anderen Indizes. Dies würde bedeuten, dass der STI die Sprachverständlichkeit im Fahrzeug unterschätzt. Mit dieser Erkenntnis können die Ergebnisse, die zur Anwendung des STI im Fahrzeug vorgelegt wurden, zwar als Hinweis darauf interpretiert werden, dass der STI Unterschiede in den akustischen Bedingungen widerspiegeln kann (Schucht et al., 2008; Farina et al., 2003; Bozzoli & Farina, 2004). Es bleibt aber weiterhin unklar, wie gut die Berechnungen des STI in Bezug auf die absolute Sprachverständlichkeit bzw. auf den SRT sind.

Diese Unterschiede in der Modellgüte zeigten sich natürlich auch in der Vorhersage der Kommunikationsqualität, die im Experiment 3 untersucht wurde. So nehmen zwar die Werte innerhalb einer Bedingung mit dem SNR verhältnismäßig gleichmäßig zu, aber ein Indexwert steht in verschiedenen Bedingungen durchaus für eine unterschiedliche Kommunikationsqualität.

In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass in dieser Arbeit die Vorhersagegüte der Indizes erstmalig in Bezug auf deutsches Sprachmaterial untersucht wurde. Der hier verwendete Oldenburger Satztest (OLSA, Wagener et al., 1999a) zeigt eine deutlich frühere Sättigung mit zunehmendem SNR, als sie z.B. mit dem CVC-Material für den STI gezeigt wurde (DIN, 2009). So ist die im Experiment 3 gefundene geringere Korrelation der Sprachindizes mit der Sprachverständlichkeit bei hohen SNRs nicht verwunderlich. Wie bereits Bormann et al. (2005) bemerkte, sollte die Übertragungsfunktion zwischen Sprachindex und Sprachmaterial empirisch ermittelt werden. Erst dann können Aussagen zur konkreten Sprachverständlichkeit abgeleitet werden. Dies könnte anhand der im Experiment 3 erhobenen Daten für die untersuchten Sprachindizes für den Bereich oberhalb des SRT erfolgen.

9.2 Zusammenhang zwischen den Sprachindizes und der Kommunikationsqualität

Interessant ist der enge Zusammenhang, den alle Sprachindizes mit der Kommunikationsqualität jenseits des SRT aufwiesen. Damit ist insgesamt anhand der Ergebnisse der Experimente 1, 2 und 3 zu schlussfolgern, dass der Vergleich der Sprachverständlichkeit verschiedener akustischer Bedingungen anhand der Sprachindizes nur in Bezug auf den SRT erfolgen sollte. Jenseits des SRT spiegeln die Indizes eher Unterschiede in der Kommunikationsqualität wider. Dies unterstreicht die Ergebnisse einer Untersuchung von Sato et al. (2008), die einen ähnlichen Zusammenhang für den STI und die Konzentration in verschiedenen akustischen Bedingungen mit Nachhall gezeigt hatten.

Dass anhand der Werte der Sprachindizes eine Aussage über die Kommunikationsqualität getroffen werden kann, lässt auch die Erstellung einer Transfer-Funktion zwischen den Sprachindizes und dem Sprachmaterial des OLSA obsolet erscheinen. Die Ergebnisse des Experiments 3 und anderer Autoren (Volberg et al., 2004; Sust et al., 2007) zeigten, dass sich die objektive Sprachverständlichkeit im Bereich oberhalb des SRT relativ schnell in der Sättigung befindet. Dagegen kommt in diesem Bereich der Vorteil der subjektiven Bewertungen bei der Beurteilung der Qualität der Hörsituation zum Tragen. Diese weist, wie das Experiment 3 zeigte, in Abhängigkeit des SNR eine ähnlich lineare Entwicklung auf wie die Sprachindexwerte. Damit wäre anhand der Kommunikationsqualität eine vom Sprachmaterial unabhängige Bewertung der Qualität der Hörsituation möglich.

9.3 Modellgüte der Sprachindizes für Personen mit Höreinschränkungen

Im Experiment 1 wurde eine sehr heterogene Gruppe untersucht, sodass die empirischen SRTs auch einer großen Streuung unterlagen. Die Vorhersage der Sprachverständlichkeit, die unter Berücksichtigung der individuellen Hörschwellen erfolgte, war auch für diese Hörer sehr gut. Die Modellgüte für die Hörgeschädigten war vergleichbar mit derjenigen für die Normalhörenden.

Im Experiment 3 wurde eine Gruppe von Versuchspersonen untersucht, die hinsichtlich ihrer Hörverluste deutlich homogener war. Allerdings basierte die Vorhersage der Kommunikationsqualität im Unterschied zum ersten Experiment nicht auf dem individuellen Hörvermögen sondern auf einem Standardaudiogramm. Durch die Abweichungen zwischen den tatsächlichen Audiogrammen und der Information, die den Sprachindizes diesbezüglich zur Verfügung stand, ergaben sich größere Differenzen zwischen den untersuchten Bedingungen.

Besonders auffällig waren die beiden Insassenkommunikationsbedingungen, in denen trotz vergleichbarer SNRs und Indexwerte, die wahrgenommene Kommunikationsqualität deutlich geringer war als in den anderen Bedingungen. In diesem Zusammenhang ist eine Erkenntnis von Bormann et al. (2005) interessant, die die Autoren aufgrund der Ergebnisse verschiedener Studien zusammengefasst haben: Bei normaler Sprechweise muss der Geräuschpegel für die Hörgeschädigten abgesenkt werden, um eine den Normalhörenden vergleichbare Sprachverständlichkeit zu erhalten. Die Autoren weisen ausdrücklich darauf hin, dass eine Erhöhung des Sprachpegels, wie im Experiment 3 geschehen, die Hörbedingungen kaum verbessert. Unter diesem Blickwinkel erscheinen auch die auffällig schlechten Bewertungen der Kommunikationsqualität bei den beiden untersuchten Insassenkommunikationsbedingungen trotz vergleichbarer SNRs plausibler. Dieser Effekt ist nicht allein durch die erhöhte Hörschwelle zu begründen, sodass die Sprachindizes diese Auswirkungen nicht vorhersagen können. Damit lässt sich die deutliche Diskrepanz zwischen den Berechnungen der Sprachindizes auf Grundlage der Hörschwelle und den Bewertungen der Kommunikationsqualität durch die Hörgeschädigten erklären.

Die abgeleiteten Qualitätsniveaus lagen bei vergleichbaren SNRs für die Hörgeschädigten nur unwesentlich höher als für die Normalhörenden. Somit kann insgesamt festgehalten werden, dass die Berechnungen der Sprachindizes bereits allein auf Basis von grundlegendem Wissen über die Hörfähigkeit bestimmter Hörergruppen zu einer guten Vorhersage der Kommunikationsqualität führt.

9.4 Anwendungen in der Infotainmententwicklung der Audi AG

Die Befragung von Autofahrern aus dem Probandenpool der Audi AG und der VW AG hatte ergeben, dass neben einer guten Sprachverständlichkeit der Infotainmentsysteme eine möglichst geringe Höranstrengung beim Verstehen erwartet wird. Bemängelt wurde von den normalhörenden Autofahrern die Sprachverständlichkeit der Sprachausgaben im Fahrzeug und von den hörgeschädigten Autofahrern die notwendige Höranstrengung (Fischer et al., 2008). Daraus formuliert sich für die Audi AG der Anspruch, seine Infotainmentprodukte hinsichtlich dieser Punkte zu verbessern ohne die Klangqualität seiner Soundsysteme zu verschlechtern.

Mit der Bewertung der Kommunikationsqualität in den Fahrzeugen geht diese Arbeit noch einen Schritt weiter, indem sie zusätzlich zur Höranstrengung die Belästigung, die Lautstärke der Sprache und die subjektive Bewertung der Sprachverständlichkeit als Qualitätsfaktoren einbezieht. Dies erschien in Hinblick auf die besonderen akustischen Bedingungen und die ergonomischen Anforderungen an die Gestaltung der akustischen Ausgaben nach DIN EN ISO 15006 (2007-2) im Fahrzeug notwendig. Die Sprachwiedergabe im Fahrzeug soll den Fahrer nicht zusätzlich belasten. Diesem Anspruch wird durch das Einbeziehen des mentalen Aufwands anhand der Konzentration Rechnung getragen. Gleichzeitig sollen die Leistung und den Komfort verbessert werden. Diese Aspekte werden anhand der subjektiven Sprachverständlichkeit und der Belästigung betrachtet. Außerdem soll im Fahrzeug ein Kompromiss zwischen Hörbarkeit und Hörkomfort in Bezug auf die Lautstärke des Signals hergestellt werden. Hierzu kann die Einschätzung der Lautstärke der Sätze wichtige Informationen liefern.

