



Lateralisierte Verarbeitung von einfachen akustischen Reizen als Grundlage der Spracherkennung beim Menschen

Dissertation zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Biowissenschaften
der Goethe-Universität in Frankfurt am Main

von

Ann-Kathrin Riegel-Betz, geb. Riegel
aus Bad Hersfeld

Frankfurt am Main (2020)

(D 30)

vom Fachbereich Biowissenschaften der
Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Sven Klimpel

1. Gutachter: PD Dr. Bernhard Gaese

2. Gutachter: Prof. Dr. Paul Dierkes

Datum der Disputation:

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	XI
I. Einleitung	1
1. Allgemeine Verarbeitung auditiver Stimuli	1
1.1. Der Auditorische Cortex	2
2. Untersuchungsmethoden zur funktionalen Lateralisierung des <i>Auditorischen Cortex</i>	4
3. Funktionelle Verarbeitung einzelner Stimulusparameter	6
3.1. Funktionelle Verarbeitung der Stimulusdauer	7
4. Funktionelle Verarbeitung von frequenzmodulierten Stimuli	10
5. Funktionelle Verarbeitung von menschlicher Sprache	12
5.1. Lateralisierte Verarbeitung von menschlicher Sprache	13
5.2. Funktionelle Verarbeitung von (Konsonant-Vokal-)Silben	16
6. Zielsetzung der Arbeit	18
II. Material und Methoden	20
1. Versuchspersonen	20
2. Versuchsaufbau	20
3. Psychophysikversuche	22
3.1. Ermittlung des Punktes subjektiver Gleichheit	22
3.2. Prinzip der Unterscheidungsexperimente bei <i>kontralateralem</i> Rauschen	25
3.3. Erste Versuchsreihe: Unterscheidung der Modulationsrichtung oder der Stimulusdauer von FM-Stimuli	26
3.4. Zweite Versuchsreihe: Unterscheidung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli oder Unterscheidung von CV-Silben	27
4. Datenanalyse	29
III. Ergebnisse	31
1. Erste Versuchsreihe (Modulationsrichtung und Stimulusdauer FM- Stimulus)	31
1.1. Bestimmung des Punktes subjektiver Gleichheit (I)	31

1.2. Experiment 1: Modulationsrichtung FM-Stimulus (I)	35
1.2.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten	35
1.2.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	38
1.2.3. Einfluss der Modulationsrichtung der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	41
1.2.4. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen	42
1.3. Experiment 2: Stimulusdauer FM-Stimulus	43
1.3.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten	43
1.3.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	47
1.3.3. Einfluss der Modulationsrichtung der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	49
1.3.4. Einfluss der Stimulusdauer der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	50
1.3.5. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen	52
2. Zweite Versuchsreihe (Modulationsrichtung FM-Stimulus und CV-Stimuli)	53
2.1. Bestimmung des Punktes subjektiver Gleichheit (II)	53
2.2. Experiment 3: Modulationsrichtung FM-Stimulus (II)	57
2.2.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten	57
2.2.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	61
2.2.3. Einfluss der Modulationsrichtung der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	64
2.3. Experiment 4: CV-Silben „da“ und „ga“	66
2.3.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten	66
2.3.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	70
2.3.3. Einfluss der Art der CV-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	72
2.3.4. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen	74

2.4. Experiment 5: CV-Silben „ta“ und „ka“	75
2.4.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten	75
2.4.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	78
2.4.3. Einfluss der Art der CV-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums	80
2.4.4. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen	82
IV. Diskussion	84
1. Methodische Aspekte des dichotischen Versuchsparadigmas	84
1.1. PSG-Bestimmung	84
1.2. Unterscheidungsexperimente	85
2. Einfluss der Unterscheidungsparameter: Modulationsrichtung vs. Stimulusdauer von FM-Stimuli (Erste Versuchsreihe)	86
2.1. Unterscheidung der FM-Modulationsrichtung (Experiment 1)	86
2.2. Unterscheidung der FM-Stimulusdauer (Experiment 2)	87
2.3. Vergleich von Richtungs- und Dauer-Unterscheidung von FM-Stimuli (Experiment 1 und Experiment 2)	89
3. Einfluss der Stimulustypen: Analyse von Einzelparametern oder Spracheinheiten (Zweite Versuchsreihe)	92
3.1. Wiederholung der FM-Richtungs-Unterscheidung (Experiment 3)	92
3.2. Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ (Experiment 4)	94
3.3. Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ (Experiment 5)	101
3.4. Vergleich der Experimente 3, 4 und 5: Abhängigkeit der Lateralisierung in der Unterscheidungsfähigkeit vom Stimulustyp	102
4. Fazit	108
5. Weitere mögliche Analysen und Experimente	110
V. Danksagung	112
VI. Literatur/Quellenverzeichnis	113
VII. Curriculum Vitae	128

Abkürzungsverzeichnis

2-AFC	<i>two-alternative forced choice</i>
AC	<i>Auditorischer Cortex</i> , Hörrinde
BA	Brodmann-Areal
CV	<i>consonant-vowel</i> , Konsonat-Vokal
EA	<i>ear advantage</i> , Vorteil des Ohres
FM	frequenzmoduliert
fMRT	funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie
HG	<i>Gyri temporales transversi</i> , Heschl'sche Querwindungen
NB	<i>noise burst</i> , Rauschimpuls
ne	neutral
PSG	Punkt subjektiver Gleichheit
RT	<i>reaction time</i> , Reaktionszeit
STG	<i>Gyrus temporalis superior</i>
TDT	<i>Tucker Davis Technologies</i>
VOT	<i>voice onset time</i> , Vokaleinsatzzeit

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schemata des menschlichen Gehirns in seitlicher Aufsicht auf die linke Großhirn-Hemisphäre.	2
Abbildung 2:	Darstellung der allgemeinen Sprachverarbeitung beim Menschen.	15
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.	21
Abbildung 4:	Schematischer Ablauf des adaptiven Verfahrens zur Ermittlung des PSG.	23
Abbildung 5:	Spektrogramme der CV-Silben der zweiten Versuchsreihe.	28
Abbildung 6:	Bestimmung des PSG für die Wahrnehmung der Lautstärke des FM- und NB-Stimulus.	32
Abbildung 7:	PSG-Indizes für Unterschiede in der Wahrnehmung von Lautstärke auf dem linken und rechten Ohr für den FM- und NB-Stimulus.	33
Abbildung 8:	Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 10) während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	35
Abbildung 9:	Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	36
Abbildung 10:	Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	36
Abbildung 11:	Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	37
Abbildung 12:	Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	38
Abbildung 13:	Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	39
Abbildung 14:	Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	40

Abbildung 15:	Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- und abwärts-modulierten FM-Stimuli während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	41
Abbildung 16:	Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 10) während der Unterscheidung der Stimulusdauer.	43
Abbildung 17:	Mittlere Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer.	44
Abbildung 18:	Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer.	45
Abbildung 19:	Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer.	46
Abbildung 20:	Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer.	46
Abbildung 21:	Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Stimulusdauer basierend auf dem 15 %-Kriterium.	47
Abbildung 22:	Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Stimulusdauer basierend auf dem 15 %-Kriterium.	48
Abbildung 23:	Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- und abwärts-modulierten FM-Stimuli während der Unterscheidung der Stimulusdauer basierend auf dem 15 %-Kriterium.	49
Abbildung 24:	Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen FM-Stimuli mit einer Dauer von 400 ms und 600 ms während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	51
Abbildung 25:	Bestimmung des PSG für die Wahrnehmung der Lautstärke des FM-, NB- und CV-Stimulus.	54
Abbildung 26:	PSG-Indizes für Unterschiede in der Wahrnehmung von Lautstärken auf dem linken und rechten Ohr für den FM-, NB- und CV-Stimulus.	56

Abbildung 27: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 23) während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	57
Abbildung 28: Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	58
Abbildung 29: Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	59
Abbildung 30: Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	60
Abbildung 31: Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung.	61
Abbildung 32: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	62
Abbildung 33: Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	63
Abbildung 34: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- und abwärts-modulierten FM-Stimuli während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium.	64
Abbildung 35: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 23) während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“.	66
Abbildung 36: Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“.	67
Abbildung 37: Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“.	68

Abbildung 38:	Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“.	69
Abbildung 39:	Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“.	69
Abbildung 40:	Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium.	71
Abbildung 41:	Vergleich der medianen Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium.	72
Abbildung 42:	Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen „da“- und „ga“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium.	73
Abbildung 43:	Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messblöcke und Versuchspersonen (n = 19) während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“.	75
Abbildung 44:	Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“.	76
Abbildung 45:	Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“.	76
Abbildung 46:	Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“.	77
Abbildung 47:	Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“.	78
Abbildung 48:	Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ basierend auf dem 15 %-Kriterium.	79
Abbildung 49:	Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ basierend auf dem 15 %-Kriterium.	80

Abbildung 50:	Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen „ta“- und „ka“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ basierend auf dem 15 %-Kriterium.	81
Abbildung 51:	Vergleich der Schalldruckpegel-Abhängigkeit der mittleren Fehlerraten und Hit-RTs aller Versuchspersonen zwischen Richtungs- und Dauer-Unterscheidung.	89
Abbildung 52:	Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 8) zwischen Richtungs- und Dauer-Unterscheidung.	91
Abbildung 53:	Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“- , „ga“- und „ne“-Hörer.	95
Abbildung 54:	Vergleich der Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“- , „ga“- und „ne“-Hörer.	96
Abbildung 55:	Vergleich der Fehlerraten zwischen „da“- und „ga“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“- , „ga“- und „ne“-Hörer.	98
Abbildung 56:	Vergleich der Hit-RTs zwischen „da“- und „ga“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“- , „ga“- und „ne“-Hörer.	99
Abbildung 57:	Vergleich der Schalldruckpegel-Abhängigkeit der mittleren Fehlerraten und Hit-RTs aller Versuchspersonen zwischen Experiment 3, 4 und 5.	103
Abbildung 58:	Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 7) zwischen Experiment 3, 4 und 5.	104
Abbildung 59:	Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 9) zwischen Experiment 3 und 4.	105
Abbildung 60:	Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 7) zwischen Experiment 3 und 5.	106

Abbildung 61: Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren einzelner Versuchspersonen ($n = 15$) zwischen Experiment 4 und 5.

107

Zusammenfassung

Das Gehirn weist, nicht nur beim Menschen, in mehreren Bereichen anatomische Asymmetrien zwischen beiden Hemisphären auf, so auch in Bereichen der Hörrinde. Zudem ist spätestens seit den Studien von Broca (1865) und Wernicke (1874) bekannt, dass menschliche Sprache vorrangig in der linken Gehirnhälfte, d.h. linksseitig lateralisiert, verarbeitet wird. Daraus folgend stellt sich die Frage, ob dies eine besondere Spezialisierung ist, oder ob es noch weitere lateralisierte Hirnfunktionen (anatomisch und/oder funktionell) gibt, zum Beispiel für die Verarbeitung einfacherer akustischer Stimuli und Signalkomponenten, die in Sprachsignalen und arteigenen Lauten enthalten sein können.

Viele akustische Signale haben dabei frequenzmodulierte (FM) Komponenten, die im Hörsystem, auch bei Menschen, für die Erkennung nach Parametern wie Richtung und Dauer der Modulation analysiert werden müssen. Ob die Analyse von FM-Komponenten oder einzelner Reizparameter im Gehirn lateralisiert stattfindet, wurde in der Literatur meist mit bildgebenden Verfahren, wie z.B. funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie (fMRT), untersucht.

Für das Erkennen und Unterscheiden der Modulationsrichtung weist eine Vielzahl von Studien auf eine erhöhte Aktivität in der rechten Hörrinde hin. Für die Analyse von Stimulusdauern ist es bisher allerdings noch unklar bzw. umstritten, ob diese lateralisiert erfolgt. Bisher konnten zahlreiche Studien dazu entweder eine linkslastige, andere auch rechtslastige bzw. teilweise auch fehlende Lateralisierung und somit bilaterale Verarbeitung zeigen.

Für die Untersuchung der Lateralisierung einfacher Sprachkomponenten werden häufig Konsonant-Vokal-Silben (CV-Silben) verwendet. In einer Vielzahl von Studien zur Erkennung und Unterscheidung dieser Sprachkomponenten konnte sowohl mit psychophysischen als auch mit bildgebenden Verfahren eine linkslastige Lateralisierung, wie bei der Spracherkennung, gezeigt werden.

Um zu klären, ob ein eindeutigeres Muster von Lateralisierung zu finden ist, wenn diese auf Verhaltensebene, d.h. in Wahrnehmungsexperimenten, untersucht wird, wurde für die vorliegende Arbeit ein Versuchssparadigma aus Aktivierungsstudien an psychophysische Schwellenmessung angepasst. Dabei wurde ein zu untersuchender Teststimulus (FM-/CV-Stimulus) auf einem Ohr mit einem *kontralateralen* breitbandigen Rauschen auf dem anderen Ohr gleichzeitig präsentiert. Durch die Struktur der Hörbahn kann dabei davon ausgegangen werden, dass in einer Hemisphäre des Vorderhirns vorrangig Informationen aus dem *kontralateralen* Ohr verarbeitet und Informationen aus dem *ipsilateralen* Ohr unterdrückt werden und sich somit Rückschlüsse auf die Funktion/Beteiligung einer Hemisphäre ziehen lassen. Das Rauschen diente dabei zur unspezifischen Aktivierung, d.h. „Beschäftigung“, der gegenüberliegenden Hemisphäre.

Die Lateralisierung wurde systematisch für unterschiedlich komplexe Reize untersucht, von einfachen FM-Tönen bis hin zu CV-Silben mit wichtigen FM-Komponenten, deren Erkennung von der Modulationsrichtung oder -dauer abhing. Dazu wurden in zwei Versuchsreihen Unterscheidungsexperimente durchgeführt. Diese gliederten sich in mehrere Messungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen, die sich wiederum aus fünfzig einzelnen Durchläufen zusammensetzen. Pro Durchlauf musste sich die Versuchsperson immer zwischen zwei Antwortmöglichkeiten entscheiden (2-AFC-Verfahren). Der Schalldruckpegel des Rauschens war dabei für alle Messungen konstant. Der Schalldruckpegel der Teststimuli blieb zwar während einer Messung konstant, wurde jedoch innerhalb eines Experimentes von Messung zu Messung reduziert.

In einer gemeinsamen Analyse wurden einerseits die Fehlerraten, andererseits die Reaktionszeiten beider Ohren, getrennt nach Seite und nach FM-/ CV-Stimulus, miteinander verglichen, um so auf eine mögliche Lateralisierung schließen zu können. Damit die Daten der Versuchspersonen bei vergleichbarer Schwierigkeit und somit auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel analysiert werden konnten, wurde als Vergleichswert zwischen allen Versuchspersonen der Schalldruckpegel der ersten Messung mit einer Fehlerrate von mindestens 15,0 % gewählt (15 %-Kriterium). Um auszuschließen, dass das Hörvermögen der Versuchspersonen Unterschiede zwischen beiden Ohren aufweist, wurde vor jeder Messung der „Punkt subjektiver Gleichheit“ für die Lautstärkewahrnehmung zwischen linkem und rechtem Ohr bestimmt.