Anhand der erstellten Datenbank der akustischen Aufnahmen ist es möglich, den jetzigen Stand hinsichtlich der Sprachverständlichkeit und der Kommunikationsqualität in den Fahrzeugen der Audi AG darzustellen. Auf Basis der aufgezeichneten Spektren der Sprachsignale und der Störgeräusche können mit den Sprachindizes die Werte für verschiedene akustischen Situationen berechnet, dokumentiert und verglichen werden.

In den empirischen Daten der Experimente 2 und 3 zeigten sich deutlich die Probleme, die bei der Kommunikation zwischen Insassen auftreten. Unter der Bedingung, dass der Fahrer spricht und der Hörer auf der Rückbank oder im SUV gar in der 3. Reihe sitzt, ist die Sprachverständlichkeit eklatant schlecht im Vergleich zu allen anderen untersuchten Bedingungen. Eine Lösung für dieses Problem wurde von Schucht et al. (2008) vorgestellt. Dabei wird über ein Insassenkommunikationssystem die Sprache des Fahrers an einen Lautsprecher übertragen und dem Hörer direkt wiedergegeben. Sprachindizes können zum einen bei der Evaluation der Vorteile solcher Systeme eingesetzt werden. Zum anderen können sie aber auch als Algorithmus in der Steuerung der digitalen Signalverarbeitung dienen. Die Ergebnisse des Experiments 3 zeigten, dass die Kommunikationsqualität für die Hörgeschädigten selbst bei Anhebung des Sprachpegels unbefriedigend ist. Hier könnte durch eine verständlichkeitsbezogene Frequenzanpassung auf Basis der Sprachindizes die Bedingung für Hörgeschädigte verbessert werden.

Die empirischen Untersuchungen der drei Experimente unterstreichen auch die Probleme, die die Autofahrer mit den Sprachausgaben im Fahrzeug bereits geäußert hatten (vgl. Fischer et al., 2008). Die Sprachverständlichkeit schwankt nicht nur in verschiedenen Fahrzeugen, sondern auch innerhalb eines Fahrzeugs in Abhängigkeit des Sitzplatzes, der Geschwindigkeit und der Signalquelle. Anhand dieser Erkenntnisse können im ersten Schritt Kundenbeschwerden besser eingeordnet und ggf. auf bestimmte akustische Situationen eingegrenzt werden. Im nächsten Schritt könnte der konkrete Problemfall mit Unterstützung der Berechnungen der Sprachindizes objektiviert und abgestellt werden.

In der Serienentwicklung der Audi AG kommen zusätzlich zu den empirisch untersuchten Einflussgrößen auf die Sprachverständlichkeit noch verschiedene Ausstattungsvarianten der Fahrzeuge hinzu (Leder- und Stoffausstattung, Stoff- und Panoramadach etc.). Deren Auswirkungen auf die Übertragung von Sprache im Fahrzeug sind ebenfalls komplex (Meroth, 2008). Die Audi AG möchte als Anbieter von Premiumprodukten auch für alle auftretenden Konfigurationen eine hohe Qualität der Soundsysteme erzielen.

Insgesamt ergibt sich damit ein hoher zeitlicher und personeller Aufwand bis zur Freigabe eines Soundsystems für die Serienproduktion. Die Abstimmung der Soundsysteme erfolgt bis dato vor allem mit dem Fokus auf eine gute Klangqualität und die Freigabe erfolgt größtenteils durch subjektive Entscheidungen. Sollen nun zusätzlich noch die Anforderungen bzgl. guter Sprachverständlichkeit und Kommunikationsqualität umgesetzt werden, kann dies einerseits mit dem Anspruch auf eine gute Klangqualität kollidieren. Andererseits erhöht sich durch diese zusätzliche Anforderung der Aufwand für Entwicklung und Freigabe weiter.

Objektive Messinstrumente können diesen Aufwand reduzieren, indem sie die menschliche Wahrnehmungsprozesse nachbilden und ohne Personeneinsatz zu validen Aussagen kommen. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Sprachindizes die Sprachverständlichkeit und darüber hinaus auch Kommunikationsqualität allein anhand der Spektren von Sprachsignal und Störgeräusch bestimmen können. Somit könnten die Sprachindizes innerhalb des Entwicklungsprozesses eingesetzt werden, um die zu erwartende Kommunikationsqualität mit bestimmten Konfigurationen vorherzusagen. Diese Information kann anschließend bei der weiteren Abstimmung und für die Serienfreigabe als objektives Kriterium in Entscheidungen einfließen.

Die hohe Messschärfe der Sprachindizes am SRT könnte dazu genutzt werden, einen sehr genauen Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen mit dem Fokus auf die Sprachverständlichkeit durchzuführen. Dadurch, dass sich die Kommunikationsqualität in Abhängigkeit des SRT unter verschiedenen Bedingungen gleichmäßig entwickelt, kann auch davon ausgegangen werden, dass eine Entscheidung im Sinne der Kommunikationsqualität ausfallen würde. Die in dieser Arbeit entwickelten Qualitätsniveaus könnten der Formulierung von Rahmenbedingungen für Freigaben dienen, indem ein Mindestmaß an Kommunikationsqualität durch die Vorhersage der Sprachindizes nachgewiesen werden muss.

Ein anderer Einsatzbereich für die Sprachindizes könnte deren Anwendung als Regelgröße für Algorithmen zur Steuerung der Sprachausgaben während der Fahrt sein. Diesbezüglich konnte innerhalb dieser Arbeit gezeigt werden, dass sie Verbesserungen der Kommunikationsqualität durch Pegelanhebung adäquat vorhersagen können. Da die Vorhersage der Sprachindizes auf Basis des frequenzabhängigen Sprachsignal-Rausch-Abstandes erfolgt, können sie auch grundsätzlich für eine frequenzabhängige Anpassung der Sprachausgaben eingesetzt werden. Da die frequenzabhängige Anpassung aber nicht

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war, müssten weitere Untersuchungen zur Absicherung der Modellgüte durchgeführt werden. Zusätzlich müssten die Auswirkungen der Frequenzanpassung auf die Klangqualität betrachtet werden. Gegebenenfalls müssten Grenzen formuliert werden, die den Kompromiss zwischen beiden Größen regeln. Darauf aufbauend wäre es denkbar, eine weitere Möglichkeit zur Personalisierung der Soundsysteme anzubieten. So könnte ein „Speechboost-Setting“ mit kontinuierlichem Steiler zwischen den Extremen *Sprachverständlichkeit* und *Klangqualität* auf Basis der Modellierung der Sprachindizes realisiert werden.

In der Zukunft wird die Anzahl an Kunden mit Hörproblemen zunehmen. Zum einen werden die Kunden der Audi AG älter (Mauerer, 2010), zum anderen betreffen Höreinschränkungen auch zunehmend jüngere Personen (Sohn, 2001). Auch für diese wachsende Kundengruppe könnte der „Speechboost“ die Kommunikationsqualität verbessern, denn im Allgemeinen wird die bestmögliche Sprachverständlichkeit durch Verstärkung der mittleren bis hohen Frequenzen erreicht (Lazarus et al., 2007). Dies ist auch der Bereich, in dem aufgrund von Alters- und Lärmschwerhörigkeit die Hörschwelle zumeist angehoben ist (Bormann et al., 2005).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den Einsatz von Sprachindizes dem hohen Innovationsdruck bei der Entwicklung der Infotainmentsysteme begegnet werden kann. Außerdem ist die Verbesserung der Produkte hinsichtlich der Kommunikationsqualität ein entscheidender Differenzierungsbeitrag für die Marke Audi im Wettbewerb.

10. Zusammenfassung

In der Entwicklung der Infotainmentsysteme der Audi AG soll neben der Klangqualität, anhand derer die Infotainmentsysteme vorrangig für die Musikwiedergabe optimiert werden, die Sprachverständlichkeit bei der Qualitätsbewertung in den Fokus rücken. Dieser Anspruch entwickelt sich daraus, dass zunehmend sprachliche Inhalte in den Fahrzeugen genutzt werden.

Die Literatur zur Qualität von Sprache zeigte auf, dass die Sprachverständlichkeit nur ein Merkmal des mehrdimensionalen Konstrukts Sprachqualität ist (Gabrielsson & Sjögren, 1979a, 1979b; Preminger & Van Tassel, 1995a; Denisowski, 2001; Gierlich & Kettler, 2006), aber ein sehr wichtiges (Lazarus et al., 2007). Ist die Sprachverständlichkeit schlecht, dominiert sie die Sprachqualität. Erst wenn ein hohes Maß an Sprachverständlichkeit erreicht ist, gewinnen andere Qualitätsmerkmale an Einfluss (Preminger & Van Tassel, 1995a; Boike & Souza, 2000). Der Vorteil der Sprachverständlichkeit ist, dass sie im Unterschied zu anderen Qualitätsdimensionen als nahezu objektives Kriterium bezeichnet werden kann. Der Nachteil der Sprachverständlichkeit ist ihre schnelle Sättigung mit zunehmendem Sprachsignal-Rausch-Abstand (SNR) (Volberg et al., 2004; Sust et al., 2007). In diesem Bereich spiegeln subjektive Qualitätsmerkmale noch Unterschiede in den akustischen Bedingungen wider (Volberg et al., 2004; Sust et al., 2007). Ein weiterer Vorteil der Sprachverständlichkeit ist, dass für einige akustische Bedingungen gut evaluierte, objektive Messinstrumente zu deren Vorhersage existieren - die Sprachindizes (ANSI, 1997; DIN, 2009). Jedoch liegen kaum Untersuchungen zur Vorhersagegüte der Sprachindizes unter den speziellen akustischen Bedingungen im Fahrzeug vor (Morrison & Casali, 1997; Jung et al., 2008).

Somit war eine Aufgabe dieser Arbeit, die Güte verschiedener Sprachindizes bei deren Anwendung im Fahrzeug systematisch zu untersuchen. Anhand der theoretischen Darstellungen konnte außerdem abgeleitet werden, dass die Sprachverständlichkeit zwar ein notwendiges aber nicht hinreichendes Merkmal einer guten Hörsituation darstellt. Deshalb wurde weiterhin der Beitrag der Sprachindizes zur Bestimmung der Kommunikationsqualität im Fahrzeug untersucht.

Dazu wurde im ersten Teil der Arbeit verschiedenste akustische Bedingungen im Fahrzeug aufgezeichnet und anschließend analysiert. Im Ergebnis zeigte sich, dass in den Fahrzeugen sowohl bzgl. der Störgeräuschsituation als auch der Sprachübertragungswege eine sehr komplexe akustische Situation herrscht. Ein Teil dieser Aufnahmen wurde anschließend in den Experimenten zur Erhebung der Sprachverständlichkeit (Experiment 1 und 2) und der Kommunikationsqualität (Experiment 3) eingesetzt.

Für die empirische Erhebung der Sprachverständlichkeit in den Experimenten 1 und 2 bekamen die Versuchspersonen die im Fahrzeug aufgezeichneten Signale per Kopfhörer präsentiert. Unter den dargebotenen Sprachsignal-Störgeräusch-Bedingungen wurde mit den Versuchspersonen ein Sprachverständlichkeitstest durchgeführt. Genauer gesagt, wurde für jede dieser Bedingungen der Speech Reception Threshold (SRT) erhoben, indem adaptiv der Sprachpegel bestimmt wurde, der bei gleichbleibendem Störgeräuschpegel zu einer Sprachverständlichkeit von 50% führte. Außerdem wurde der SRT durch die Sprachindizes modelliert und zwar auf Basis der Sprachsignal- und Störgeräuschspektren der Bedingungen und der Hörschwelle der Versuchspersonen. Der Vergleich der empirischen SRTs mit den durch die Sprachindizes berechneten SRTs führte zur Bestimmung der Modellgüte der Sprachindizes im Fahrzeug.

Im Experiment 1 wurde die Sprachverständlichkeit in verschiedenen Fahrzeugbedingungen mit dem Fokus auf unterschiedliche Störgeräusche untersucht, im Experiment 2 lag der Schwerpunkt auf den Sprachübertragungswegen im Fahrzeug.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Modelle nach einer Erweiterung im Tieftonbereich die SRTs unter den verschiedenen Fahrbedingungen sehr gut vorhersagen können. Dies galt sowohl für die normalhörenden als auch für die hörgeschädigten Versuchspersonen. Die Modellgüte unterschied sich aber zwischen den verschiedenen Sprachindizes und den untersuchten Bedingungen.

Die insgesamt beste Vorhersage wurde mit einem binauralen Ansatz erzielt. Dieser zeigte sowohl die höchste absolute Modellgüte als auch die höchste Korrelation mit den empirischen SRTs über die untersuchten Bedingungen hinweg. Die Ursachen für die Schwankungen der Modellgüte konnten aufgrund der Komplexität der akustischen Bedingungen im Fahrzeug nicht klar zugeordnet werden. Anhand der vorliegenden Daten konnten aber Vorschläge zur Verbesserung der Modelle in einzelnen Situationen abgeleitet werden.

Für die Untersuchung der Kommunikationsqualität im Experiment 3 wurden in Anlehnung an die Arbeiten verschiedener Autoren (Morimoto et al., 2004; Volberg et al., 2004; Sato et al., 2005; Sust et al., 2007) die Items Konzentration (Höranstrengung), Belästigung, Lautstärke der Sätze und subjektive Sprachverständlichkeit unter dem Konstrukt Kommunikationsqualität untersucht.

Da bereits Sato et al. (2008) zeigen konnten, dass einer der Sprachindizes einen hohen Zusammenhang mit der subjektiven Qualitätsdimension Höranstrengung aufwies, sollte in diesem Teil der Arbeit der Beitrag der Sprachindizes zur objektiven Bestimmung der Kommunikationsqualität untersucht werden.

Entsprechend lag der Schwerpunkt der Untersuchungen im Experiment 3 auf dem Zusammenhang zwischen den Sprachindizes und der Sprachverständlichkeit bzw. der Kommunikationsqualität oberhalb des SRT. Im Ergebnis zeigte sich sowohl für die Normalhörenden als auch die Hörgeschädigten, dass die Kommunikationsqualität oberhalb

des SRT sensitiver für Unterschiede in den akustischen Bedingungen ist als die objektive Sprachverständlichkeit. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Sprachindizes in diesem Bereich einen höheren Zusammenhang mit der Kommunikationsqualität aufweisen als mit der Sprachverständlichkeit.

Deshalb kann in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Sato et al. (2008) davon ausgegangen werden, dass die Sprachindizes oberhalb des SRT subjektive Maße, wie die hier untersuchte Kommunikationsqualität, vorhersagen und nicht die Sprachverständlichkeit.

Literaturverzeichnis

- Algazi, V., Duda, R. & Thompson, D. (2001). The CIPIC HRTF Database. In *Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics* (S. 99–102).
- Anderson, B. W. & Kalb, J. T. (1987). English verification of the STI method for estimating speech intelligibility of communications channel. *Journal of the Acoustical Society of America*, 81(6), 1982–1985.
- ANSI. (1997). *Methods for Calculation of the Speech Intelligibility Index* (Nr. S3.5–1997).
- BAuA. (1996). *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Gesundheitsschutz 4 – Lärmwirkungen: Gehör, Gesundheit, Leistung*. Dortmund.
- Beerends, J. G., Hekstra, A. P., Rix, A. W. & Hollier, M. P. (2002). Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ), the new ITU standard for and-to-and speech quality assessment part II: Psychoacoustic model. *Journal of Audio Engineering Society*, 50(10), 765–778.
- Beutelmann, R. (2008). *Modelling binaural speech intelligibility in spatial noise and reverberation for normal-hearing and hearing-impaired subjects*. Dissertation. Oldenburg: Carl-von-Ossietzky-Universität.
- Beutelmann, R. & Brand, T. (2006). Prediction of speech intelligibility in spatial noise and reverberation for normal hearing and hearing-impaired listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(1), 331–342.
- Boike, K. T. & Souza, P. E. (2000). Effect of compression ratio on speech recognition and speech-quality ratings with wide dynamic range compression amplification. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 43, 456–468.
- Bormann, V., Sust, C. A., Schmitt, R. Heinecke & Fuder, G. & L. H. (2005). *Schwerhörigkeit und Sprachkommunikation am Arbeitsplatz: FB 1041*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW.
- Bowden, E. E. & Wang, L. (2007). Verifying two commercial software implementations of impulse-response-based speech intelligibility measurements. *Applied Acoustics*, 68(7), 717–728.
- Bozzoli, F. & Farina, A. (2004). Measurement of Speech Transmission Index inside cars using throat-activated microphone and its correlation with drivers impression. In Audio Engineering Society (Hrsg.), *Convention Paper of the 117th AES-Convention: 28. – 31. Okt. San Francisco*.
- Brand, T. & Kollmeier, B. (2002). Efficient adaptive procedures for treshold and concurrent slope estimate for psychophysics and speech intelligibility tests. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(6), 2801–2810.