In der ersten Versuchsreihe wurde dabei die Verarbeitung der Modulationsrichtung (Experiment 1) und der Stimulusdauer (Experiment 2) von FM-Stimuli untersucht. Es zeigte sich für beide Experimente, dass ein sinkender Schalldruckpegel des FM-Stimulus zu einer steigenden Fehlerrate führte. Unter Anwendung des 15 %-Kriteriums waren die Fehlerraten für die Unterscheidung der Modulationsrichtung signifikant geringer, wenn der FM-Stimulus auf dem linken Ohr präsentiert wurde. Dies ist ein deutlicher Hinweis für eine rechtslastige Lateralisierung. Für die Unterscheidung der Stimulusdauer gab es dagegen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Fehlerraten beider Ohren. Somit muss davon ausgegangen werden, dass beide Hemisphären für diese Aufgabe benötigt werden und eine bilaterale Verarbeitung stattfindet. In den Reaktionszeiten konnten in beiden Experimente keine signifikanten Unterschiede gezeigt werden.

Zusammenfassend ließ sich in der ersten Versuchsreihe zeigen, dass eine unterschiedliche Aufgabenstellung bei gleichen Stimuli zu unterschiedlichen Lateralisierungsergebnissen führen kann, wobei dies auch durch einen unterschiedlichen Schwierigkeitsgrad bestimmt sein könnte. So wurde die Unterscheidung der Modulationsrichtung von allen Versuchspersonen als einfacher eingestuft als die Unterscheidung der Stimulusdauer, was sich auch in niedrigeren Antwortschnelligkeit und Fehlerraten bei vergleichbaren Schalldruckpegeln zeigte.

In der zweiten Versuchsreihe wurde als Referenzmessung nochmals die Unterscheidung der Modulationsrichtungen von FM-Stimuli durchgeführt (Experiment 3). Anschließend wurde die Unterscheidung von „da“ und „ga“ untersucht (Experiment 4). Diese CV-Silben differieren ausschließlich in der FM-Komponente. Die Unterscheidung von CV-Silben ohne Unterschied in der FM-Komponente wurde mittels „ta“ und „ka“ getestet (Experiment 5). Für alle drei Experimente zeigte sich, dass ein geringerer Schalldruckpegel des FM- oder CV-Stimulus zu einer steigenden Fehlerate führte. Unter Anwendung des 15 %-Kriteriums zeigte sich für die Unterscheidung der Modulationsrichtung ein Trend zu niedrigeren Fehlerraten bei der Präsentation des FM-Stimulus auf dem linken im Vergleich mit dem rechten Ohr.

Für die Unterscheidung von „da“ und „ga“ ließ sich unter Anwendung des 15 %-Kriteriums in den Fehlerraten kein Vorteil eines Ohres nachweisen. Dagegen zeigten sich klare Unterschiede bei einzelnen Versuchspersonen. 9 Versuchspersonen merkten an, dass sie vorwiegend „da“ erkannt bzw. gehört hatten, 4 erklärten das Gleiche für „ga“; 10 weitere Versuchspersonen machten hierzu keine Angaben. Nach weiterer Analyse waren die Fehlerraten für „da“-Hörer signifikant höher, wenn der CV-Stimulus auf dem rechten Ohr präsentiert wurde, für die „ga“-Hörer war das Gegenteil der Fall. In den Reaktionszeiten konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Somit ließ sich zeigen, dass je nach Strategie der Versuchsperson bzw. deren individueller Wahrnehmung der CV-Silben, Unterschiede in der Lateralisierung erreicht werden können. In den Experimenten 3 und 4 konnten zudem keine signifikanten Unterschiede in den Reaktionszeiten gezeigt werden.

Für die Unterscheidung von „ta“ und „ka“ zeigten sich unter Anwendung des 15 %-Kriteriums signifikant niedrigere Fehlerraten und Reaktionszeiten, wenn der CV-Stimulus auf dem linken Ohr präsentiert wurde. Dies weist deutlich auf eine rechtslastige Lateralisierung hin.

Vergleicht man alle drei Experimente ließ sich zudem zeigen, dass die Unterscheidung der Modulationsrichtung einfacher war als die Unterscheidung verschiedener CV-Stimuli. Dabei war die Unterscheidung von „da“ und „ga“ für die Versuchspersonen schwieriger als die Unterscheidung von „ta“ und „ka“. Allerdings konnte in den Lateralisierungsdaten kein direkter Zusammenhang zwischen den FM- und „da“-/„ga“-Stimuli gezeigt werden.

Zusammenfassend konnte in allen fünf Experimenten eine verschieden stark lateralisierte Verarbeitung von akustischen Stimuli bei gleichzeitigem *kontralateralen* Rauschen gezeigt werden. Der Vorteil eines Ohres (bzw. einer Hemisphäre) war sowohl von der Aufgabe (erste Versuchsreihe) als auch vom Stimulustyp (zweite Versuchsreihe) abhängig. Dabei gab es zum Teil starke Unterschiede in der Effektstärke und dem Grad der Lateralisierung zwischen den einzelnen Versuchspersonen. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sich die hier angewendete psychophysische Methode gut eignet, um Ergebnisse zur Lateralisierung von akustischen Stimuli zu gewinnen und somit die Verhaltensrelevanz von Ergebnissen aus Studien mit bildgebenden Verfahren zu überprüfen.

I. Einleitung

1. Allgemeine Verarbeitung auditiver Stimuli

Damit ein Geräusch, bzw. auditiver Stimulus, als solcher wahrgenommen werden kann, muss dieser zuerst vom Außenohr (*Auris externa*) in Form von Luftschall über das Mittelohr (*Auris media*) an das flüssigkeitsgefüllte Innenohr (*Auris interna*) weitergeleitet werden. In der Hörschnecke (*Cochlea*) findet nun über die Haarsinneszellen eine Signaltransduktion, d.h. die Umwandlung des mechanischen Stimulus in elektrische Impulse, statt. Diese werden über die Fasern des VIII. Hörnervs (*Nervus vestibulocochlearis*) vorrangig entlang der aufsteigenden Hörbahn im Gehirn weitergeleitet und verarbeitet. Die erste Schaltstation ist dabei der *Nucleus cochlearis*. Von dort aus wird das Signal zum oberen Olivenkomplex (*Nucleus olivaris superior*) weitergeleitet, wobei hier ein Großteil der Fasern die Hemisphären kreuzt. Das bedeutet, dass ein Stimulus ab hier vor allem auf der zum Ohr entgegengesetzten (*kontralateralen*) Hemisphäre verarbeitet wird. Über den *Lemniscus lateralis* erreicht das Signal anschließend den *Colliculus inferior* und folgend den *Corpus geniculatum mediale*, bevor es zur vorerst letzten Station der Hörbahn, der Hörrinde (*Auditorischer Cortex, AC*), gelangt.

Die spektrale Analyse von auditiven Stimuli beginnt dabei bereits auf der Ebene der *Cochlea* mit ihrer tonotopen Organisation. Diese Organisation wird auf jeder Ebene der aufsteigenden Hörbahn bis zum AC weitergeführt. Das bedeutet, dass Neurone mit einem gleichen bzw. ähnlichen Sensitivitätsbereich für bestimmte Frequenzen immer nahe beieinander liegen. Somit ist jeder Frequenz ein bestimmter Bereich auf der Basilarmembran bzw. dem entsprechenden Gehirnareal zugeordnet. Besonders die Tonotopie des AC mit einem Frequenzgradienten von tieffrequenten Bereichen lateral zu hochfrequenten Bereichen medial/posterior konnte dabei in vielen Säugetieren (s. z.B. Ratte: Horiwaka et al., 1988; Sally und Kelly, 1988; Katze: Hind, 1953; Goldstein et al., 1970; Merzenich et al., 1975; Affe: Licklider und Kryter, 1942; Bailey et al., 1943; Merzenich und Brugge, 1973) und auch dem Menschen (s. z.B. Celesia, 1976; Lauter et al., 1985; Howard et al., 1996) nachgewiesen werden.

1.1. Der Auditorische Cortex

Der AC ist Teil des Temporal-/Schläfenlappens (*Lobus temporalis*) der Großhirnrinde (*Cortex cerebri*) und liegt zwischen dem *Sulcus lateralis* und dem *Sulcus temporalis superior* auf dem *Gyrus temporalis superior* (STG; s. Abbildung 1a). Dort wiederum befinden sich die sogenannten Heschl'schen (Quer-) Windungen (*Gyri temporales transversi*, HG), deren genaue Anzahl, je nach Studie und Versuchsperson, variieren kann (s. z.B. Pfeifer, 1920; von Economo und Horn, 1930; Campain und Minckler, 1976). Eine klassische Beschreibung und Definition der Lage der Unter-einheiten des AC erfolgt häufig anhand cytoarchitektonischer Charakteristika gemäß Brodmann (1909; s. Abbildung 1b) und umfasst die Brodmann-Areale (BA) 41 (primärer AC), 42 (sekundärer AC) und 22 (Wernicke-Areal).

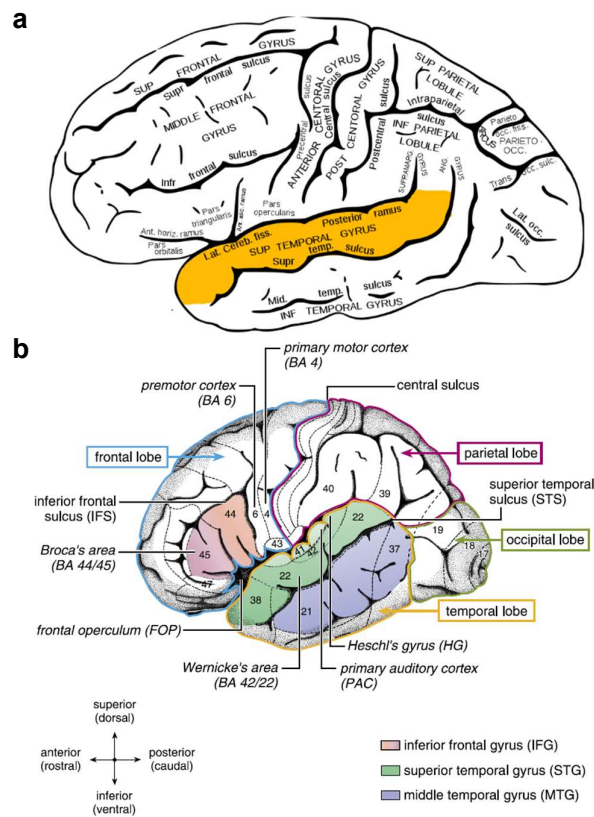


Abbildung 1: Schemata des menschlichen Gehirns in seitlicher Aufsicht auf die linke Großhirn-Hemisphäre. (a) Darstellung der linken Hemisphäre des menschlichen Großhirns anhand der anatomischen Einteilung in Gyri und Sulci. In orange ist der STG hervorgehoben. Quelle: Gray (2010). (b) Darstellung der linken Hemisphäre des menschlichen Großhirns mit der anatomischen Einteilung in Gyri und Sulci in Kombination mit der Einteilung nach Brodmann (1909). Die verschiedenen Lobi (*Lobus frontalis/temporalis/parietalis/occipitalis*) sind farblich umrandet. Sprachrelevante Gyri (*Gyrus frontalis inferior/STG/Gyrus temporalis medius*) sind ebenfalls farblich hervorgehoben. Quelle: Friederici (2011)

Gemäß den Studien von Rademacher et al. (1993) und Penhune et al. (1996) liegt der primäre AC auf dem HG. Existieren mehrere HGs, liegt der primäre AC immer auf dem am meisten anterior gelegenen HG. Des Weiteren ist das Gesamtvolumen der weißen Substanz des primären AC in der linken Hemisphäre größer als in der rechten Hemisphäre. Der primäre AC der linken Hemisphäre liegt wiederum weiter anterior-medial als der primäre AC der rechten Hemisphäre (s. Penhune et al., 1996). Erreicht ein auditorisches Signal den AC, werden im primären AC zuerst einfache Stimulusparameter, wie z.B. die Frequenz, analysiert. Anschließend wird das Signal an andere Bereiche des AC zur weiteren Verarbeitung geleitet.

Der sekundäre AC des Menschen, in manchen Studien auch zusammenhängend mit dem Wernicke-Areal beschrieben, erstreckt sich, je nach Definition, auf dem STG bis hin zum Inselappen (*Lobus insularis*; s. Rivier und Clarke, 1997) und dem *Operculum frontoparietale* (s. Galaaburda und Sanides, 1980). Er ist, neben der Sprachverarbeitung, vorrangig für die Verarbeitung von hinreichend komplexen nicht-sprachlichen Stimuli verantwortlich (s. z.B. Zatorre et al., 1992; Griffiths und Warren, 2002; Jäncke et al., 2002).

Das Wernicke-Areal selbst liegt in der posterioren Region des STG. Ein besonders für die Sprachverarbeitung wichtiger Teil davon ist das *Planum temporale*. Es liegt zwischen dem HG anterior und dem *Sulcus lateralis* posterior und weist im Menschen eine hemisphärische Asymmetrie auf. Das bedeutet, dass das *Planum temporale* auf der für die Sprachverarbeitung dominanten Hemisphäre (überwiegend linke Hemisphäre; s. z.B. Wada und Rasmussen, 1960; Rasmussen und Milner, 1977; Hund-Georgiadis et al., 2002; Bethmann et al., 2007) signifikant größer ist (s. z.B. Geschwind und Levitsky, 1968; Steinmetz et al., 1989; Tzourio-Mazoyer und Mazoyer, 2017). Hopkins et al. (1998) konnten ergänzend dazu zeigen, dass diese hemisphärische Asymmetrie des *Planum temporale* nicht nur in Menschen, sondern auch in allen vier Menschenaffenarten vorkommt.

2. Untersuchungsmethoden zur funktionalen Lateralisierung des Auditorischen Cortex

Da der AC in mehreren Bereichen anatomische interhemisphärische Asymmetrien aufweist, stellt sich die Frage, ob es auch funktionelle Unterschiede zwischen den Hemisphären gibt. Dieser Zusammenhang wurde bereits für andere (Sinnes-) Systeme vielfältig untersucht und nachgewiesen (s. z.B. Review Hellige, 1990). Jedoch ist eine Untersuchung der lateralisierten Verarbeitung auditiver Stimuli oft komplex, da sich hier beispielsweise nur schwer eine Seite bzw. ein Ohr vollständig schließen oder bedecken lässt, um einseitige Messungen durchzuführen. Um trotzdem die zugrunde liegenden Mechanismen im auditiven System genauer zu untersuchen, gibt es verschiedene Forschungsansätze.

Als erster Ansatz wurde und wird häufig die Funktionsweise in Tieren, besonders in Nagern, Katzen und Affen, untersucht. Es bieten sich hier sowohl nichtinvasive Verhaltensversuche als auch das direkte Ableiten elektrischer Signale aus dem AC oder anderer Stationen der Hörbahn mittels Elektrophysiologie an. Daneben kann die Funktion des AC vor und nach einer gezielt induzierten dauerhaften Schädigung (s. z.B. Evarts, 1952; Kelly und Whitfield, 1971; Porter et al., 2011) oder einer zeitlich begrenzten Inaktivierung, beispielsweise mittels Injektion von spezifischen Pharmaka (s. z.B. Review Malpeli, 1999), beobachtet werden.

Um die Funktionalität des AC beim Menschen zu erforschen, wird oft ein möglicher Zusammenhang zwischen Krankheitsbildern und spezifischen Gehirnarealen untersucht (s. z.B. Broca, 1865; Lackner und Teuber, 1973; Prilop und Gutschalk, 2017). In den letzten Jahrzehnten werden dazu vermehrt auch bildgebende Verfahren wie Elektroenzephalographie, Positronen-Emissions-Tomographie, Magnetoenzephalographie und (funktionelle) Magnet-Resonanz-Tomographie verwendet. Hier bietet sich zusätzlich die Möglichkeit die Aktivität im AC nicht nur bei Patienten, sondern auch bei gesunden Versuchspersonen in Echtzeit zu analysieren, ähnlich zur Elektrophysiologie. Als gängiges Verfahren werden Versuchspersonen dabei auditorische Stimuli ohne eine dazugehörige Aufgabe präsentiert (*passive-listening*; s. z.B. Price et al., 1992; Belin et al., 2000; Okamoto und Kakigi, 2015) und die daraus resultierenden Aktivitätsmuster im AC beobachtet.