- Bronkhorst, A. W. (2000). The Cocktail Party Phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(1), 117–128.
- Denisowski, P. (2001). How does it sound? *IEEE Spectrum*, 2, 60–64.
- Denisowski, P. & De Rosa, L. (2001). Sprachqualität objektiv testen. *Funkschau*, 10, 64–68.
- DIN. (1995). *Sprache für Gehörprüfung – Teil 1: Ein- und mehrsilbige Wörter* (Nr. DIN 45621–1). Berlin: Beuth.
- DIN. (2007). *Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Konformitätsverfahren für die Ausgabe auditiver Informationen im Fahrzeug* (Nr. DIN EN ISO 15006). Berlin: Beuth.
- DIN. (2009). *Elektroakustische Geräte – Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex* (Nr. DIN IEC 60268–16). Berlin: Beuth.
- Durlach, N. (1963). Equalization and cancellation theory of binaural masking-level differences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35(8), 1206–1218.
- ETSI. (2008). *Background Noise Transmission – Network Simulation – Objective Test Methods* (Nr. EG 202 396–3).
- Farina, A., Bozzoli, F. & Strasser, P. (2003). Comparative study of speech intelligibility inside cars. In *Proceedings of Euronoise Conference: Naples, 19. – 21. May* (Bd. 2003, S. 1–5).
- Fastl, H. & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3. Aufl.). Berlin, New York: Springer.
- FGH. (2000). *Wie viele Menschen in Deutschland haben Hörschäden?: <http://www.fgh-gutes-hoeren.de/fgh/rund-ums-hoeren/zahlen-und-fakten.html>*. Pressestelle Forum Gutes Hören: München.
- FGH. (2008). *Immer mehr Menschen leiden unter Hörschwäche – Jugend durch Freizeitlärm besonders gefährdet: <http://www.forum-gutes-hoeren.de>*. Pressestelle Forum Gutes Hören: München.
- Fischer, R.-L., Meinecke, C. & Otten, J. (2008). Anforderungen jüngerer und älterer Autofahrer an In-Car-Kommunikation und die Sprachwiedergabe von Infotainmentgeräten. In DEGA (Hrsg.), *Fortschritte der Akustik: Tagungsband DAGA – 34. Jahrestagung für Akustik, Dresden 10.–13.03.2008* (S. 609–610).
- Fletcher, H. & Galt, R. (1950). The perception of speech and its relation to telephony. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22(2), 89–151.
- Gabrielsson, A. & Sjogren, H. (1979a). Perceived sound quality of sound reproducing systems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65, 1019–1033.
- Gabrielsson, A. & Sjogren, H. (1979b). Perceived quality of hearing aids. *Scandinavian Audiology*, 8, 159–169.
- Gierlich, H. & Kettler, F. (2006). Advanced speech quality testing of modern telecommunication equipment: An overview. *Signal Processing*, 86, 1327–1340.

- Gierlich, H., Kettler, F., Poschen, J. & Reimes, J. (2008). A new objective model for wide- and narrowband speech quality predictions including background noise. In EURASIP (Hrsg.), *Proceedings of the 16th. European Signal Processing: Lausanne 25.–29. Aug* (S. o.S.).
- Goldstein, E. B. & Herbst, G. (2002). *Wahrnehmungspsychologie* (2. Aufl.). Heidelberg: Spektrum.
- Grant, K. & Braida, L. (1991). Evaluating the articulation index for the auditory–visual input. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 2952–2960.
- Hargus, S. E. & Gordon–Salant, S. (1995). Accuracy of speech intelligibility index predictions for noise–masked young listeners with normal hearing and for elderly listeners with hearing impairment. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38, 234–243.
- Hohmann, V. (2002). Frequency analysis and synthesis using a Gammatone filterbank. *Acta Acustica united with Acustica*, 88, 433–442.
- Houtgast, T. & Steeneken, H. (1971). Evaluation of speech transmission channels by using artificial signals. *Acustica*, 25, 355–367.
- Houtgast, T. & Steeneken, H. (1973). The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, 28, 66–73.
- Humes, L. E., Dirks, D. D., Bell, T. S. & Ahlstrom, C. & K. G. E. (1986). Application of the Articulation Index and the Speech Transmission Index to the recognition of speech by normal–hearing and hearing–impaired listeners. *Journal of Speech and Hearing Research*, 29, 447–462.
- ISO. (1990). *Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise–induced hearing impairment* (Nr. 1999). Geneve: International Organization for Standardization.
- ITU. (1998). *Objective quality measurement of telephone–band (300–3400–Hz) speech codecs* (Nr. ITU–T P.861). Geneve.
- ITU. (2001). *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end–to–end speech quality assessment of narrow–band telephone networks and speech codecs* (Nr. ITU–T P.862). Geneve.
- Jung, O., Schweitzer, J. Becker & Grützmaker, V. (2008). Audiologische Tests zur Beurteilung der Geräuschqualität im Fahrzeuginnenraum. In DEGA (Hrsg.), *Fortschritte der Akustik: Tagungsband DAGA – 34. Jahrestagung für Akustik, Dresden 10.–13.03.2008* (S. 493–494).
- Kryter, K. (1946). Effects of ear protective devices on the intelligibility of speech in noise. *Journal of the Audio Engineering Society*, 18, 413–417.
- Larm, P. & Hongisto, V. (2006). Experimental comparison between speech transmission index, rapid speech transmission index, and speech intelligibility index. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(2), 1103–1117.

- Lazarus, H., Sust, C., Steckel, R., Kulka, M. & Kurtz, P. (2007). *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Berlin; Heidelberg: Springer.
- Ludvigsen, C. (1987). Prediction of speech intelligibility for normal-hearing and cochlearly hearing-impaired listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 82(4), 1162–1171.
- Ludvigsen, C. (1993). The use of objective methods to predict the speech intelligibility of hearing aid processed speech. In J. Beilin (Hrsg.), *Recent Developments in Hearing Instrument Technology* (S. 81–94). Scanditicon.
- Mauerer, G. (2010). *Jaguar und Mercedes haben die ältesten Käufer: <http://www.automobilwoche.de>*. Automobilwoche online.
- Meroth, A. (2008). Akustik und Audiotechnik. In A. Meroth & B. Tolg (Hrsg.), *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug* (S. 7–78). Vieweg & Sohn Verlag.
- Meroth, A., Tolg, B. & Plappert, C. (2008). Einführung. In A. Meroth & B. Tolg (Hrsg.), *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug* (S. 1–5). Vieweg & Sohn Verlag.
- Moore, B. C. J. (2003). *An introduction to the psychology of hearing* (5. Aufl.). Amsterdam, Boston: Academic Press.
- Morimoto, M., Sato, H. & Kobayashi, M. (2004). Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(3), 1607–1613.
- Morrison, H. B. & Casali, J. G. (1997). Intelligibility of synthesized voice messages in commercial truck cab noise for hearing and hearing-impaired listeners. *International Journal of Speech Technology*, 2, 33–44.
- Müsch, H. (2001). Review and computer implementation of Fletcher and Galt's method of calculating the Articulation Index. *Acoustics Research Letters Online*, 2(1), 25–30.
- Nijs, L., Saher, K. & Ouden, D. den. (2008). Effect of room absorption on human vocal output in multitalker situations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(2), 803–813.
- Preminger, J. & Van Tassel, D. (1995a). Quantifying the relation between speech quality and speech intelligibility. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38, 714–725.
- Rennies, J., Brand, T. & Kollmeier, B. (in Druck). Modellierung des Einflusses von Nachhall auf binaurale Sprachverständlichkeit in Ruhe und im Rauschen. In DE-GA (Hrsg.), *Fortschritte der Akustik: Tagungsband DAGA – 37. Jahrestagung für Akustik, Düsseldorf 21.–24.03.2011*.
- Rhebergen, K., Versfeld, N. & Dreschler, W. (2006). Extended speech intelligibility index for the prediction of the speech reception threshold in fluctuating noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(6), 3988–3997.
- Rhebergen, K., Versfeld, N. & Dreschler, W. (2008). Prediction of the intelligibility for speech in real-life background noises for subjects with normal hearing. *Ear&Hearing*, 29, 169–175.

- Rix, A. W. & Hollier, M. P. (2000). The perceptual analysis measurement system for robust end-to-end speech assessment. In IEEE (Hrsg.), *Proceedings of the IEEE International Conference* (Bd. 3, S. 1515–1518).
- Rix, A. W., Hollier, M. P., Hekstra, A. P. & Beerends, J. G. (2002). Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ), the new ITU standard for end-to-end speech quality assessment Part I—time-delay compensation. *Journal of Audio Engineering Society*, 50(10), 755–764.
- Sato, H., Bradley, J. S. & Morimoto, M. (2005). Using listening difficulty ratings of conditions for speech communication in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 117(3), 1157–1167.
- Sato, H., Morimoto, M., Sato, H. & Wada, M. (2008). Relationship between listening difficulty and acoustical objective measures in reverberant sound fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(4), 2087–2093.
- Schucht, C., Bork, S. & Meier, A. (2008). Digitale Sprachverbesserung für Automobile. In DEGA (Hrsg.), *Fortschritte der Akustik: Tagungsband DAGA – 34. Jahrestagung für Akustik, Dresden 10.–13.03.2008* (S. 851–852).
- Sohn, W. (2001). Schwerhörigkeit in Deutschland, Repräsentative Hörscreening– Untersuchung bei 2000 Probanden in 11 Allgemeinpraxen. *Zeitschrift Allgemeinmedizin*, 77, 143–147.
- Steeneken, H. & Houtgast, T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1), 318–326.
- Steeneken, H. & Houtgast, T. (1999). Mutual dependence of the octave-band weights in predicting speech intelligibility. *Speech Communication*, 28, 109–123.
- Steeneken, H. J. M. & Houtgast, T. (2002b). Validation of the revised STIr method. *Speech Communication*, 38, 413–425.
- Sust, C. A., Lazarus, H., Steckel, R., Kulka, M. & Kurtz, P. (2009). Assessing speech comprehension in noise: Acoustic quality of speech for near real communication conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 95, 86–96.
- Sust, C. A., Steckel, R., Kulka, M., Lazarus, H. & Kurtz, P. (2007). *Beurteilung der Sprachkommunikation bei Verkehrsgeräuschen – Gestaltungsgrundsätze: FB1091*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW.
- Van Wijngaarden, S. J. & Drullman, R. (2008). Binaural intelligibility prediction based on the speech transmission index. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(6), 4514–4523.
- Volberg, L., Kulka, M., Sust, C. A. & Lazarus, H. (2004). *Ergonomische Bewertung der Sprachkommunikation: Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*.

- Volberg, L., Kulka, M., Sust, C. A. & Lazarus, H. (2006). Speech Intelligibility and the Subjective Assessment of Speech Quality in Near Real Communication Conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 92, 406–416.
- Vom Hövel, H. (1984). *Zur Bedeutung der Übertragungseigenschaften des Außenohrs sowie des binauralen Hörsystems bei gestörter Sprachübertragung. Dissertation.* RWTH Aachen.
- Wagener, K., Brand, T. & Kollmeier, B. (1999b). Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache II: Optimierung des Oldenburger Satztests. *Zeitschrift für Audiologie*, 38(2), 44–56.
- Wagener, K., Brand, T. & Kollmeier, B. (1999c). Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache III: Evaluation des Oldenburger Satztests. *Zeitschrift für Audiologie*, 38(3), 86–95.
- Wagener, K., Kühnel, V. & Kollmeier, B. (1999a). Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache I: Design des Oldenburger Satztests. *Zeitschrift für Audiologie*, 38(1), 4–15.
- Zöfel, P. (2003). *Statistik für Psychologen: Im Klartext.* München: Pearson.

Anhang

A1 Experiment 1

A1.1 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten - Normalhörende

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		Corr_OLSA_0_0	Corr_OLSA_0_100	Corr_OLSA_N_A4_S	Corr_A4_N_OLSA_S
N		7	7	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-8,2571	-22,4857	-7,2400	-25,5286
	Standardabweichung	,42762	1,16108	1,12398	1,10561
Extremste Differenzen	Absolut	,226	,206	,252	,311
	Positiv	,143	,178	,252	,311
	Negativ	-,226	-,206	-,143	-,226
Kolmogorov-Smirnov-Z		,599	,544	,666	,823
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,866	,928	,766	,506

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. Schwerhörigkeit = 0 nicht schwerhörig

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Diff_Pb_bin_OLSA_0_0	Diff_Pb_bin_OLSA_0_100	Diff_Pb_bin_OLSA_N_A4_S	Diff_Pb_bin_A4_N_OLSA_S
N		7	7	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-,9871	-2,7657	5,0400	-8,1186
	Standardabweichung	,42762	1,16108	1,12398	1,10561
Extremste Differenzen	Absolut	,226	,206	,252	,311
	Positiv	,143	,178	,252	,311
	Negativ	-,226	-,206	-,143	-,226
Kolmogorov-Smirnov-Z		,599	,544	,666	,823
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,866	,928	,766	,506

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Diff_Pb_bin_A4_ Avant_VR_150	Diff_Pb_bin_A4_ Avant_HR_150	Diff_Pb_bin_A4_ Avant_VR_50	Diff_Pb_bin_A4_ Cabrio_zu
N		7	7	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-4,2414	-3,8557	-8,1314	-4,8086
	Standardabweichung	,67259	,84346	,62106	,94112
Extremste Differenzen	Absolut	,200	,230	,248	,197
	Positiv	,200	,230	,248	,197
	Negativ	-,102	-,204	-,197	-,184
Kolmogorov-Smirnov-Z		,530	,609	,657	,522
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,941	,853	,781	,948

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Diff_Pb_bin_A4_ Cabrio_auf	Diff_Pb_bin_TT	Diff_Pb_bin_Q7	Diff_Pb_mon_ OLSA_0_0
N		6	7	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-4,7133	-5,1357	-2,0986	-1,2371
	Standardabweichung	,92826	,83751	,67753	,42762
Extremste Differenzen	Absolut	,202	,224	,201	,226
	Positiv	,145	,224	,171	,143
	Negativ	-,202	-,197	-,201	-,226
Kolmogorov-Smirnov-Z		,496	,592	,533	,599
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,967	,875	,939	,866

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Diff_Pb_mon_ OLSA_0_100	Diff_Pb_mon_ OLSA_N_A4_S	Diff_Pb_mon_A4_ N_OLSA_S	Diff_Pb_mon_A4_ Avant_VR_150
N		7	7	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-14,1557	-6,7100	-7,7786	-7,3614
	Standardabweichung	1,16108	1,12398	1,10561	,67259
Extremste Differenzen	Absolut	,206	,252	,311	,200
	Positiv	,178	,252	,311	,200
	Negativ	-,206	-,143	-,226	-,102
Kolmogorov-Smirnov-Z		,544	,666	,823	,530
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,928	,766	,506	,941

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Diff_Pb_mon_A4_ Avant_HR_150	Diff_Pb_mon_A4_ Avant_VR_50	Diff_Pb_mon_A4_ Cabrio_zu	Diff_Pb_mon_A4_ Cabrio_auf
N		7	7	7	6
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-6,6457	-11,2314	-4,5686	-14,5533
	Standardabweichung	,84346	,62106	,94112	,92826
Extremste Differenzen	Absolut	,230	,248	,197	,202
	Positiv	,230	,248	,197	,145
	Negativ	-,204	-,197	-,184	-,202
Kolmogorov-Smirnov-Z		,609	,657	,522	,496
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,853	,781	,948	,967