Des Weiteren gibt die Psychophysik, sowohl als eigenständige Untersuchungsmethode als auch in Kombination mit den oben genannten Verfahren, bereits seit vielen Jahren Hinweise auf die Verarbeitung akustischer Stimuli. Für die Erforschung der lateralisierten Verarbeitung hat sich hier die gleichzeitige Präsentation zweier unterschiedlicher Stimuli, jeweils einer auf einem Ohr (*dichotic -listening*), etabliert (s. z.B. Broadbent, 1954; Kimura, 1961a; Brancucci et al., 2004).

Die Versuchsperson muss hierbei, je nach Versuchsanordnung, einen oder beide Stimuli detektieren oder voneinander unterscheiden. Über die Fehlerraten bzw. Reaktionszeiten (*reaction times*, RTs) für die auf einem Ohr präsentierten Stimuli lassen sich dann Rückschlüsse auf die Funktion/Beteiligung der *kontralateralen* Hemispäre ziehen. Dabei wird, in Bezug auf die aufsteigende Hörbahn, davon ausgegangen, dass der AC vorrangig Informationen aus dem *kontralateralen* Ohr verarbeitet und Informationen aus dem *ipsilateralen* Ohr unterdrückt werden (s. z.B. Majkowski et al., 1971; Brancucci et al., 2004; Della Penna et al., 2007). Ist dabei die Fehlerrate oder RT für Stimuli, die auf einem Ohr präsentiert wurden, höher, spricht man von einem Vorteil des Ohres (*ear advantage*, EA). Sind somit die Fehlerraten oder RTs für Stimuli höher, die auf dem rechten Ohr präsentiert wurden, spricht man von einer linken EA, was wiederum auf eine vorrangige Bearbeitung in der rechten Hemisphäre deutet. Im entgegengesetzten Fall spricht man von einer rechten EA bzw. der vor-rangigen Verarbeitung in der linken Hemisphäre.

3. Funktionelle Verarbeitung einzelner Stimulusparameter

Mit der beschriebenen Vielfalt an Untersuchungsmethoden kann auch die Verarbeitung einzelner Reizparameter von akustischen Stimuli genauer untersucht werden. Zu den charakteristischen Merkmalen akustischer Stimuli zählen dabei die Stimulusdauer, -frequenz und -intensität. Bezüglich einer möglichen lateralisierten Verarbeitung dieser drei Charakteristika gibt es bisher sehr unterschiedliche Erkenntnisse.

Für die Verarbeitung der Stimulusintensität deuten einige Studien auf eine linkslastige (s. z.B. Reiterer et al., 2008; Angenstein und Brechmann, 2013a), andere auf eine rechtslastige Verarbeitung (s. z.B. Belin et al., 1998b; Brancucci et al., 2005) hin.

Bezüglich der spektralen Analyse zeigten einige Studien mit bildgebenden Verfahren eine verstärkte tonotope Organisation auf dem rechten im Vergleich zum linken HG (s. z.B. Liégeois-Chauvel et al., 2001; Langers et al., 2007). Ergänzend dazu konnte auch eine erhöhte Aktivität in der rechten Hemisphäre bzw. im rechten AC für die Unterscheidung von Frequenzen gezeigt werden (s. z.B. Celsis et al., 1999; Jamison et al., 2006). Betrachtet man diverse Studien zur Tonhöhenänderung zeigte sich auch hier überwiegend eine starke Beteiligung der rechten Hemisphäre, bzw. des rechten AC (s. z.B. Efron, 1974; Zatorre et al., 1992).

3.1. Funktionelle Verarbeitung der Stimulusdauer

Die Stimulusdauer spielt eine große Rolle in der Unterscheidung von komplexen akustischen Reizen, wie z.B. Kommunikationslauten. Dabei ist das Säugetiergehirn in der Lage, Stimuli ab einer Dauer von 2-3 ms zu analysieren (s. z.B. Mensch: Plomp, 1964; Chinchilla: Giraudi et al., 1980; Ratte: Ison, 1982; Katze: Eggermont, 1995; Frettchen: Kelly et al., 1996; Maus: Walton et al., 1997; Wüstenrennmaus: Wagner et al., 2003). Wo diese Analyse, also die Identifikation, Unterscheidung und Kategorisierung von Stimulusdauern, jedoch genau stattfindet, und ob es sich hierbei um eine lateralisierte Verarbeitung handelt, ist bis heute viel diskutiert und umstritten, wie im Folgenden gezeigt wird (s. vgl. Review Scott und McGettigan, 2013).

Betrachtet man als erstes die Ergebnisse aus Tierstudien, zeigt sich ein vermeintlich klares Bild. So konnte bei der Wüstenrennmaus nach Läsion des linken AC eine starke Beeinträchtigung der Unterscheidungsfähigkeit von Pausen gezeigt werden (s. Wetzel et al., 2008). Für die Ratte wurde ein ähnlicher Effekt für die Detektion von Pausen nach Läsion des linken AC gezeigt, der auch noch mindestens einen Monat nach der Läsion anhielt (s. Bowen et al., 2003). Auch in einem reinen Verhaltensversuch zeigte sich eine rechte EA in den Latenzzeiten, allerdings verringerte sich die Effektstärke mit steigender Anzahl der Trainingsdurchläufe der Tiere (s. Fitch et al., 1993). Die Studie von Rybalko et al. (2010) konnte weiterhin zeigen, dass nach einer Läsion des linken AC der Ratte zwar die Unterscheidungsfähigkeit von verschiedenen Stimulusdauern und der Wiederholungsrate stark beeinträchtigt war, die reine Detektion dieser jedoch keinen lateralisierten Effekt aufwies.

Bei menschlichen Probanden wurden in einer Vielzahl von Studien mit verschiedenen Parametern und Stimuludauern sehr unterschiedliche Effekte erzielt. So zeigte sich bei Patienten, die unter einer Läsion von superioren Teilen des Temporallappens litten, eine Beeinträchtigung in der Wahrnehmung von kurzen Stimuli (Dauer: < 14 ms) durch Anstieg der RTs, wenn der Stimulus auf der zur Läsion *kontralateralen* Seite präsentiert wurde (s. Karasseva, 1972). Die Seite der Läsion spielte dabei jedoch keine signifikante Rolle. Im Gegensatz dazu konnte in der Studie von Ilvonen et al. (2001) mit Patienten nach einem linksseitigen Schlaganfall gezeigt werden, dass diese deutlich höhere Fehlerraten in der Detektion von Stimulusdauern (25–75 ms) aufwiesen als die Kontrollgruppe. In den Studien von Heimrath et al. (2014) und Heimrath et al. (2015) wurde mittels *passive-listening* gezeigt, dass durch eine elektrische Stimulation über dem linken AC eine signifikante Aktivitätserhöhung bei der Präsentation von Stimulusdauern von 75±50 ms erfolgt.

Alleine mittels *passive-listening* und bildgebender Verfahren wurde bei gesunden Versuchspersonen eine erhöhte Aktivität in verschiedenen Bereichen des AC in der linken Hemisphäre gezeigt (Dauer: 21–667 ms; s. Zatorre und Belin, 2001; Jamison et al., 2006). In der Studie von Belin et al. (1998a) war eine linkslastige Lateralisierung durch eine verringerte Aktivität im rechten AC für kurze Stimulusübergänge (Dauer: 40 ms) zu erkennen, für längere Stimulusübergänge (Dauer: 200 ms) zeigte sich dort dagegen eine symmetrische bilaterale Aktivität im AC. Eine erhöhte Aktivität in der rechten Hemisphäre oder auch, abhängig von dem betrachteten Unterbereich des AC, in beiden Hemisphären wurde in der Studie von Schall et al. (2003) gezeigt (Dauer: 50 ms und 100 ms). Diese bilaterale Aktivierung konnte ebenfalls sowohl in Messungen mit Fokus auf den AC (Dauer: 204 ms und 356 ms; s. Inouchi et al., 2002), als auch für Bereiche außerhalb des AC gezeigt werden (Dauer: 50 ms und 100 ms; s. Molholm et al., 2005).

Zusammenfassend konnte in Studien an Patienten und gesunden Versuchspersonen oftmals eine Erhöhung der Aktivität in der linken Hemisphäre bzw. im AC der linken Hemisphäre bei der Präsentation von verschiedenen Stimulusdauern gezeigt werden. In anderen Studien finden sich aber auch Hinweise auf eine bilaterale Verarbeitung.

In rein psychophysischen *dichotic-listening*-Experimenten zur Unterscheidung der Stimulusdauer konnte teilweise eine linke EA anhand von schnelleren RTs (Dauer: 50–400 ms; s. Buchtel et al., 1978) gezeigt werden. In anderen Studien wiederum wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Hemisphären gefunden (Dauer: 67–120 ms; s. Mills und Rollman, 1979; Dauer: 300–900 ms; s. List und Justus, 2007) und in wieder anderen Untersuchungen sogar eine rechte EA, in diesem Fall für den Vergleich verschiedener Stimulusdauern (350–650 ms; s. Brancucci et al., 2008; < 50 ms; s. Mills und Rollman, 1979).

In der Kombination von bildgebenden Verfahren mit psychophysischen Experimenten zeigte sich in den Studien von Belin et al. (2002) und Nenadic et al. (2003) eine vorrangig rechtsseitige Lateralisierung für die Detektion und Unterscheidung von Stimulusdauern (300 ms und 1.000–1.400 ms). Eine eindeutige linke EA für die Unterscheidung von Stimulusdauern sowie eine erhöhte Aktivität während *passive-listening* für Töne, die auf dem linken Ohr präsentiert wurden, konnte für Stimulusdauern von 115–160 ms gezeigt werden (s. De Sanctis et al., 2009). In der Studie von Angenstein und Brechmann (2013a) dagegen konnte kein signifikanter Unterschied für die Unterscheidung der Stimulusdauer (400 ms und 600 ms) in der Aktivierung beider Hemisphären gezeigt werden. Tregellas et al. (2006) und Brechmann und Scheich (2005) wiederum wiesen in ihren Studien eine erhöhte Aktivität im linken AC für die Unterscheidung der Stimulusdauer (70–330 ms und 400–600 ms) nach.

Auch in der Studie von Angenstein und Brechmann (2017) konnte eine linksseitige Lateralisierung für das Unterscheiden und Vergleichen von Stimulusdauern (350–600 ms) gezeigt werden. Die Fehlerraten sowie die kortikale Aktivierung, sowohl des AC als auch von Regionen außerhalb des AC, waren für das Vergleichsexperiment jedoch wesentlich höher als für das Unterscheidungsexperiment.

Insgesamt zeigt sich auch hier ein kontroverses Bild. So konnte in verschiedenen Studien sowohl eine linksseite als auch rechtsseite oder auch gar keine Lateralisierung für die Unterscheidung verschiedener Stimulusdauern gezeigt werden.

Indessen gibt es Hinweise darauf, dass die bisher aufgezeigten Lateralisierungen nicht unbedingt nur von der Stimulusdauer selbst, sondern auch von anderen Faktoren, wie z.B. der Aufgabenstellung, hervorgerufen werden können. So war in der Studie von Reiterer et al. (2005) zwar eine erhöhte Aktivität im linken Temporallappen zu beobachten, dies traf jedoch sowohl für die Unterscheidung der Stimulusdauer als auch der Tonhöhe zu. Des Weiteren konnte eine erhöhte Aktivierung des rechten Temporallappens mit einer erhöhten Präzision der Stimulusdiskriminierung für beide Versuche verbunden werden.

Dass eine Verschiebung der Lateralisierung bereits durch eine veränderte Stimulusdauer erfolgen kann, zeigte die Studie von Boemio et al. (2005) mittels *passive-listening*. Dort wurde, bezugnehmend auf die Theorie von Poeppel (2003; *asymmetric-sampling-theory*; s. auch Mills und Rollman, 1979) für nicht primäre AC-Regionen gezeigt, dass kurze Stimulusdauern (25–50 ms; vgl. Poeppel, 2003: 20–50 ms) im linken und lange Stimulusdauern (200–300 ms; vgl. Poeppel, 2003: 150–250 ms) im rechten *Sulcus temporalis superior* verarbeitet werden.

4. Funktionelle Verarbeitung von frequenzmodulierten Stimuli

Möchte man einfache akustische Stimuli, die sich durch das Zusammenwirken mehrerer Reizparameter auszeichnen, näher betrachten und deren Lateralisierung untersuchen, bieten sich frequenzmodulierte Stimuli (FM-Stimuli) an. Verwendet werden dabei meist einfach-frequenzmodulierte Reize, deren Frequenz sich über die Stimulusdauer hinweg kontinuierlich in eine Richtung ändert. So werden FM-Stimuli mit ansteigendem Frequenzgang als aufwärts- und solche mit absteigendem Frequenzgang als abwärts-moduliert bezeichnet. Die Modulationsrate gibt dabei die Frequenzänderung pro Zeiteinheit an.

Eine unterschiedliche Modulationsrichtung und -rate spielt besonders in der Wahrnehmung von arteigenen Kommunikationslauten (s. z.B. Primaten: Winter et al., 1966; Moody et al., 1986; Katze: Brown et al., 1978; Ratte: Kaltwasser, 1990), wie auch der menschlichen Sprache (s. z.B. Delattre et al., 1955; Libermann und Mattingly, 1989; Luo et al., 2007) eine essentielle Rolle. So sind sowohl viele verschiedene Tierarten (s. z.B. Katze: Kelly und Whitfield, 1971; Wüstenrennmaus: Wetzel et al., 1998a; Ohl et al., 2001; Ratte: Mercado et al., 2005; Gaese et al., 2006) als auch Menschen (s. Review Altmann und Gaese, 2014) grundsätzlich in der Lage, FM-Stimuli aufgrund ihrer Modulationsrate und -richtung klar zu unterscheiden und kategorisieren.

Weiterführend dazu konnte in Untersuchungen an Tieren gezeigt werden, dass die Verarbeitung dieser Parameter zu einem hohen Anteil vom AC geleistet wird (s. z.B. Katze: Whitfield und Evans, 1965; Heil et al., 1992; Tian und Rauschecker, 1998; Frettchen: Shamma et al., 1993; Kowalski et al., 1995; Nelken und Versnel, 2000; Ratte: Gaese und Ostwald, 1995; Ricketts et al., 1998; Zhang et al., 2003; Wüstenrennmaus: Ohl et al., 2000; Ohl et al., 2001; Affe: Liang et al., 2002; Godey et al., 2005). Mittels bildgebender Verfahren konnte auch beim Menschen eine Verarbeitung von FM-Stimuli im AC (s. z.B. Mäkelä et al., 1987; Pardo und Sams, 1993; Weisz et al., 2004) gezeigt werden. Bei genauerer Analyse sind daran verschiedene Bereiche des sekundären AC, wie das *Planum temporale* und der dorsolaterale STG (s. Binder, 2000), oder auch der HG und *Sulcus temporalis superior* (s. Hall et al., 2002) beteiligt.