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Diff_Pb_mon_TT	Diff_Pb_mon_Q7
N		7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-5,1557	-3,3886
	Standardabweichung	,83751	,67753
Extremste Differenzen	Absolut	,224	,201
	Positiv	,224	,171
	Negativ	-,197	-,201
Kolmogorov-Smirnov-Z		,592	,533
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,875	,939

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

A1.2 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten - Hörgeschädigte

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_OLSA_0_0 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,75 und der Standardabweichung 1,026.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,840	Nullhypothese beibehalten
2	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_OLSA_0_100 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,961 und der Standardabweichung 4,21.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,569	Nullhypothese beibehalten
3	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_OLSA_N_A4_S ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 6,547 und der Standardabweichung 2,658.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,869	Nullhypothese beibehalten
4	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_A4_N_OLSA_S ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -6,917 und der Standardabweichung 1,918.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,997	Nullhypothese beibehalten
5	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_A4_Avant_VR_150 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,295 und der Standardabweichung 2,469.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,972	Nullhypothese beibehalten
6	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_A4_Avant_HR_150 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -2,992 und der Standardabweichung 3,042.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,695	Nullhypothese beibehalten
7	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_A4_Avant_VR_50 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -5,91 und der Standardabweichung 2,825.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,081	Nullhypothese beibehalten
8	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_A4_Cabrio_zu ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,987 und der Standardabweichung 2,588.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,954	Nullhypothese beibehalten
9	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_A4_Cabrio_auf ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -6,235 und der Standardabweichung 4,834.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,862	Nullhypothese beibehalten
10	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_TT ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,032 und der Standardabweichung 2,617.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,930	Nullhypothese beibehalten
11	Die Verteilung von Diff_Pb_bin_Q7 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,373 und der Standardabweichung 2,114.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,536	Nullhypothese beibehalten
12	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_OLSA_0_0 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -1,248 und der Standardabweichung 1,11.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,997	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzniveaus werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
13	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_OLSA_0_100 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -8,81 und der Standardabweichung 4,986.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,691	Nullhypothese beibehalten
14	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_OLSA_N_A4_S ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -3,339 und der Standardabweichung 2,164.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,893	Nullhypothese beibehalten
15	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_A4_N_OLSA_S ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -6,814 und der Standardabweichung 2,557.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,970	Nullhypothese beibehalten
16	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_A4_Avant_VR_150 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -7,592 und der Standardabweichung 2,192.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,997	Nullhypothese beibehalten
17	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_A4_Avant_HR_150 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -5,834 und der Standardabweichung 2,648.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,953	Nullhypothese beibehalten
18	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_A4_Avant_VR_50 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -9,04 und der Standardabweichung 2,31.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,247	Nullhypothese beibehalten
19	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_A4_Cabrio_zu ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,947 und der Standardabweichung 2,147.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,930	Nullhypothese beibehalten
20	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_A4_Cabrio_auf ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -13,396 und der Standardabweichung 4,785.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,673	Nullhypothese beibehalten
21	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_TT ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,29 und der Standardabweichung 2,629.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,892	Nullhypothese beibehalten
22	Die Verteilung von Diff_Pb_mon_Q7 ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -1,835 und der Standardabweichung 1,802.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,940	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzniveaus werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Corr_OLSA_0_0	Corr_OLSA_0_100	Corr_OLSA_N_A4_S	Corr_A4_N_OLSA_S
N		8	8	8	7
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-6,8750	-15,6500	-2,8275	-19,9000
	Standardabweichung	1,56091	5,91294	2,54807	5,53233
Extremste Differenzen	Absolut	,201	,294	,210	,320
	Positiv	,201	,294	,210	,320
	Negativ	-,122	-,210	-,179	-,193
Kolmogorov-Smirnov-Z		,570	,831	,595	,846
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,902	,494	,871	,472

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Corr_A4_Avant_VR_150	Corr_A4_Avant_HR_150	Corr_A4_Avant_VR_50	Corr_A4_Cabrio_zu
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-15,0725	-11,4875	-14,9975	-11,1575
	Standardabweichung	3,60771	3,98692	4,72801	3,81442
Extremste Differenzen	Absolut	,285	,318	,366	,298
	Positiv	,285	,318	,366	,298
	Negativ	-,181	-,203	-,217	-,200
Kolmogorov-Smirnov-Z		,806	,900	1,036	,844
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,535	,393	,233	,475

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Corr_A4_Cabrio_auf	Corr_TT	Corr_Q7	Mod_bin_OLSA_0_0	Mod_bin_OLSA_0_100
N		8	8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-21,9250	-10,2325	,1375	-6,1252	-14,6891
	Standardabweichung	6,99301	4,19862	3,55023	1,74155	5,24757
Extremste Differenzen	Absolut	,277	,311	,256	,424	,225
	Positiv	,277	,311	,256	,424	,225
	Negativ	-,219	-,180	-,153	-,270	-,192
Kolmogorov-Smirnov-Z		,782	,880	,724	1,199	,637
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,573	,420	,671	,113	,812

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Mod_bin_OLSA_ N_A4_S	Mod_bin_A4_N_ OLSA_S	Mod_bin_A4_ Avant_VR_150	Mod_bin_A4_ Avant_HR_150
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-9,3745	-13,4772	-10,7780	-8,4952
	Standardabweichung	3,55168	5,27079	4,33328	4,56134
Extremste Differenzen	Absolut	,263	,344	,336	,331
	Positiv	,263	,344	,336	,331
	Negativ	-,208	-,253	-,240	-,236
Kolmogorov-Smirnov-Z		,744	,972	,951	,937
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,637	,301	,327	,344

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Mod_bin_A4_ Avant_VR_50	Mod_bin_A4_ Cabrio_zu	Mod_bin_A4_ Cabrio_auf	Mod_bin_TT
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-9,0877	-6,1705	-15,6901	-6,2006
	Standardabweichung	3,80954	4,61964	7,06282	4,57289
Extremste Differenzen	Absolut	,333	,343	,212	,345
	Positiv	,333	,343	,212	,345
	Negativ	-,252	-,253	-,163	-,236
Kolmogorov-Smirnov-Z		,941	,969	,599	,975
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,339	,305	,865	,298

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Mod_bin_Q7	Mod_mon_OLSA_ 0_0	Mod_mon_OLSA_ 0_100	Mod_mon_OLSA_ N_A4_S
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	,5107	-5,6270	-6,8402	,5114
	Standardabweichung	2,94495	2,02619	2,34056	1,33197
Extremste Differenzen	Absolut	,334	,327	,330	,299
	Positiv	,334	,327	,330	,299
	Negativ	-,223	-,247	-,250	-,231
Kolmogorov-Smirnov-Z		,945	,924	,933	,846
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,334	,360	,349	,471

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Mod_mon_A4_N_ OLSA_S	Mod_mon_A4_ Avant_VR_150	Mod_mon_A4_ Avant_HR_150	Mod_mon_A4_ Avant_VR_50
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-13,6336	-7,4801	-5,6539	-5,9578
	Standardabweichung	5,61221	4,34495	4,45470	3,69444
Extremste Differenzen	Absolut	,326	,328	,326	,316
	Positiv	,326	,328	,326	,316
	Negativ	-,245	-,233	-,224	-,237
Kolmogorov-Smirnov-Z		,923	,929	,921	,894
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,361	,354	,364	,401

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		Mod_mon_A4_ Cabrio_zu	Mod_mon_A4_ Cabrio_auf	Mod_mon_TT	Mod_mon_Q7
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,,b}	Mittelwert	-6,2105	-8,5293	-5,9426	1,9723
	Standardabweichung	4,42406	5,57652	4,61112	3,15910
Extremste Differenzen	Absolut	,307	,315	,335	,327
	Positiv	,307	,315	,335	,327
	Negativ	-,229	-,225	-,244	-,224
Kolmogorov-Smirnov-Z		,867	,892	,949	,924
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,439	,404	,329	,360

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

A1.3 Test der Anwendungsvoraussetzungen für das ALM zur Modellgüte des SII und des BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Normalhörende

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

Box-M-Test	,000
F	,000
df1	6
df2	1043,321
Sig.	1,000

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjekt-design: Situation

Mauchly-Test auf Sphärität^b

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^a		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Untergrenze
Situation	,813	2,276	2	,321	,843	1,000	,500

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjekt-design: Situation

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

	F	df1	df2	Sig.
Diff_Pb_bin_OLSA_0_0	,000	1	12	1,000
Diff_Pb_bin_OLSA_N_A4_S	,000	1	12	1,000
Diff_Pb_bin_A4_N_OLSA_S	,000	1	12	1,000

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjekt-design: Situation

A1.4 Test der Anwendungsvoraussetzungen für das ALM zur Modellgüte des SII und des BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Hörgeschädigte

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

Box-M-Test	3,268
F	,394
df1	6
df2	1043,321
Sig.	,883

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: Situation

Mauchly-Test auf Sphärität^b

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^a		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Untergrenze
Situation	,769	2,890	2	,236	,812	1,000	,500

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: Situation

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

	F	df1	df2	Sig.
Diff_Pb_bin_OLSA_0_0	,000	1	12	,993
Diff_Pb_bin_OLSA_N_A4_S	,071	1	12	,794
Diff_Pb_bin_A4_N_OLSA_S	,320	1	12	,582

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: Situation

A1.5 Test der Anwendungsvoraussetzungen für das ALM zum Vergleich der Modellgüte des SII und des BSIM über die Hauptbedingungen - Hörgeschädigte

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzmatrizen^a

Box-M-Test	303,846
F	2,644
df1	56
df2	1259,655
Sig.	,000

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a. Design:
Konstanter Term +
Modell
Innersubjektdesign:
Kfz

Mauchly-Test auf Sphärizität^b

Maß:MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^a		
					Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	Untergrenze
Kfz	,000	169,714	20	,000	,248	,287	,167

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: Kfz

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

	F	df1	df2	Sig.
Corr_A4_Avant_VR_150	,147	2	21	,864
Corr_A4_Avant_HR_150	,143	2	21	,868
Corr_A4_Avant_VR_50	1,351	2	21	,281
Corr_A4_Cabrio_zu	,129	2	21	,879
Corr_A4_Cabrio_auf	,259	2	21	,775
Corr_TT	,003	2	21	,997
Corr_Q7	,468	2	21	,633

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: Kfz

A1.6 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. der Modellgüte des $BSIM_T$ - Normalhörende

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		Diff_Pb_bin_A4_ Avant_VR_150	Diff_Pb_bin_A4_ Avant_HR_150	Diff_Pb_bin_A4_ Avant_VR_50	Diff_Pb_bin_A4_ Cabrio_zu
N		7	7	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a, b}	Mittelwert	-,5514	-1,6057	-3,8814	-1,1186
	Standardabweichung	,67259	,84346	,62106	,94112
Extremste Differenzen	Absolut	,200	,230	,248	,197
	Positiv	,200	,230	,248	,197
	Negativ	-,102	-,204	-,197	-,184
Kolmogorov-Smirnov-Z		,530	,609	,657	,522
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,941	,853	,781	,948

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. Schwerhörigkeit = 0 nicht schwerhörig

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		Diff_Pb_bin_A4_ Cabrio_auf	Diff_Pb_bin_TT	Diff_Pb_bin_Q7
N		6	7	7
Parameter der Normalverteilung ^{a, b}	Mittelwert	-2,2133	-1,1257	-,3986
	Standardabweichung	,92826	,83751	,67753
Extremste Differenzen	Absolut	,202	,224	,201
	Positiv	,145	,224	,171
	Negativ	-,202	-,197	-,201
Kolmogorov-Smirnov-Z		,496	,592	,533
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,967	,875	,939

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. Schwerhörigkeit = 0 nicht schwerhörig

A1.7 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. der Modellgüte des $BSIM_T$ - Hörgeschädigte

Deskriptive Statistiken^a

	N	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Diff_Pb_bin_A4_Avant_VR_150	8	-,7163	2,13338	-3,23	3,07
Diff_Pb_bin_A4_Avant_HR_150	8	-,7738	2,65600	-4,49	4,26
Diff_Pb_bin_A4_Avant_VR_50	8	-1,9538	2,52102	-3,30	4,21
Diff_Pb_bin_A4_Cabrio_zu	8	-1,5675	2,33235	-4,99	2,21
Diff_Pb_bin_A4_Cabrio_auf	8	-3,5800	4,35993	-10,96	4,18
Diff_Pb_bin_TT	8	-,3637	2,32898	-2,87	4,41
Diff_Pb_bin_Q7	8	,9938	1,91246	-1,05	4,90

a. Schwerhörigkeit = 1 schwerhörig

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		Diff_Pb_bin_A4_Avant_VR_150	Diff_Pb_bin_A4_Avant_HR_150	Diff_Pb_bin_A4_Avant_VR_50	Diff_Pb_bin_A4_Cabrio_zu
N		8	8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-,7163	-,7738	-1,9538	-1,5675
	Standardabweichung	2,13338	2,65600	2,52102	2,33235
Extremste Differenzen	Absolut	,129	,225	,423	,150
	Positiv	,129	,225	,423	,137
	Negativ	-,119	-,172	-,297	-,150
Kolmogorov-Smirnov-Z		,364	,636	1,197	,424
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,999	,813	,114	,994

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. Schwerhörigkeit = 1 schwerhörig

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		Diff_Pb_bin_A4_Cabrio_auf	Diff_Pb_bin_TT	Diff_Pb_bin_Q7
N		8	8	8
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	-3,5800	-,3637	,9938
	Standardabweichung	4,35993	2,32898	1,91246
Extremste Differenzen	Absolut	,214	,173	,265
	Positiv	,214	,173	,265
	Negativ	-,124	-,141	-,143
Kolmogorov-Smirnov-Z		,605	,490	,748
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,857	,970	,630

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. Schwerhörigkeit = 1 schwerhörig

A1.8 Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM zur Modellgüte des $BSIM_T$ mit dem BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Normalhörende

Mauchly-Test auf Sphärizität^b

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^a		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt	Untergrenze
Situation	,813	1,034	2	,596	,843	1,000	,500

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Situation

A1.9 Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM zur Modellgüte des $BSIM_T$ mit dem BSIM in den Validierungs- und Mischbedingungen - Hörgeschädigte

Mauchly-Test auf Sphärizität^b

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.	Epsilon ^a		
					Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt	Untergrenze
Situation	,541	3,070	2	,215	,686	,821	,500

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

a. Kann zum Korrigieren der Freiheitsgrade für die gemittelten Signifikanztests verwendet werden. In der Tabelle mit den Tests der Effekte innerhalb der Subjekte werden korrigierte Tests angezeigt.

b. Design: Konstanter Term
Innersubjekt-design: Situation

A2 Experiment 2

A2.1 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. der Modellgüte des SII_T und des $BSIM_T$ - Normalhörende

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von $Corr_OLSA_0_0$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -9,325 und der Standardabweichung 0,599.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,964	Nullhypothese beibehalten
2	Die Verteilung von $Corr_A4_Avant_HR_150_Info$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -16,48 und der Standardabweichung 0,727.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,448	Nullhypothese beibehalten
3	Die Verteilung von $Corr_A4_Avant_VR_150_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 0,25 und der Standardabweichung 1,398.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,587	Nullhypothese beibehalten
4	Die Verteilung von $Corr_A6_Avant_VR_Info$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -14,968 und der Standardabweichung 1,08.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,922	Nullhypothese beibehalten
5	Die Verteilung von $Corr_A6_Avant_VR_Nav$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -21,558 und der Standardabweichung 1,482.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,962	Nullhypothese beibehalten
6	Die Verteilung von $Corr_A6_Avant_VR_Tel$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -14,568 und der Standardabweichung 1,785.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,337	Nullhypothese beibehalten
7	Die Verteilung von $Corr_Q7_HR_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -3,518 und der Standardabweichung 1,172.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,985	Nullhypothese beibehalten
8	Die Verteilung von $Corr_Q7_3Reihe_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -7,072 und der Standardabweichung 1,484.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,621	Nullhypothese beibehalten
9	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_OLSA_0_0$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,305 und der Standardabweichung 0,599.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,964	Nullhypothese beibehalten
10	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_A4_Avant_HR_Info$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -2,09 und der Standardabweichung 0,727.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,448	Nullhypothese beibehalten
11	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_A4_Avant_HR_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -1,36 und der Standardabweichung 1,398.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,587	Nullhypothese beibehalten
12	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_A6_Avant_VR_Info$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,417 und der Standardabweichung 1,08.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,922	Nullhypothese beibehalten
13	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_A6_Avant_VR_Nav$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -3,148 und der Standardabweichung 1,482.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,962	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzniveaus werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
14	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_A6_Avant_VR_Tel$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 6,742 und der Standardabweichung 1,785.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,337	Nullhypothese beibehalten
15	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_Q7_HR_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 0,402 und der Standardabweichung 1,172.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,985	Nullhypothese beibehalten
16	Die Verteilung von $Diff_Pb_bin_Q7_3Reihe_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -2,442 und der Standardabweichung 1,484.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,621	Nullhypothese beibehalten
17	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_OLSA_0_0$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,305 und der Standardabweichung 0,599.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,964	Nullhypothese beibehalten
18	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_A4_Avant_HR_Info$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,87 und der Standardabweichung 0,727.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,448	Nullhypothese beibehalten
19	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_A4_Avant_HR_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -4,36 und der Standardabweichung 1,398.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,587	Nullhypothese beibehalten
20	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_A6_Avant_VR_Info$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -0,717 und der Standardabweichung 1,08.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,922	Nullhypothese beibehalten
21	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_A6_Avant_VR_Nav$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -2,288 und der Standardabweichung 1,482.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,962	Nullhypothese beibehalten
22	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_A6_Avant_VR_Tel$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 8,982 und der Standardabweichung 1,785.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,337	Nullhypothese beibehalten
23	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_Q7_HR_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -1,288 und der Standardabweichung 1,172.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,985	Nullhypothese beibehalten
24	Die Verteilung von $Diff_Pb_mon_Q7_3Reihe_SprachKK$ ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert -5,012 und der Standardabweichung 1,484.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,621	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanzniveaus werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