Dabei wurde in der Literatur immer wieder gezeigt, dass FM-Stimuli lateralisiert verarbeitet werden. Für die Verarbeitung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli wurde in Studien z.B. in Ratten (s. Rybalko et al., 2006) und Wüstenrennmäusen (s. Wetzel et al., 1998b; Wetzel et al., 2008) eine starke Beeinträchtigung der Unterscheidungsleistung nach Läsion des rechten AC gezeigt. Zusätzlich zeigte die Studie von Wetzel et al. (1998b), dass auch das Erlernen der Unterscheidung von Modulationsrichtungen in der rechten Hemisphäre lokalisiert ist.

Beim Menschen weisen auch eine Vielzahl an Studien mit bildgebenden Verfahren auf eine erhöhte Aktivität im rechten (posterioren) AC für das Erkennen und Unterscheiden der Modulationsrichtungen von FM-Stimuli hin (s. z.B. Poeppel, 2004; Brechmann und Scheich, 2005; Behne et al., 2005; Grimm et al., 2006; König et al., 2008). Jedoch gibt es auch hier Studien mit konträren Ergebnissen, wie z.B. die Studie von Hsieh et al. (2012). Dort konnte sowohl eine erhöhte Aktivität des rechten primären AC als auch der linken anterioren Region des STG für die Unterscheidung von Modulationsrichtungen gezeigt werden. Für das sequentielle Vergleichen von FM-Stimuli zeigte die Studie von Angenstein und Brechmann (2013b) wiederum, dass die ACs beider Hemisphären in diesen Prozess involviert sind.

5. Funktionelle Verarbeitung von menschlicher Sprache

Um die funktionelle Verarbeitung von hochkomplexen Stimuli zu untersuchen, wird häufig menschliche Sprache verwendet. Diese lässt sich dabei grundsätzlich in Sätze, die wiederum aus einzelnen Wörtern bestehen, aufteilen. Einzelne Wörter bestehen, grammatikalisch bzw. linguistisch gesehen, aus einer oder mehreren Silben, welche die kleinste Lautgruppe im natürlichen Sprechfluss darstellen. Das bedeutet, dass sie sich in einem Zug aussprechen lassen und somit eine Sprechereinheit bilden. Jede Silbe setzt sich dabei aus verschiedenen Lauten (Phonemen) zusammen. Sie gelten als die kleinste bedeutungsunterscheidende Einheit der Sprache. Phoneme wiederum bestehen aus einer variablen Anzahl von Konsonanten und Vokalen (s. z.B. Goldstein, 2015). Auf dieser Grundlage stellt sich grundsätzlich die Frage, ob Sprache in ihren einzelnen Komponenten temporal und spektral aufgelöst analysiert und verarbeitet wird, oder ob es zu einer (Objekt-)erkennung ganzer Worte/Wortteile kommt und auch in wieweit diese Verarbeitung dann lateralisiert stattfindet.

5.1. Lateralisierte Verarbeitung von menschlicher Sprache

In ganz unterschiedlichen Tierarten, wie z.B. Mäusen (s. z.B. Ehret, 1987), Seelöwen (s. z.B. Böye et al., 2005), Hunden (s. z.B. Siniscalchi et al., 2008) und auch Vögeln (s. z.B. Voss et al., 2007; van Ruijssevelt et al., 2017), wurde eine starke Beteiligung der linken Hemisphäre bei der Verarbeitung arteigener Kommunikationslaute gezeigt. Bei verschiedenen Affenarten konnte dies sowohl mittels rechter EA in Verhaltensversuchen (s. z.B. Petersen et al., 1978; Hauser und Andersson, 1994; Gil-da-Costa und Hauser, 2006) als auch durch Beeinträchtigungen nach Läsion des linken STG (s. z.B. Heffner und Heffner, 1984) bzw. des AC (s. z.B. Heffner und Heffner, 1986) oder auch in einer erhöhten Aktivität im linken STG in bildgebenden Verfahren (s. z.B. Poremba et al., 2004) nachgewiesen werden.

Dass auch die Sprachverarbeitung im Menschen vorrangig in der linken Hemisphäre erfolgt, wurde schon früh von Broca (1865) und Wernicke (1874) postuliert. Diese untersuchten in *post mortem* Studien Patienten, die an unterschiedlichen Arten von Aphasien (Störungen in der Sprachverarbeitung) gelitten hatten und stellten Zusammenhänge zu geschädigten Gehirnregionen her. So spricht man von einer Wernicke-Aphasie, wenn funktionelle Probleme beim Verstehen von Sprache sowie der Wort- und Phonemwahl auftreten, was nach einer Verletzung des Wernicke-Areals auftritt. Äquivalent dazu wird von einer Broca-Aphasie gesprochen, wenn die Produktion der Sprache sowie die grammatikalische Verarbeitung gestört ist, die nach einer Verletzung des Broca-Areals auftritt.

Auch viele weiterführende Studien an Patienten, deren linke Hemisphäre bzw. die für die Sprache domiante Hemisphäre geschädigt oder mittels intrakarotidaler Amobarbital-Injektion (Wada-Test; s. Wada und Rasmussen, 1960) zeitlich begrenzt inaktiviert wurde, zeigten starke Beeinträchtigungen, z.B. in der Sprachproduktion (s. z.B. Wada und Rasmussen, 1960; Curry, 1968; Michel et al., 1984) oder in *dichotic-listening*-Tests mit Sprachstimuli (s. z.B. Kimura, 1961b; Berlin et al., 1972; Zurif und Ramier, 1972). Auch in Studien mit gesunden Versuchspersonen zeigte sich mit verschiedenen Arten von Sprachstimuli, z.B. Wörtern oder Phonemen, in reinen *dichotic-listening*-Experimenten eine klare rechte EA, was auf eine starke Beteiligung der linken Hemisphäre hinweist (s. z.B. Bryden, 1963; Dirks, 1964). Allerdings zeigte die Studie von Schwartz und Tallal (1980), dass sich eine rechte EA durch die Reduzierung der Rate der zeitlichen Veränderung verringern bzw. neutralisieren kann.

In vielen Studien mit bildgebenden Verfahren wurde ebenfalls eine erhöhte Aktivität in der linken Hemisphäre für die Verarbeitung von Sprachstimuli gezeigt. Die dabei aktivierten Regionen können sowohl innerhalb (s. z.B. Petersen et al., 1988; Démonet et al., 1992; Scott, 2000) als auch außerhalb (s. z.B. Démonet et al., 1992; Zatorre et al., 1992; Binder et al., 1997) des AC liegen. Zudem sind aber auch eine Reihe an Studien bekannt, die eine beidseitige Aktivierung für die Verarbeitung von Sprachstimuli zeigen (s. z.B. O'Leary et al., 1996; Okada und Hickok, 2006; Myers und Blumstein, 2008).

Aufbauend auf einer Vielzahl von Studien haben Hickok und Poeppel (s. Hickok und Poeppel, 2000, 2004, 2007, 2015) eine allgemeine Theorie der Sprachverarbeitung entwickelt (s. Abbildung 2):

Eine erste Analyse der spektro-temporalen Parameter von Sprachsignalen erfolgt im dorsalen STG, eine Analyse der phonologischen Parameter im posterioren *Sulcus temporalis superior*. Beide Prozesse sind bilateral verankert. Anschließend werden die Signale in einer dorsalen und einer ventralen Bahn weiter verarbeitet.

Die ventrale Bahn ist dabei für das Sprachverstehen zuständig und vorrangig bilateral organisiert, jedoch mit einer leichten linkslastigen Tendenz. Sie umfasst vor allem Strukturen im posterioren, medialen und inferioren Teil des Temporallappens, bzw. Bereiche des *Gyrus temporalis medius* und *Sulcus temporalis inferior*. Dabei verarbeiten posteriore Bereiche vor allem lexikale Inhalte, bzw. verknüpfen phonologische und semantische Informationen, während anteriore Bereiche als kombinatorisches Netzwerk gelten.

Die dorsale Bahn dagegen ist vor allem für die Sprachproduktion von Bedeutung und weist eine starke linksseitige Lateralisierung auf. Der posteriore Teil umfasst dabei Strukturen an der parietalen-temporalen Grenze der Sylvischen Fissur (*Sulcus lateris*) und gilt als sensimotorische Schnittstelle. Der anteriore Teil hingegen umfasst Bereiche des anterioren *Lobus frontalis*, bzw. Bereiche des posterioren *Gyrus frontalis inferior* und des *prämotorischen Cortex* und ist Teil des artikulatorischen Netzwerkes.

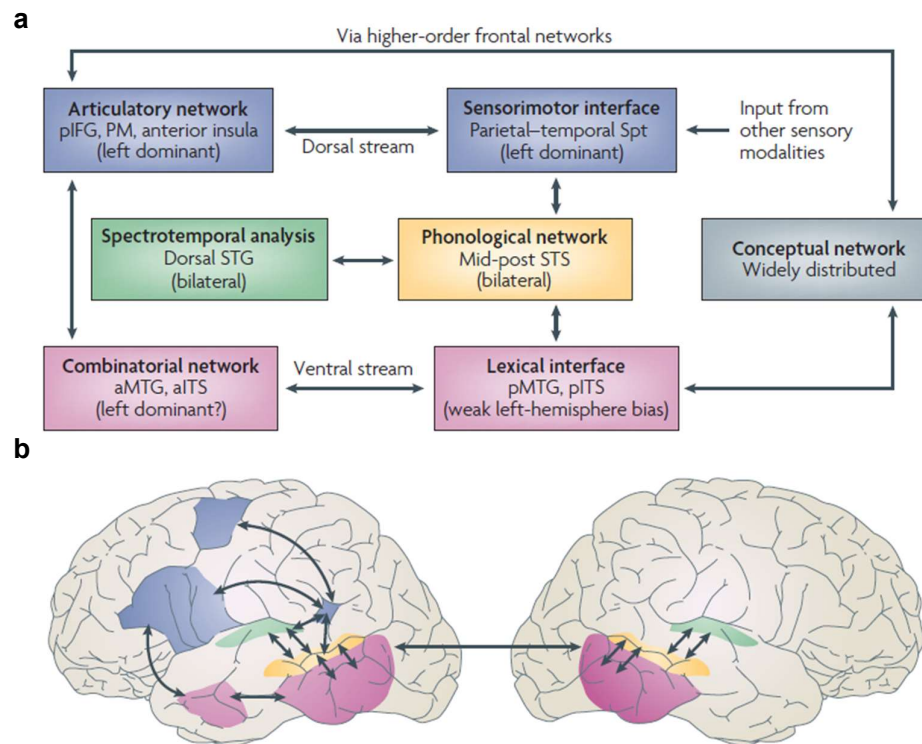


Abbildung 2: Darstellung der allgemeinen Sprachverarbeitung beim Menschen.
 (a) Schema der Verarbeitungsstationen der menschlichen Sprachverarbeitung im Gehirn.
 (b) Darstellung der an der menschlichen Sprachverarbeitung beteiligten Gehirnareale (linke und rechte Hemisphäre). Als erste Verarbeitungsstationen sind in grün der dorsale STG und in gelb der posteriore STG gezeigt. In violett sind die Bereiche der ventralen Bahn (posteriore und anteriore Bereiche des *Gyrus temporalis medius* (pMTG/aMTG) und *Sulcus temporalis inferior* (pITS/aITS)) und in blau die Bereiche der dorsalen Bahn (Bereiche an der parietalen-temporalen Grenze der Sylvischen Fissur (Spt), des posterioreren *Gyrus frontalis inferior* (pIFG) und des *prämotorischen Cortex* (PM)) dargestellt. Quelle: Hickok und Poeppel (2007).

5.2. Funktionelle Verarbeitung von (Konsonant-Vokal-)Silben

Um zu untersuchen, in wieweit Sprache vom Gehirn entweder anhand ihrer spektrotemporalen Charakteristika oder aber als ganzes Objekt wahrgenommen und analysiert wird, fokussiert man sich am ehesten auf die Untersuchung einzelner (kleiner bzw. weniger komplexer) Einheiten von Sprache wie Konsonant-Vokal-Silben (*consonant-vowel syllables*, CV-Silben). Auditorisch gesehen bestehen Silben dabei grundsätzlich aus harmonisch aufgebauten Transienten und tonalen Formanten, wobei letztere, linguistisch gesehen, als Vokale wahrgenommen werden. Transienten hingegen sind für die Unterscheidung von ähnlich klingenden Silben mit gleichem Vokal, wie z.B. „da“ und „ga“, durch eine unterschiedliche FM-Komponente von hoher Bedeutung (s. z.B. Harris et al., 1958; Libermann und Mattingly, 1989). So ist die Transiente des dritten Formanten bei „da“ ein abwärts-modulierter, bei „ga“ hingegen ein aufwärtsmodulierter FM-Stimulus. Weiterhin ist auch die Vokaleinsatzzeit (*voice onset time*, VOT) nach einem Konsonanten für die Unterscheidung von verschiedenen Silben entscheidend. Diese beschreibt die zeitliche Verzögerung zwischen dem Einsetzen eines Lautes und dem Beginn der Schwingung der Stimmbänder. Dabei werden „b“, „g“ und „d“ als stimmhafte Konsonanten mit einer kurzen VOT und „p“, „t“, und „k“ als stimmlose Konsonanten mit einer langen VOT charakterisiert.

Um eine mögliche Lateralisierung in der Verarbeitung von CV-Stimuli zu untersuchen, werden verschiedene Ansätze verfolgt. So konnte bei Patienten mit einer Schädigung der linken Hemisphäre eine Beeinträchtigung in der Unterscheidung von verschiedenen VOTs beobachtet werden (s. z.B. Oscar-Berman et al., 1975). Für die Identifizierung von einzelnen CV-Silben durch Patienten nach einer Durchtrennung des *Corpus callosum* (sog. „Split-Brain“-Patienten) wurde eine deutlich höhere Fehlerrate für die Präsentation des Stimulus auf dem linken Ohr gemessen (s. z.B. Springer et al., 1978). Allerdings zeigten sich nach Untersuchungen mittels Wada-Test keine Unterschiede beim Vergleichen von Konsonant-Vokal-Konsonant-Silben zwischen linker und rechter Hemisphäre (s. z.B. Boatman et al., 1998).

Betrachtet man *dichotic-listening*-Studien zur Identifikation und Unterscheidung von CV-Silben, lässt sich in einer Vielzahl von Fällen eine klare rechte EA erkennen, was auf eine starke Beteiligung der linken Hemisphäre hinweist (s. z.B. Shankweiler und Studdert-Kennedy, 1967; Studdert-Kennedy et al., 1972; Springer, 1973). Dabei konnte auch eine unterschiedlich starke Ausprägung der rechten EA zwischen CV-Silben mit kurzer und langer VOT (s. z.B. Shankweiler und Studdert-Kennedy, 1967; Studdert-Kennedy und Shankweiler, 1970; Bryden et al., 1983) und unterschiedlicher Dauer von Formantübergängen (s. z.B. Schwartz und Tallal, 1980; Dwyer et al., 1982) gezeigt werden. Durch systematische Messungen konnte in der Studie von Rimol et al. (2006) gezeigt werden, dass, je nach Kombination der CV-Silben entsprechend ihrer VOT, eine rechte oder auch eine linke EA erfolgen kann.

Mit Hilfe von bildgebenden Verfahren wurde in einer Vielzahl von Studien, sowohl mit *passive-listening* als auch *dichotic-listening*, die Lateralisierung von CV-Silben untersucht. Dabei wurde eine erhöhte Aktivität in der linken Hemisphäre allgemein (s. z.B. Ahonniska et al., 1993; Hugdahl et al., 1999; Mathiak et al., 2000) und speziell im AC (s. z.B. Alho et al., 1998; Zaehle et al., 2004; Stefanatos et al., 2008), bzw. dem posterioren STG (s. z.B. Zatorre et al., 1992; Celsis et al., 1999; Blumstein et al., 2005) und dem *Planum temporale* (s. z.B. Heiervang et al., 2000; Jäncke et al., 2002) gezeigt. Zudem konnte in einigen Studien eine zusätzliche bilaterale Aktivität im STG (s. z.B. Zatorre et al., 1992; Jäncke et al., 2002; Blumstein et al., 2005) gezeigt werden. Auch hier lassen sich Unterschiede in der Aktivierung bezüglich der VOT feststellen (s. z.B. Jäncke et al., 2002; Blumstein et al., 2005).

6. Zielsetzung der Arbeit

Das erste Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine rein psychophysische Methode zur Untersuchung der Lateralisierung von akustischen Stimuli am Menschen zu etablieren. Dadurch kann untersucht werden, in wie weit die Ergebnisse zur Lateralisierung aus Studien mit bildgebenden Verfahren (s. z.B. Behne et al., 2005; Angenstein und Brechmann, 2013a) verhaltensrelevant sind. Dabei wurde eine Variante des klassischen *dichotic-listening* verwendet, in der anstatt zwei Stimuli der gleichen Kategorie, wie z.B. Sprachstimuli, ein zu untersuchender Stimulus auf einem Ohr mit einem *kontralateralen* Rauschimpuls (*noise burst*, NB) auf dem anderen Ohr kombiniert wurde (s. z.B. Behne et al., 2005; Stefanatos et al., 2008). Anschließend wurden, wie in traditionellen *dichotic-listening*-Experimenten, die Fehlerraten und RTs beider Ohren, auf dem der zu untersuchende Stimulus präsentiert wurde, miteinander verglichen, um so auf eine mögliche Lateralisierung schließen zu können. Die Verwendung des NB diente hierbei als „Störstimulus“ für eine (*kontralaterale*) Hemisphäre, da er einerseits ein breites Frequenzspektrum abdeckt und andererseits als „neutraler“ Referenzstimulus gegen verschiedene andere Stimuli verwendet werden kann. Als Teststimuli wurden dagegen FM- und CV-Stimuli ausgewählt, da diese hinreichend komplexe Stimuli darstellen und auch über ein gewisses Frequenzspektrum verfügen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Versuchsreihen, die jeweils mit der Bestimmung des Punktes subjektiver Gleichheit (PSG) begannen. Im Anschluss daran folgten zwei bzw. drei Unterscheidungsexperimente mit *kontralateralem* Rauschen. Sowohl die PSG-Bestimmung als auch die Unterscheidungsexperimente gliederten sich in einzelne Messungen, die sich wiederum aus einzelnen Durchläufen zusammensetzen.

In der ersten Versuchsreihe wurde dabei die Verarbeitung von FM-Stimuli, sowohl hinsichtlich ihrer Modulationsrichtung (Experiment 1) als auch ihrer Stimulusdauer (Experiment 2), untersucht. Für die Unterscheidung von FM-Stimuli hinsichtlich ihrer Modulationsrichtung wurde aufgrund der aktuellen Studienlage eine linke EA erwartet (s. vergleichend Behne et al., 2005), was sich in geringeren RTs und Fehlerraten bei Präsentation des Stimulus auf dem linken Ohr zeigen könnte.

Mit der Untersuchung der Unterscheidung der Stimulusdauer von FM-Stimuli hingegen wurde eine wegen widersprüchlicher Ergebnisse zur Zeit offen diskutierte Frage einer Lateralisierung erstmals auf der Verhaltensebene überprüft. Aus der Literatur konnte dabei eine rechte EA aufgrund der gewählten Stimulusdauern von 400 ms und 600 ms (s. vergleichend Poeppel, 2003) oder auch eine fehlende Lateralisierung (s. vergleichend Behne et al., 2005) gleichermaßen erwartet werden.

In der zweiten Versuchsreihe wurde als Referenzmessung zu Beginn nochmals die Unterscheidung von Modulationsrichtungen von FM-Stimuli untersucht (Experiment 3). Es folgten Experimente zur Unterscheidung von verschiedenen CV-Silben (Experiment 4 und Experiment 5). Die allgemeinen Studien über die Verarbeitung von CV-Silben in der Literatur ließen hierbei eine rechte EA erwarten. Durch Auswahl der CV-Silben wurden Experimente für eine differenziertere Betrachtung möglich.

So wurde in Experiment 4 die Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ untersucht. Hierbei konnte einerseits, wie oben beschrieben, erwartet werden, dass diese Unterscheidung in die Kategorie „Sprache“ fällt und somit von der linken Hemisphäre getroffen wird, wodurch eine rechte EA zu erwarten wäre. Andererseits ist es auch möglich, dass diese Unterscheidung nicht auf Grundlage der Spacherkennung, sondern nur anhand der Frequenzmodulation getroffen wird. Entscheidend ist dabei, dass der Unterschied zwischen beiden CV-Silben, wie bereits oben näher erläutert, ausschließlich durch einen Unterschied in der FM-Komponente zustande kommt. Dementsprechend war äquivalent zu Experiment 3 dieser Versuchsreihe, eine linke EA zu erwarten.

In Experiment 5 wurde die Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ überprüft. Diese weisen keine Unterscheidung hinsichtlich ihrer FM-Komponente auf, weshalb zu erwarten war, dass diese als Sprache eingestuft und auf der linken Hemisphäre verarbeitet werden. Weiterhin wurde in der kombinierten Betrachtung des Experiments 4 und Experiments 5 untersucht, wie sich eine unterschiedliche VOT (Experiment 4 kurz, Experiment 5 lang) auf eine mögliche Lateralisierung auswirkt.

II. Material und Methoden

1. Versuchspersonen

Für die Psychophysikversuche wurden insgesamt 28 Versuchspersonen (10 männlich, 18 weiblich) im Alter von 20–35 Jahren gemessen. Alle Versuchspersonen waren rechtshändig (*Edinburgh Handedness Inventory*: 0,5–1; s. Oldfield, 1971). Aufgrund eigener Angaben wurden audiologische Beeinträchtigungen der Versuchspersonen ausgeschlossen.

2. Versuchsaufbau

Die Experimente der ersten Versuchsreihe fanden in Laborumgebung statt. Die zweite Versuchsreihe wurde in einer schallisolierten Kammer (Medical Research & Examination Chamber, Industrial Acoustic Company, LTD, Type 404-A) durchgeführt. Der weitere Versuchsaufbau (s. Abbildung 3) war für beide Versuchsreihen identisch und wurde zu Beginn und Ende jeder Versuchsreihe kalibriert. Alle Experimente waren in der eigenentwickelten Software „Sequence“ (Programmiersprache „C“, MS Windows) auf einem Computer implementiert. Die hier definierten Stimuli wurden vor jedem Durchlauf über USB zur Berechnung an das Signalprozessor-System (System 3, Tucker Davis Technologies (TDT), Alachua, USA) weitergeleitet. Anschließend wurden die im Signalprozessor (RP2.1, TDT System 3; Abtastrate: 48 kHz) berechneten Reize zu zwei programmierbaren Abschwächern (PA5, TDT System 3) weitergeleitet. Dort wurden die Schalldruckpegel für die rechte und linke Seite separat angepasst. Anschließend wurden die Stimuli über einen Kopfhörerverstärker (HB7, TDT System 3) und einen Kopfhörer (AKG K271 MKII, AKG Acoustics, Harman Deutschland GmbH, München, Deutschland) der Versuchsperson präsentiert. Die genaue zeitliche Steuerung erfolgte über eine digitale Ein-/Ausgabekarte (Digital I/O DT-340, Data Translation, Bietigheim, Deutschland; Genauigkeit: 0,1 ms). Damit wurde die Stimulusausgabe gesteuert und die über eine Handkonsole (Eigenbau) abgegebene Antwort der Versuchsperson von jedem Durchlauf registriert. Die zwei Tasten der Handkonsole waren mittig übereinander vor der Versuchsperson angeordnet (wie in Abbildung 3 dargestellt). Die Versuchspersonen wurden angewiesen, den Tastendruck immer mit dem rechten Daumen auszuführen. Je nach Aufgabenstellung waren die Tasten mit verschiedenen Bedeutungen belegt.

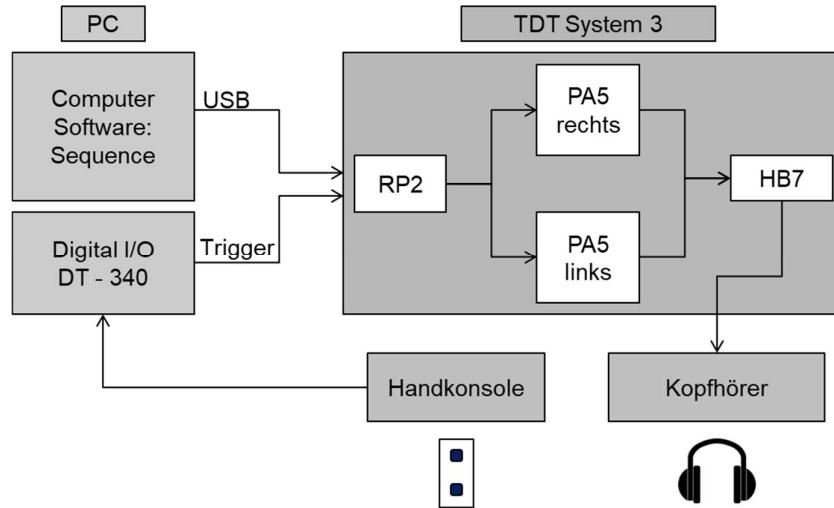


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Ein Computer mit interner digitaler Ein-/Ausgabe-Karte steuerte ein TDT System zur Generierung und Präsentation von Stimuli. Die Versuchspersonen bekamen akustische Stimuli über einen Kopfhörer präsentiert und teilten ihre Entscheidungen über eine Handkonsole mit, die mit dem Computersystem verbunden war.

Die FM- und NB-Stimuli wurden mit der Software „Real-time Processor Visual Design Studio“ (RPvdsEX Software, TDT, Alachua, USA) vordefiniert und im Signalprozessor bei Ausgabe berechnet. Die CV-Stimuli wurden mit der Software „Praat“ (Boersma, Paul & Weenink, David (2017), Version 6.0.302; Einstellungen: „language: German, voice variant: default, gap between words: 0.01, Pitch adjustment: 0, Pitch range: 50, words per minute: 100, IPA, sampling frequency: 48.828 Hz“) offline berechnet und am Beginn eines Experiments als wav-Dateien in das Signalprozessor-System eingelesen und im Experiment von dort direkt ausgegeben.

3. Psychophysikversuche

Allen Experimenten lag ein 2-AFC- (*two-alternative forced choice*) Antwortschema als Paradigma zugrunde. Das bedeutet, dass sich die Versuchsperson in jedem Durchlauf zwischen zwei Antwortmöglichkeiten (obere oder untere Taste der Handkonsole) entscheiden musste. Jeder Durchlauf startete dabei, je nach Versuch, mit der Präsentation von einem oder zwei Stimuli und endete, sobald eine Versuchsperson nach vollständiger Stimulus-Präsentation eine Taste drückte oder die maximale Antwortzeit überschritten war.

3.1. Ermittlung des Punktes subjektiver Gleichheit

Zu Beginn jeder Versuchsreihe wurde mit einer Reihe von Messungen der mögliche Unterschied in der Wahrnehmungsintensität für einzelne Stimuli zwischen rechtem und linkem Ohr untersucht. Dazu wurde bei jeder Versuchsperson der PSG (gleichbedeutend mit dem 50 %-Punkt einer psychometrischen Kurve) in Abhängigkeit des Schalldruckpegels bestimmt (s. Abbildung 4). In jeweils zwei aufeinander folgenden Messungen wurde dieser für jedes Ohr (links und rechts; zusammengefasst zu einem Messblock) und jede Stimuluskategorie (FM, NB, CV) in einem adaptiven 2-AFC-Paradigma ermittelt. Dafür musste die Versuchsperson in jedem Durchlauf innerhalb der Messung die Lautstärken von zwei aufeinander folgenden (gleichartigen) Stimuli vergleichen, wobei je ein Stimulus dem linken und rechten Ohr präsentiert wurde. Mittels Handkonsole wurde der als lauter wahrgenommene Stimulus über einen Druck auf die obere Taste (erster Stimulus im Durchlauf) bzw. untere Taste (zweiter Stimulus im Durchlauf) angezeigt.

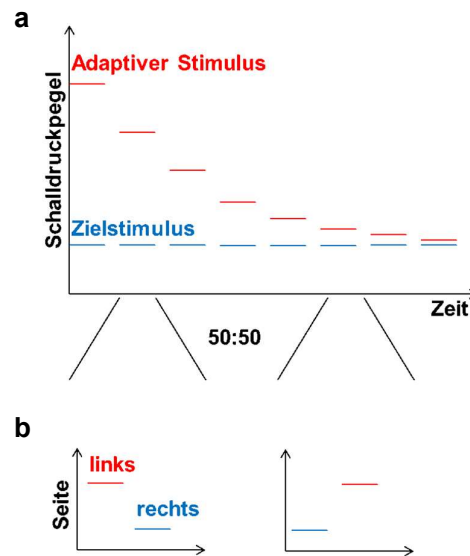


Abbildung 4: Schematischer Ablauf des adaptiven Verfahrens zur Ermittlung des PSG. (a) Adaptiver Vergleich der Lautstärken anhand eines fiktiven Beispiels. (b) Struktur der Einzeldurchläufe. In rot ist der adaptive Stimulus (variabler Schalldruckpegel für jeden Durchlauf) dargestellt. Der Zielstimulus (konstanter Schalldruckpegel) ist in blau dargestellt.

Dabei wurde ein konstant von einer Seite gespielter Zielstimulus mit gleichem Schalldruckpegel (40 dB SPL) mit einem auf der Gegenseite gespielten adaptiven Stimulus mit variablem Schalldruckpegel verglichen. Die Seite bzw. das Ohr, auf dem der jeweilige Stimulus gespielt wurde, war für jede Messung festgelegt (Zielstimulus rechts oder links), die Reihenfolge der Stimuli (erster oder zweiter Stimulus im Durchlauf) war in den Durchläufen der Messung zufallsverteilt. Jede Messung mit adaptivem Verfahren begann mit einem adaptiven Stimulus von 70 dB SPL in der ersten Versuchsreihe (Laborumgebung). Die Messung in einer schallisolierten Kammer am Beginn der zweiten Versuchsreihe wurde mit einem adaptiven Stimulus von 60 dB SPL begonnen. Für alle weiteren Durchläufe wurde der Schalldruckpegel des adaptiven Stimulus mittels stochastischer Approximation mit zunehmend reduzierter Schrittweite (s. Faes et al., 2007) je nach Antwort der Versuchsperson verändert, bis am Ende der PSG bestimmt werden konnte. Dafür wurde die Schrittweite bis zu einem Wert von 1 dB verringert. Ein Stimuluspaar aus adaptivem Stimulus und Zielstimulus wurde dabei automatisch maximal zehnmals hintereinander mit gleichem Stimuluspegel präsentiert, dann das Ergebnis als stabil gewertet.

Jeder Messblock, bei dem die Differenz der PSGs beider Seiten entweder über 5 dB war oder konträre Ergebnisse lieferte, konnte einmal wiederholt werden. Dies wurde insgesamt sechsmal angewendet.

Für die Kategorie „FM-Stimuli“ wurden linear aufwärts-modulierte FM-Stimuli mit einem Modulationsumfang von 0,5 Oktaven um eine Mittelfrequenz von 1.000 Hz oder 1.500 Hz (zufallsverteilt) verwendet. Für die Kategorie „NB-Stimuli“ wurde ein Breitbandrauschen (weißes Rauschen, Frequenzbereich: 60 Hz–16 kHz, durch Kopfhörerleistung begrenzt) verwendet. Die Stimulusdauer in beiden Kategorien betrug 400 ms (Flankendauer: 10 ms), das Interstimulusinterval 1.000 ms. Für die Kategorie der „CV-Stimuli“ wurde ein „ba“ mit einer Stimulusdauer von 382 ms generiert.

Die Stimuli in den nachfolgenden Unterscheidungsexperimenten wurden in binauraler Kombination präsentiert. Daher wurden die PSGs eines Messblocks einer Stimuluskategorie für jede Versuchsperson wie folgt miteinander verrechnet:

$$\frac{(\text{adaptiver Wert links} - \text{adaptiver Wert rechts})}{2} \quad [\text{dB}]$$

Der so errechnete PSG-Index stellte den mittleren Wahrnehmungsunterschied in „dB“ zwischen den beiden Ohren dar, wobei positive Werte auf sensitivere Wahrnehmung links und negative Werte auf sensitivere Wahrnehmung rechts hinweisen. Sobald dieser für eine Versuchsperson höher als 5 dB war, konnten die Schalldruckpegel für die folgenden Versuche individuell angepasst werden (s. vergleichend z.B. Brancucci et al., 2004; Della Penna et al., 2007).

3.2. Prinzip der Unterscheidungsexperimente bei *kontralateralem* Rauschen

In den Messungen der Unterscheidungsexperimente wurden immer ein FM- oder CV-Stimulus auf einem Ohr mit einem gleichzeitig abgespielten NB-Stimulus (weißes Rauschen, Frequenzbereich: 60 Hz–16 kHz, durch Kopfhörerleistung begrenzt) auf dem anderen Ohr kombiniert. Im folgenden Text beziehen sich die Angaben „links“ und „rechts“ immer auf das Ohr, auf dem der FM- oder CV-Stimulus präsentiert wurde.

Pro Experiment gab es drei bis sechs Messungen mit jeweils fünfzig Durchläufen. Am Ende eines jeden Durchlaufs hatte die Versuchsperson nach Präsentation der Stimuli 10 s Zeit, um über die Tasten der Handkonsole zu antworten. Das darauffolgende Interstimulusintervall betrug 1 s. Der Schalldruckpegel des NB-Stimulus lag für alle Messungen konstant bei 60 dB SPL. Der Schalldruckpegel der dazu *kontralateralen* Teststimuli (FM oder CV, je nach Experiment) blieb während einer Messung konstant. Jedoch wurden die Teststimuli im Regelfall innerhalb eines Experiments mit von Messung zu Messung absteigendem Schalldruckpegel präsentiert.

Dabei variierte die Anzahl der Messungen je nach Leistung der einzelnen Versuchsperson. Bei einer Fehlerrate von unter 10 % konnte die nachfolgende Messung mit dem nächst geringeren, d.h. schwierigeren, Schalldruckpegel des *kontralateralen* Teststimulus übersprungen werden. Bei einer Fehlerrate von über 40 % wurde die Folge von Messungen in diesem Experiment abgebrochen oder, in seltenen Fällen am Beginn eines Versuchs, eine Messung mit dem nächst höheren Schalldruckpegel durchgeführt.

3.3. Erste Versuchsreihe: Unterscheidung der Modulationsrichtung oder der Stimulusdauer von FM-Stimuli

Für die erste Versuchsreihe wurden 10 Versuchspersonen (4 männlich, 6 weiblich) im Alter von 21–35 Jahren (Durchschnitt: 26,7 Jahre) gemessen. Alle Versuchspersonen waren rechtshändig (*Edinburgh Handedness Inventory*: 0,5–1; Durchschnitt: 0,83).

In der ersten Versuchsreihe folgten auf die PSG-Bestimmung zwei Experimente, deren Abfolge für jede Versuchsperson zufällig bestimmt wurde. Die Aufgabenstellung in Experiment 1 war die Unterscheidung von FM-Stimuli hinsichtlich ihrer Modulationsrichtung (aufwärts: Antwort mit oberer Taste, abwärts: Antwort mit unterer Taste). In Experiment 2 mussten die Versuchspersonen dann die (gleichen) FM-Stimuli hinsichtlich ihrer Stimulusdauer unterscheiden (kurz: Antwort mit oberer Taste, lang: Antwort mit unterer Taste). Die FM-Stimuli in beiden Experimenten waren lineare FMs, die jeweils um eine zufällig ausgewählte Mittelfrequenz aus dem Bereich von 1.000–3.100 Hz (in Schritten von 100 Hz) moduliert wurde. Der Modulationsumfang berechnete sich aus (s. Behne et al., 2005):

$$\text{Modulationsumfang} = \text{Mittelfrequenz} \pm \text{Mittelfrequenz}/2 * \text{Dauer}$$

Die Flankendauer betrug 10 ms. Sowohl die Mittelfrequenz als auch die Modulationsrichtung des FM-Stimulus wurden vor jedem Durchlauf zufällig aus dem genannten Parameterbereich ausgewählt. Auch die Stimulusseite des FM-Stimulus (NB-Stimulus immer *kontralateral* dazu) wurde randomisiert bestimmt.

In Experiment 1 lag der Schalldruckpegel des FM-Stimulus für die erste Messung bei 20 dB SPL und für die folgenden Messungen bei 5–15 dB SPL (Schrittweite: 2,5 dB). Die Stimulusdauer betrug 400 ms (Verzögerungszeit: 400 ms) für den FM- und 600 ms (Verzögerungszeit: 200 ms) für den NB-Stimulus.

Bevor mit Experiment 2 begonnen wurde, absolvierten die Versuchspersonen eine Trainingsmessung. Dabei wurde die erfragte Klassifizierung der Stimulusdauer für den konkreten Fall in „kurz“ und „lang“ verinnerlicht. Dafür wurde sowohl die Stimulusdauer des FM-Stimulus als auch des NB-Stimulus gleichsam in einem Durchlauf auf 400 ms („kurz“) oder 600 ms („lang“) gesetzt. Der Schalldruckpegel des FM-Stimulus lag bei 20 dB SPL. Nach dieser Trainingsmessung wurde die Stimulusdauer des NB-Stimulus auf 800 ms (Verzögerungszeit: 200 ms) eingestellt, während die Stimulusdauer des FM-Stimulus auf 400 ms bzw. 600 ms (zufällige Verteilung, Verzögerungszeit: 400 ms) festgelegt wurde. Der Schalldruckpegel des FM-Stimulus lag für die erste Messung, abhängig von der Fehlerrate bei der Trainingsmessung, bei 20–40 dB SPL und für die folgenden Messungen kleiner werdend maximal bei 30 dB SPL bis minimal 5 dB SPL (Schrittweite: 5 dB im Bereich 25–20 dB SPL, bei noch kleineren Pegeln: 7,5 dB SPL, danach: 2,5 dB).

3.4. Zweite Versuchsreihe: Unterscheidung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli oder Unterscheidung von CV-Silben

Für die zweite Versuchsreihe wurden 23 Versuchspersonen (Experiment 3 und Experiment 4) bzw. 19 Versuchspersonen (Experiment 5; 7 männlich, 16 bzw. 12 weiblich) im Alter von 20–33 Jahren (Durchschnitt: 25,7 Jahre) gemessen. Alle Versuchspersonen waren rechtshändig (*Edinburgh Handedness Inventory*: 0,73–1; Durchschnitt: 0,93) und gaben Deutsch als Muttersprache an.

Als Experiment 3 wurde erneut die Unterscheidung von FM-Stimuli hinsichtlich ihrer Modulationsrichtung untersucht. Dabei entsprachen die Parameter denen von Experiment 1. Zusätzlich wurde eine neue Messung mit einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 5 dB SPL und des NB-Stimulus von 70 dB SPL angefügt, um den Schwierigkeitsgrad bei Bedarf zu erhöhen.

Die Aufgabe für die Versuchspersonen in Experiment 4 war die Unterscheidung der CV-Silben „da“ (Dauer: 633 ms, Antwort mit oberer Taste) und „ga“ (Dauer: 633 ms, Antwort mit unterer Taste; s. Abbildung 5a und 5b). Der Schalldruckpegel des CV-Stimulus lag für die erste Messung bei 55 dB SPL und für die folgenden Messungen bei 65–30 dB SPL (Schrittweite: 5 dB). Die Stimulusdauer des NB-Stimulus betrug 1.000 ms, die Verzögerungszeit 100 ms im Durchlauf. Die Verzögerungszeit des CV-Stimulus betrug dagegen 500 ms.

In Experiment 5 hatten die Versuchspersonen die Aufgabe die CV-Silben „ta“ (Dauer: 633 ms, Antwort mit oberer Taste) und „ka“ (Dauer: 633 ms, Antwort mit unterer Taste) zu unterscheiden (s. Abbildung 5c und 5d). Der Schalldruckpegel des CV-Stimulus lag für die erste Messung bei 55 dB SPL und für die folgenden Messungen zwischen 50 dB SPL und 25 dB SPL (Schrittweite: 5 dB). Auch in diesem Experiment betrug die Stimulusdauer des NB-Stimulus 1.000 ms, die Verzögerungszeit 100 ms. Die Verzögerungszeit des CV-Stimulus betrug 500 ms.

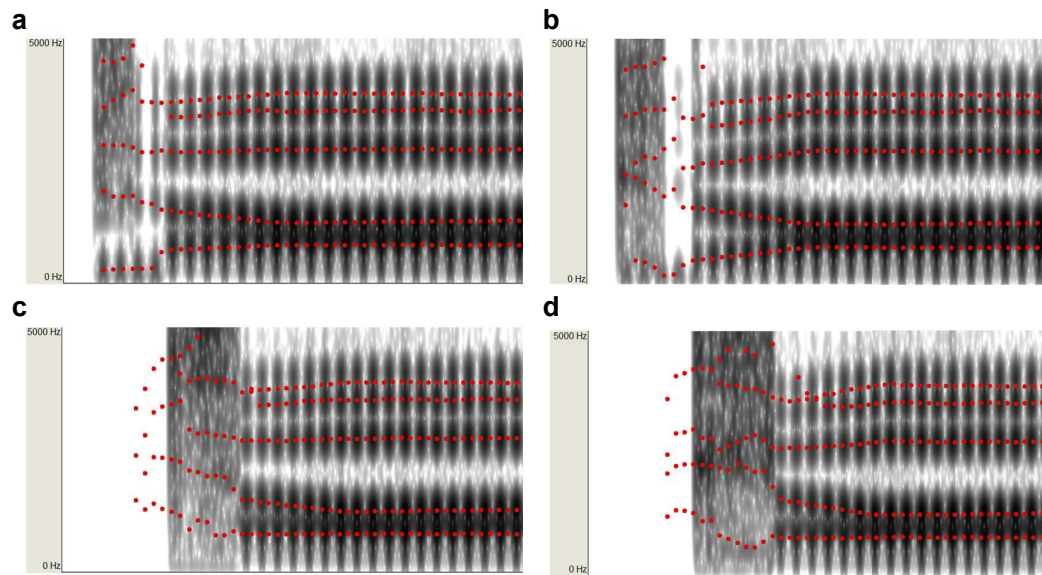


Abbildung 5: Spektrogramme der CV-Silben der zweiten Versuchsreihe. CV-Silben in Experiment 4 „da“ (a) und „ga“ (b). CV-Silben in Experiment 5 „ta“ (c) und „ka“ (d). Die roten Punkte zeigen den Verlauf der Formanten an.

4. Datenanalyse

Während der Experimente wurden vom Programm „Sequence“ von jeder Messung Dateien erstellt, in denen für jeden Durchlauf die Stimulusparameter sowie die gewählte Taste und RT der Antwort dokumentiert waren. Diese wurden mit einem selbstgeschriebenen Programm in Matlab (MathWorks, Natick, USA; Version R2017a) analysiert. Für jedes Experiment wurde, über alle Messungen und Versuchspersonen gemittelt, die prozentuale Verteilung der RTs aller korrekten Durchläufe (Hit-RTs) untersucht. Um den Schwierigkeitsgrad näher zu ermitteln, wurde daraus die Antwortgeschwindigkeit (inverse RT, [1/s]) berechnet.

Alle Datensätze wurden vor der weiteren Analyse auf ihre Normalverteilung hin untersucht (Kolmogorow-Smirnow-Lilliefors-Test). Im folgenden Text wird bei gemittelten Werten unterschieden, ob die Daten normalverteilt vorlagen oder nicht. Dabei wird von einer Normalverteilung der Daten als Standard ausgegangen und diese mit Mittelwert \pm Standardfehler angegeben. Auf Nicht-Normalverteilungen wird durch Angabe des Medians zusammen mit dem 25 %- und 75 %-Quartil (Q1/Q3) gesondert hingewiesen. Um nur bewusst getroffene Entscheidungen zu berücksichtigen, wurden nur RTs im Bereich von 50–5.000 ms analysiert (s. vergleichend z.B. Rinne et al., 1999).

Weiterhin wurde in allen Experimenten für jede Messung und Versuchsperson die Fehlerrate und die gemittelte Hit-RT immer für beide Ohr zusammen ermittelt. Über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg konnten somit die gemittelten Fehlerraten und Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels der zu unterscheidenden Teststimuli (FM/CV) bestimmt werden. Um die Unterschiede zwischen beiden Ohren zu untersuchen, wurden die Fehlerraten und Hit-RTs als Differenz der Werte für beide Ohren (rechts-links) für jeden Schalldruckpegel und jede Versuchsperson miteinander verglichen.

Damit die Daten der Versuchspersonen auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel gemittelt werden konnten, wurden in die anschließende Auswertung nur Messungen mit einer Fehlerrate unter 40,0 % (Unterscheidung deutlich über Zufallsniveau) analysiert. Die erste Messung wurde dabei nur dann analysiert, wenn kein „Lerneffekt“ (Fehlerrate erste Messung kleiner als Fehlerrate zweite/dritte Messung) zu erkennen war. Als Vergleichswert zwischen allen Versuchspersonen wurde der Schalldruckpegel der so definierten ersten Messung mit einer Fehlerrate von mindestens 15,0 % gewählt (15 %-Kriterium). Verglichen wurden die Fehlerraten und gemittelten Hit-RTs aller Versuchspersonen, einzeln sowie im Mittel, in Abhängigkeit der Seite (rechts/links) und des zu unterscheidenden Stimulus.

Bei Messungen mit FM-Stimuli wurden die gemittelten Fehlerraten und Hit-RTs aller Messungen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, in Abhängigkeit der Modulationsrichtung (auf-/abwärts) und der Dauer des FM-Stimulus (kurz/lang; nur bei Experiment 2) analysiert. Für die CV-Unterscheidungsexperimente wurden entsprechend die gemittelten Fehlerraten und Hit-RTs aller Messungen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, in Abhängigkeit des CV-Stimulus („da“/„ga“ bzw. „ta“/„ka“) analysiert.

Alle Werte der Hit-RTs wurden auf 1 ms genau, die Fehlerraten auf 0,1 % genau und die Werte der PSG-Berechnung auf 0,1 dB genau gerundet. Die statistische Auswertung erfolgte je nach Verteilung der Daten (Kolmogorow-Smirnow-Lilliefors-Test). Bei einer Normalverteilung wurde mit gepaartem T-Test bzw. 1-Faktor-ANOVA, bei einer Nicht-Normalverteilung mittels Wilcoxon-Paarvergleichstest bzw. Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede getestet. Mögliche weitere Zusammenhänge wurden mittels Pearson-Korrelation (parametrisch) oder Spearman-Korrelation (nicht-parametrisch) überprüft. Signifikanz wurde ab einem p-Wert von $p < 0,05$ angenommen. Sternchen markieren dabei in den Abbildungen die Signifikanzen mit folgender Bewertung: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

III. Ergebnisse

1. Erste Versuchsreihe (Modulationsrichtung und Stimulusdauer FM-Stimulus)

Die Experimente zur Modulationsrichtung und Stimulusdauer von FM-Stimuli wurden an 10 Versuchspersonen durchgeführt. Die Aufgabenstellung war dabei die Kategorisierung von FM-Stimuli hinsichtlich ihrer Modulationsrichtung (Experiment 1) und Stimulusdauer (Experiment 2).

1.1. Bestimmung des Punktes subjektiver Gleichheit (I)

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde der PSG für die Lautstärkewahrnehmung von FM- und NB-Stimuli für jedes Ohr ermittelt. Dabei wurde die Lautstärke des adaptiven Stimulus mit der konstanten Lautstärke des Zielstimulus verglichen und entsprechend der Schalldruckpegel angepasst.

Für die PSG-Bestimmung des FM-Stimulus benötigten die Versuchspersonen im Mittel 26 (Median; Q1: 25, Q3: 34; Bereich: 16–59) und für den NB-Stimulus im Mittel 36 (Median; Q1: 31, Q2: 48; Bereich: 22–91) Durchläufe (s. Abbildung 6).

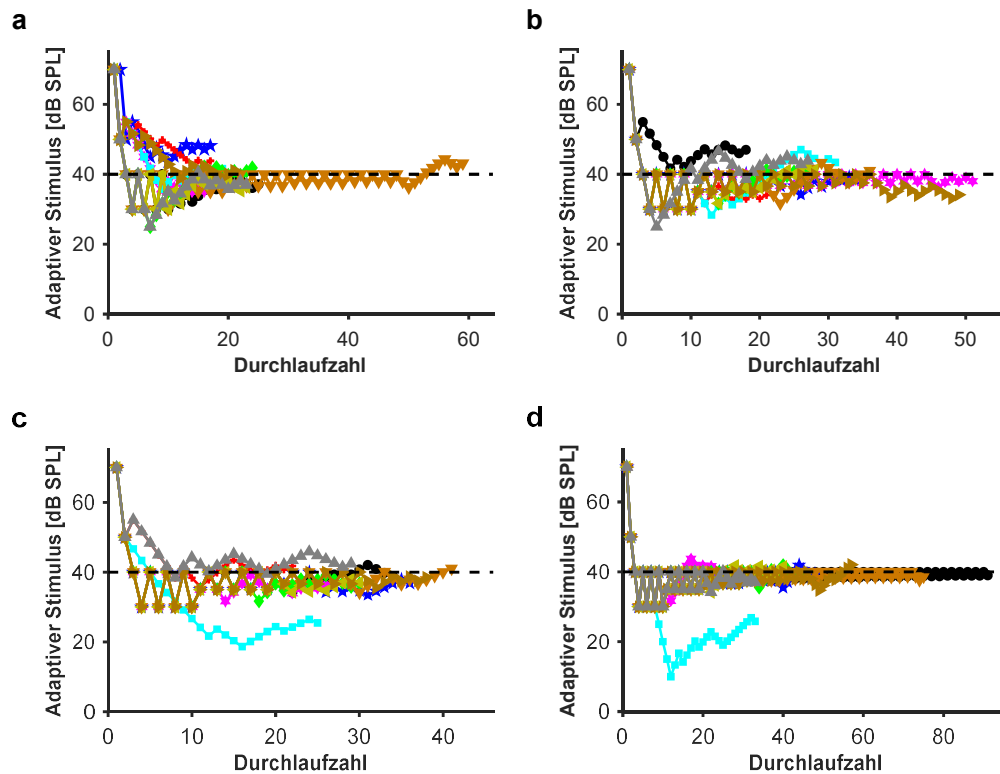


Abbildung 6: Bestimmung des PSG für die Wahrnehmung der Lautstärke des FM- und NB-Stimulus. Gezeigt sind die Einzelkurven aller zehn Versuchspersonen (verschiedene Farben und Symbole). Die gestrichelte Linie zeigt den Schalldruckpegel des Zielstimulus von 40 dB SPL an, der dem *kontralateralen* Ohr präsentiert wurde. Dargestellt sind die Kurven für (a) den FM-Stimulus auf dem rechten Ohr (Zielstimulus links), (b) den FM-Stimulus auf dem linken Ohr (Zielstimulus rechts), (c) den NB-Stimulus auf dem rechten Ohr (Zielstimulus links), (d) den NB-Stimulus auf dem linken Ohr (Zielstimulus rechts).

Der PSG selbst lag für Messungen mit dem FM-Stimulus im Mittel bei 40,9 dB SPL (Median; Q1: 38,8 dB SPL, Q3: 42,1 dB SPL; Bereich: 34,1–48,2 dB SPL) und für Messungen mit dem NB-Stimulus bei 39,1 dB SPL (Median; Q1: 38,1 dB SPL, Q3: 39,8 dB SPL; Bereich: 25,5–42,4 dB SPL). Für die PSG-Bestimmung des NB-Stimulus wurden die Einzelwerte der Versuchsperson 7283 (■; Zielstimulus links: 25,5 dB SPL, Zielstimulus rechts: 25,8 dB SPL) ausgenommen. Da die Versuchsvorrichtung vor und nach der Messung überprüft wurde und die PSG-Bestimmung des FM-Stimulus vorher ohne Auffälligkeiten verlief, wird angenommen, dass bei dieser Versuchsperson die Wahrnehmung des NB-Stimulus abweichend ist. Im weiteren Verlauf der Experimente kam es zu keinen weiteren auffälligen Messergebnissen.

Von den absoluten Schalldruckpegelwerten der PSG-Bestimmung wurden individuelle PSG-Indizes berechnet, mit denen ein Unterschied in der Wahrnehmung der Lautstärken zwischen linkem und rechtem Ohr deutlich gemacht werden kann. Die berechneten PSG-Indizes für den FM-Stimulus lagen im Mittel bei $0,2 \pm 1,1$ dB (Bereich: $-4,9$ – $5,0$ dB) und für den NB-Stimulus im Mittel bei $-0,4 \pm 0,5$ dB (Bereich: $-2,3$ – $2,7$ dB; s. Abbildung 7a). Somit lag der maximal wahrgenommene Unterschied der Lautstärke zwischen linkem und rechtem Ohr gerundet bei 5 dB für den FM- und 3 dB für den NB-Stimulus. Ein direkter Zusammenhang bei den PSG-Indizes zwischen den FM- und NB-Stimuli war nicht zu erkennen (Pearson-Korrelation: n.s.; s. Abbildung 7b).

Insgesamt überschritt keine der errechneten PSG-Indizes die gesetzte Grenze von 5 dB Wahrnehmungsunterschied zwischen linkem und rechtem Ohr. Deswegen, und da es keine systematische Messabweichung bei den Stimuli gab, musste keine Anpassung in den folgenden Versuchen vorgenommen werden.

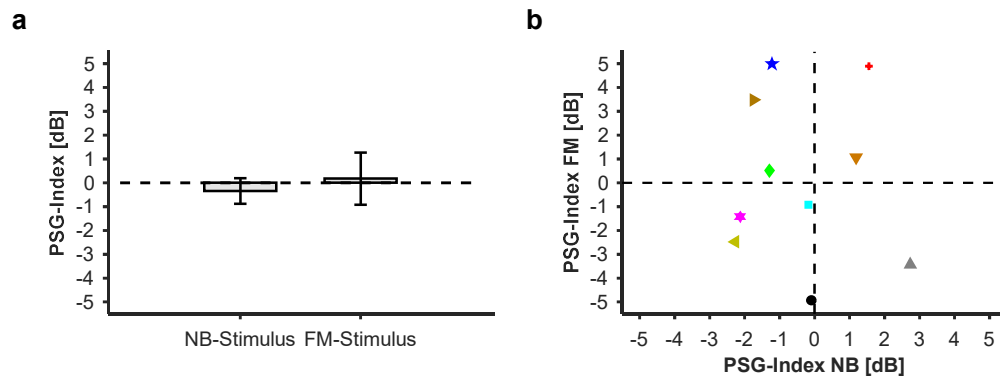


Abbildung 7: PSG-Indizes für Unterschiede in der Wahrnehmung von Lautstärke auf dem linken und rechten Ohr für den FM- und NB-Stimulus. (a) Vergleich der Mittelwerte ($n = 10$) der FM- und NB-Indizes ausgehend von 0 (gestrichelte Linie). (b) FM-Index in Abhängigkeit des NB-Index für jede Versuchsperson (verschiedene Farben und Symbole). Je negativer der Wert, desto weniger sensitiv ist das linke Ohr und umgekehrt.

Die RTs lagen für Messungen mit dem FM-Stimulus im Mittel bei 1.242 ms (Median; Q1: 944 ms, Q3: 1.816 ms; Bereich: 456–7.165 ms) und für Messungen mit dem NB-Stimulus im Mittel bei 1.226 ms (Median; Q1: 988 ms, Q3: 1.575 ms; Bereich: 430–7.044 ms).

Es konnte keine Abhängigkeit der PSG-Indizes des FM- und NB-Stimulus von Alter (1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Jedoch zeigten männliche Versuchspersonen signifikant höhere PSG-Indizes ($1,3 \pm 0,5$ dB) als weibliche Versuchspersonen ($-1,5 \pm 0,3$ dB; 1-Faktor-ANOVA: $F_{1,8} = 19,98$, $p = 0,0021$). Das bedeutet, dass im Mittel das linke Ohr bei weiblichen Versuchspersonen weniger sensitiv war als das rechte Ohr; bei männlichen Versuchspersonen war das Gegenteil der Fall.

1.2. Experiment 1: Modulationsrichtung FM-Stimulus (I)

1.2.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten

In Experiment 1, der Unterscheidung der Modulationsrichtung des FM-Stimulus, lag die Mehrheit (59,75 %) aller Hit-RTs, d.h. RTs in Durchläufen mit richtigen Antworten, über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 600 ms und 900 ms. Dies ergab eine mittlere Antwortschnelligkeit von $1,20 \cdot 10^{-3} \pm 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Bereich: $0,13 \cdot 10^{-3}$ – $2,70 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; s. Abbildung 8).

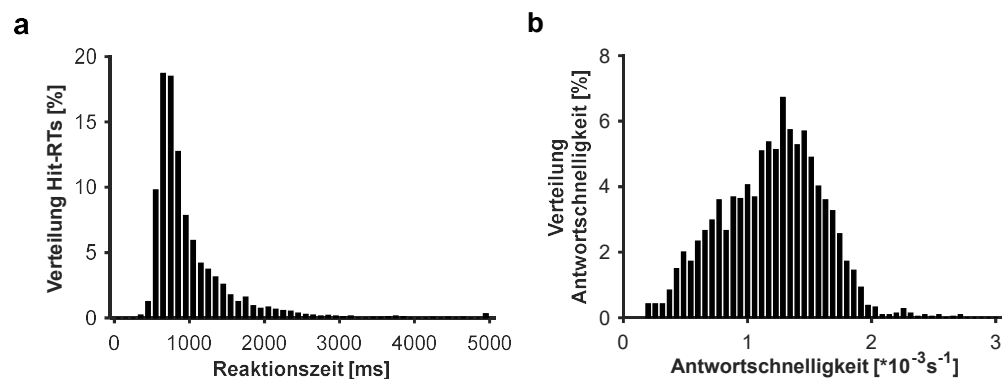


Abbildung 8: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 10) während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Prozentuale Verteilung der Hit-RTs. Hit-RTs < 50 ms werden unter „100“ und Hit-RTs > 5.000 ms unter „5.000“ auf der x-Achse zusammengefasst. (b) Prozentuale Verteilung der Antwortschnelligkeit der Hit-RTs. Antwortschnelligkeit < $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ wird unter „ $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ und Antwortschnelligkeit > $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ unter „ $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ auf der x-Achse zusammengefasst.

Betrachtet man alle Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus, lässt sich ein differenzierteres Bild erkennen. So lagen die medianen Hit-RTs über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 578 ms und 1.471 ms (s. Abbildung 9a), wobei die Einzelkurven unterschiedliche Verläufe aufwiesen. Im Mittel zeigte sich ein Trend steigender Hit-RTs mit sinkendem Schalldruckpegel des FM-Stimulus (Kruskal-Wallis-Test: $df = 5/46$, $\text{Chi}^2 = 10,45$, $p = 0,0635$; s. Abbildung 9b).

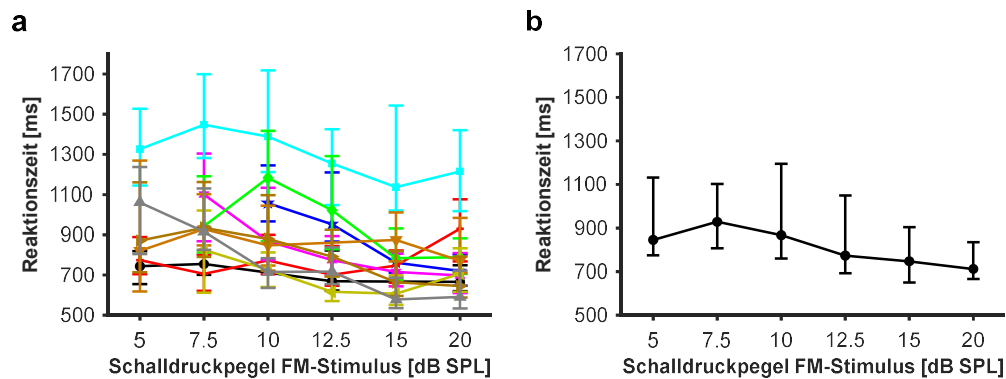


Abbildung 9: Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; n = 10) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus.

Die Fehlerraten aller Versuchspersonen stiegen grundsätzlich mit sinkendem Schalldruckpegel an (s. Abbildung 10a), zeigten jedoch zum Teil starke Unterschiede. Diese waren hauptsächlich bedingt durch eine Verschiebung der individuellen Kurven entlang der Schalldruckpegel des FM-Stimulus (s. Abbildung 10a). So war der allgemeine Verlauf einer steigenden Fehlerrate mit sinkendem Schalldruckpegel des FM-Stimulus auch der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen erkennbar (Kruskal-Wallis-Test: $df = 5/46$, $\chi^2 = 29,57$, $p = 1,80 \cdot 10^{-5}$; s. Abbildung 10b).

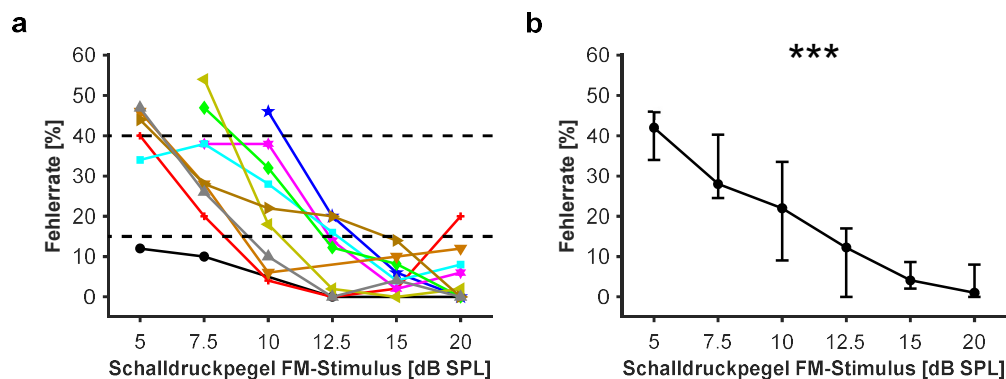


Abbildung 10: Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). Die obere gestrichelte Linie zeigt die 40 %-Schwelle und die untere gestrichelte Linie die 15 %-Schwelle an. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Grenzen wurden die Daten nicht weiter in Analysen einbezogen. (b) Mittlere Fehlerrate (Median; n = 10) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus.

Um eine mögliche lateralisierte Verarbeitung bei der Unterscheidung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli zu untersuchen, wurden die Fehlerraten und Hit-RTs in Abhängigkeit des Ohres, auf dem der FM-Stimulus präsentiert worden ist, ausgewertet. Betrachtet man die Differenz der Fehlerraten zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus, zeigte sich auch hier wieder eine hohe Streuung zwischen den einzelnen Versuchspersonen (Bereich: -14,2–40,4 %). Jedoch waren die Fehlerraten tendenziell höher, wenn der FM-Stimulus auf dem rechten Ohr präsentiert wurde (Differenzbetrag > 0), was auf eine linke EA hindeutet (s. Abbildung 11a). Auch in der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen zeigte sich eine Tendenz zu einer linken EA, jedoch gab es keine signifikante Änderung über den Verlauf der Schalldruckpegel des FM-Stimulus (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 11b).

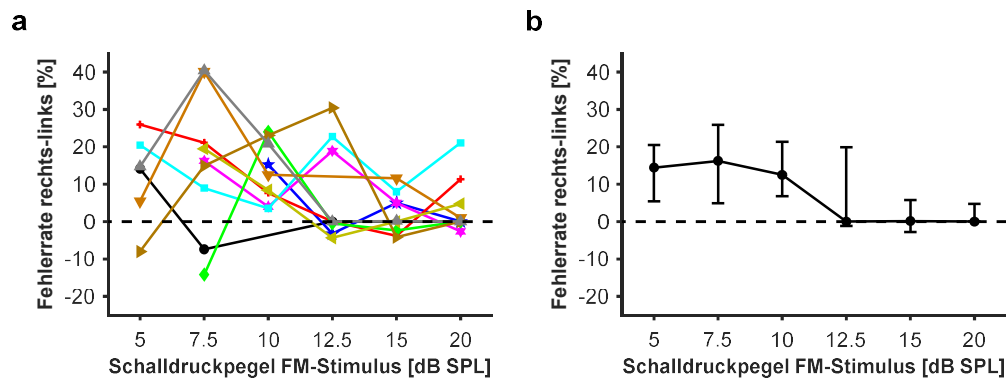


Abbildung 11: Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Fehlerrate (Median; n = 10) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Fehlerrate von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

Für die Differenz der medianen Hit-RTs zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus ließ sich allerdings weder in den Einzelkurven der Versuchspersonen (Bereich: -350–575 ms; s. Abbildung 12a) noch im Verlauf der medianen Hit-RTs ein klarer Vorteil eines Ohres erkennen (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 12b).

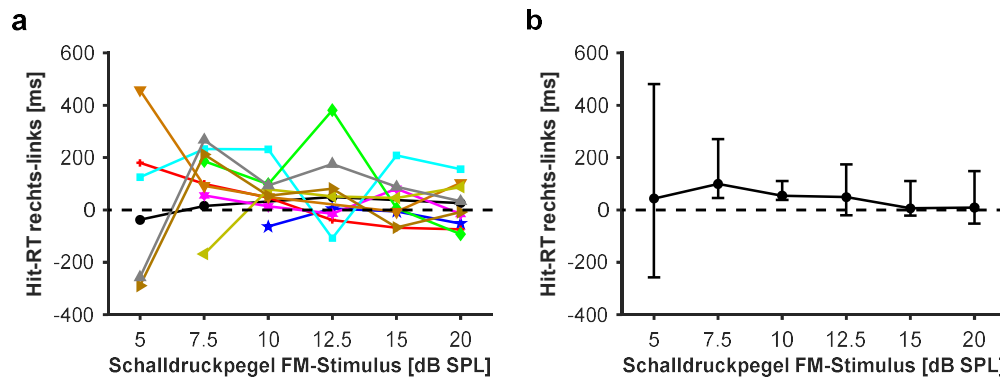


Abbildung 12: Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; n = 10) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

1.2.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Die Daten aller Versuchspersonen wurden auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel unter Anwendung des 15 %-Kriteriums analysiert. Von insgesamt 10 Versuchspersonen erreichten jeweils 3 das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 12,5 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $18,7 \pm 1,3$ %), von 10 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $29,3 \pm 5,9$ %) und von 7,5 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $24,7 \pm 2,4$ %). Eine Versuchsperson wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da hier die höchste gemessene Fehlerrate bei 12,0 % lag (s. Abbildung 10a). Die nun weiter analysierten Messungen von 9 Versuchspersonen hatten eine mittlere Fehlerrate von $24,2 \pm 2,3$ %.

Auch bei der Analyse der Daten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums fiel auf, dass die Fehlerraten, sowohl zwischen Versuchspersonen als auch im Vergleich zwischen den Ohren, variierten. 8 von 9 Versuchspersonen zeigten jedoch konsistent höhere Fehlerraten für eine Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten, im Vergleich zum linken Ohr (s. Abbildung 13a). Ebenfalls zeigten die gemittelten Fehlerraten aller Versuchspersonen im Vergleich zwischen den Ohren (s. Abbildung 13b), dass die Fehlerrate für die Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten Ohr ($34,7 \pm 3,5$ %) signifikant höher war als auf dem linken ($13,8 \pm 3,6$ %; T-Test: $n = 9$, $T = 4,09$, $p = 0,0035$).

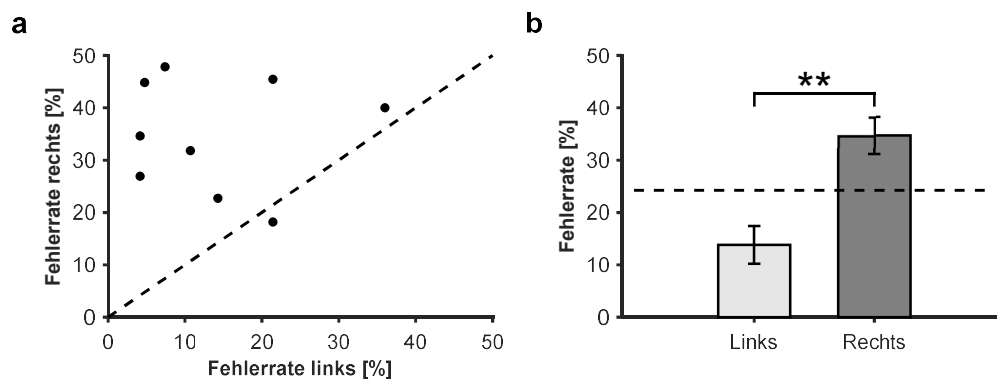


Abbildung 13: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle Fehlerraten der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Fehlerraten ($n = 9$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, dem der FM-Stimulus präsentiert wurde.

Die Hit-RTs für beide Ohren lagen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, bei 684–1.282 ms. Es zeigten sich keine Unterschiede der Hit-RTs zwischen den stimulierten Ohren, sowohl in der Einzelanalyse der Versuchspersonen (max. Differenz zwischen linkem und rechtem Ohr: 252 ms; s. Abbildung 14a) als auch im Mittel zwischen linkem (895 ± 64 ms) und rechtem Ohr (976 ± 55 ms; T-Test: n.s.; s. Abbildung 14b).

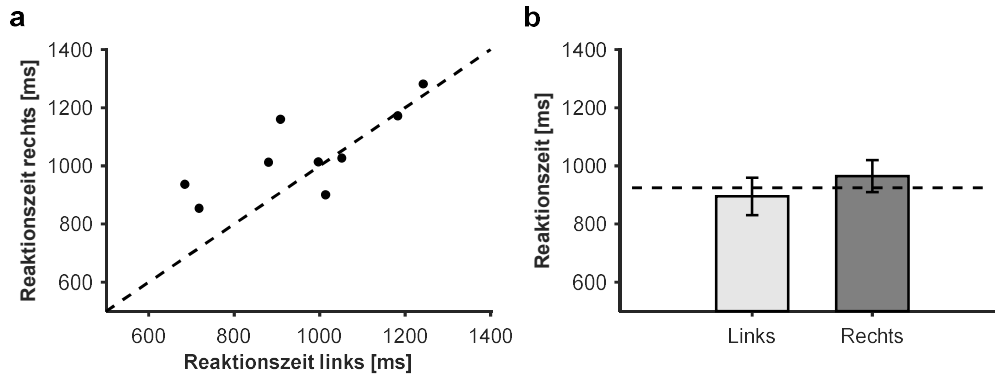


Abbildung 14: Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle mittlere Hit-RTs der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Hit-RTs ($n = 9$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Hit-RT. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der FM-Stimulus präsentiert wurde.

In Bezug auf die Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs keine Abhängigkeit von Alter, Geschlecht (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Ebenfalls konnte keine Abhängigkeit von der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, bei Fehlerraten sowie den PSG-Indizes des FM-Stimulus gezeigt werden (Pearson-Korrelation: n.s.). Allerdings zeigte sich eine positive Korrelation der Fehlerraten und PSG-Indizes des NB-Stimulus (Pearson-Korrelation: $r = 0,67577$, $n = 9$, $p = 0,0457$). Die Seiten, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, korrelierten jedoch nicht hinsichtlich der Hit-RTs mit den PSG-Indizes des FM- und NB-Stimulus (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.). Auch bei der Analyse der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte bezüglich einer Korrelation der Fehlerraten und der verschiedenen Mittel-frequenzen des FM-Stimulus keine Abhängigkeit gefunden werden (Kruskal-Wallis-Test: n.s.).

1.2.3. Einfluss der Modulationsrichtung der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Um eine mögliche Abhängigkeit der Fehlerraten und Hit-RTs von der Modulationsrichtung der FM-Stimuli zu untersuchen, wurden diese entsprechend des 15 %-Kriteriums analysiert. Betrachtet man die Fehlerraten der einzelnen Versuchspersonen separat für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli, zeigten sich vereinzelt große Unterschiede (max. Differenz: 40,0 %; s. Abbildung 15a). Die Hit-RTs der einzelnen Versuchspersonen waren dagegen für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli in einem vergleichbaren Rahmen (max. Differenz: 231 ms; s. Abbildung 15b). Im Mittel konnte kein signifikanter Unterschied in Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- (Fehlerrate: $21,0 \pm 2,8$ %; Hit-RTs: 955 ± 67 ms) und abwärts-modulierten FM-Stimuli (Fehlerrate: $26,8 \pm 4,7$ %; Hit-RTs: 904 ± 77 ms) gezeigt werden (jeweils T-Test: n.s.; s. Abbildung 15c und 15d).

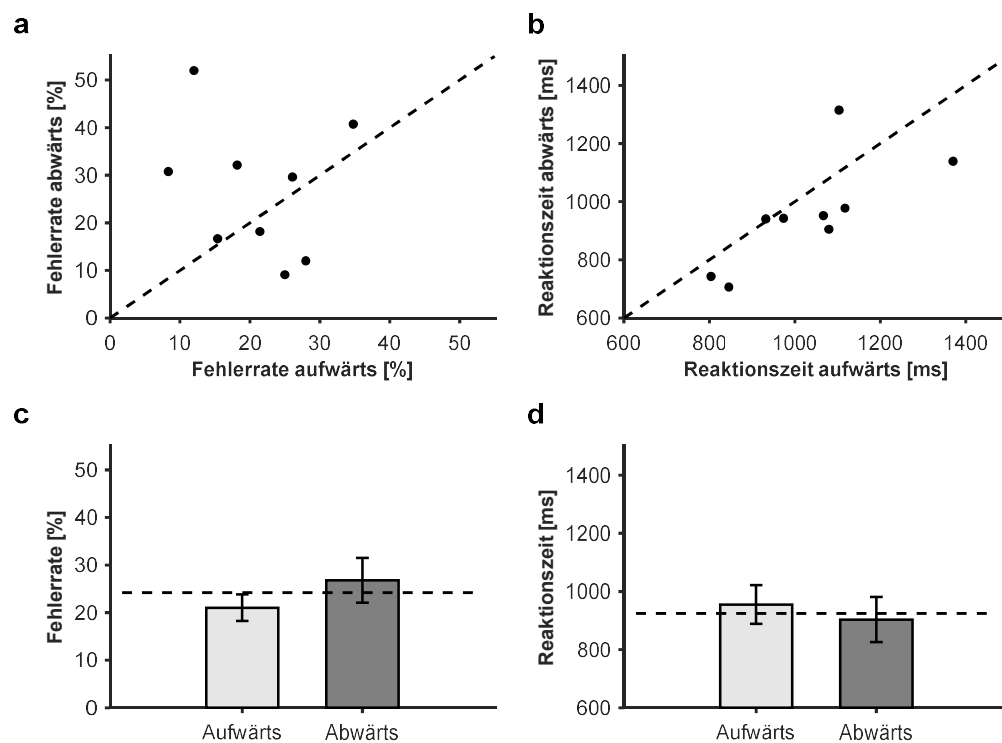


Abbildung 15: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- und abwärts-modulierten FM-Stimuli während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. Dargestellt sind (a) die individuellen Fehlerraten und (b) die individuellen mittleren Hit-RTs der Versuchspersonen für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli im Vergleich. Dabei ist jeweils die Linie „abwärts = aufwärts“ als gestrichelte Diagonale gezeigt. In (c) sind die mittleren Fehlerraten ($n = 9$) und in (d) die mittleren Hit-RTs ($n = 9$) für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli im Vergleich dargestellt. Die gestrichelte waagrechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimuli gemittelte Fehlerrate bzw. Hit-RT.

Zudem konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs in Bezug auf die Modulationsrichtung der FM-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht, Alter (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Auch bei der Analyse der Modulationsrichtung in Abhängigkeit der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte keine Korrelation bei Fehlerraten und Hit-RTs festgestellt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.). Ebenso konnte keine Korrelation zwischen der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, und der Modulationsrichtung in Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.).

1.2.4. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen

Nach eigenen Angaben erklärte Versuchsperson 8477 (▲), dass ihr die Unterscheidung auf dem rechten Ohr schwerer falle als auf dem linken. Dies lässt sich auch in den Fehlerraten aller Messungen bestätigen. Besonders stark zeigte sich dieser Effekt in der Messung unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums mit einer Differenz der Fehlerrate von 40,4 %.

Versuchsperson 7675 (►) bemerkte, dass ihr die Unterscheidung bei tieffrequenten Stimuli am schwersten falle sowie grundsätzlich auch auf dem linken im Vergleich zum rechten Ohr. Die Analyse der Daten konnte diese Effekte jedoch nicht grundsätzlich bzw. durchgehend für alle Schalldruckpegel des FM-Stimulus nachweisen.

Zusammenfassend zeigte sich, dass ein sinkender Schalldruckpegel des FM-Stimulus mit einer steigenden Fehlerrate einhergeht. Da die Einzeldaten der Versuchspersonen sehr unterschiedliche Sensitivitätsschwellen aufwiesen, war es für die Untersuchung der Lateralität notwendig, die Daten aller