A2.2 Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM zur Modellgüte des SII_T und $BSIM_T$ bzgl. der Signalquellen - Normalhörende

Box-Test auf Gleichheit der Kovarianzenmatrizen^a

Box-M-Test	,000
F	,000
df1	6
df2	1420,075
Sig.	1,000

Prüft die Nullhypothese, daß die beobachteten Kovarianzenmatrizen der abhängigen Variablen über die Gruppen gleich sind.

a. Design:
Konstanter Term +
Modell
Innersubjektdesign:
n: System

Mauchly-Test auf Sphärität^b

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.
System	,743	3,868	2	,145

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

b. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: System

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

	F	df1	df2	Sig.
A6_Avant_VR_Info	,000	1	14	1,000
A6_Avant_VR_Nav	,000	1	14	1,000
A6_Avant_VR_Tel	,000	1	14	1,000

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + Modell
Innersubjektdesign: System

A2.3 Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM über die empirischen SRTs bzgl. der Signalquellen - Normalhörende

Mauchly-Test auf Sphärizität^b

Maß: MASS_1

Innersubjekteffekt	Mauchly-W	Approximiertes Chi-Quadrat	df	Sig.
System	,743	1,785	2	,410

Prüft die Nullhypothese, daß sich die Fehlerkovarianz-Matrix der orthonormalisierten transformierten abhängigen Variablen proportional zur Einheitsmatrix verhält.

A3 Experiment 3

A3.1 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Normalhörende

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	KQ_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,7766	6,9969
	Standardabweichung	,16639	,96556
Extremste Differenzen	Absolut	,185	,107
	Positiv	,138	,107
	Negativ	-,185	-,090
Kolmogorov-Smirnov-Z		,829	,478
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,498	,976

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 24 dB

SNR = + 20 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	KQ_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9368	6,4297
	Standardabweichung	,05666	1,05135
Extremste Differenzen	Absolut	,184	,230
	Positiv	,157	,230
	Negativ	-,184	-,104
Kolmogorov-Smirnov-Z		,822	1,030
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,508	,239

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 20 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	KQ_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9677	5,9828
	Standardabweichung	,03415	1,12767
Extremste Differenzen	Absolut	,235	,151
	Positiv	,172	,151
	Negativ	-,235	-,084
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,050	,675
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,220	,752

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 16 dB

SNR = + 12 dBKolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	KQ_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9870	4,8836
	Standardabweichung	,01289	1,13532
Extremste Differenzen	Absolut	,215	,166
	Positiv	,157	,166
	Negativ	-,215	-,089
Kolmogorov-Smirnov-Z		,964	,742
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,311	,641

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 12 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	KQ_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9881	3,7680
	Standardabweichung	,01297	1,17452
Extremste Differenzen	Absolut	,220	,156
	Positiv	,180	,156
	Negativ	-,220	-,096
Kolmogorov-Smirnov-Z		,984	,698
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,287	,714

- a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.
- b. Aus den Daten berechnet.
- c. SNR = + 8 dB

SNR = + 4 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	KQ_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9895	2,6523
	Standardabweichung	,01361	1,14344
Extremste Differenzen	Absolut	,242	,156
	Positiv	,220	,156
	Negativ	-,242	-,110
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,080	,700
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,194	,711

- a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.
- b. Aus den Daten berechnet.
- c. SNR = + 4 dB

Hypothesentestübersicht

	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von bin_SII ist eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 0,622 und der Standardabweichung 0,176.	Kolmogorov-Smirnov-Test bei einer Stichprobe	,435	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanz werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

A3.2 Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest auf Normalverteilung der Daten bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Hörgeschädigte

SNR = + 24 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	HA_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9781	3,4984
	Standardabweichung	,04232	,95738
Extremste Differenzen	Absolut	,338	,175
	Positiv	,303	,175
	Negativ	-,338	-,102
Kolmogorov-Smirnov-Z		1,510	,784
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,021	,570

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 24 dB

SNR = + 20 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	HA_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9854	3,8375
	Standardabweichung	,01380	1,04823
Extremste Differenzen	Absolut	,160	,170
	Positiv	,144	,170
	Negativ	-,160	-,081
Kolmogorov-Smirnov-Z		,717	,762
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,683	,606

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 20 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	HA_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9728	4,8492
	Standardabweichung	,02205	,83569
Extremste Differenzen	Absolut	,140	,132
	Positiv	,121	,132
	Negativ	-,140	-,100
Kolmogorov-Smirnov-Z		,624	,591
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,831	,875

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 16 dB

SNR = + 12 dB**Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c**

		SI_SNR	HA_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,9275	5,7586
	Standardabweichung	,04337	,80504
Extremste Differenzen	Absolut	,170	,100
	Positiv	,104	,088
	Negativ	-,170	-,100
Kolmogorov-Smirnov-Z		,760	,449
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,610	,988

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 12 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c

		SI_SNR	HA_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,8300	6,6563
	Standardabweichung	,07515	,80238
Extremste Differenzen	Absolut	,136	,107
	Positiv	,081	,094
	Negativ	-,136	-,107
Kolmogorov-Smirnov-Z		,608	,479
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,854	,976

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 8 dB

SNR = + 4 dB**Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest^c**

		SI_SNR	HA_4_SNR
N		20	20
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,6393	7,5089
	Standardabweichung	,10012	,71227
Extremste Differenzen	Absolut	,179	,135
	Positiv	,121	,091
	Negativ	-,179	-,135
Kolmogorov-Smirnov-Z		,802	,604
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,542	,859

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

c. SNR = + 4 dB

Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

		bin_SII
N		48
Parameter der Normalverteilung ^{a,b}	Mittelwert	,6387
	Standardabweichung	,17153
Extremste Differenzen	Absolut	,135
	Positiv	,089
	Negativ	-,135
Kolmogorov-Smirnov-Z		,934
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)		,348

a. Die zu testende Verteilung ist eine Normalverteilung.

b. Aus den Daten berechnet.

A3.3 Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM über die SNRs bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Normalhörende

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable:KQ_4_SNR

F	df1	df2	Sig.
,241	5	114	,943

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + SNR

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable:SI_SNR

F	df1	df2	Sig.
46,001	5	114	,000

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + SNR

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable:bin_SII

F	df1	df2	Sig.
1,991	5	42	,100

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + SNR

A3.4 Test der Anwendungsvoraussetzung für das ALM über die SNRs bzgl. SV, KQ und $BSIM_T$ - Normalhörende

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable:KQ_4_SNR

F	df1	df2	Sig.
1,083	5	114	,374

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + SNR

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable:SI_SNR

F	df1	df2	Sig.
7,509	5	114	,000

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + SNR

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^a

Abhängige Variable:bin_SII

F	df1	df2	Sig.
,986	5	42	,438

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Design: Konstanter Term + SNR

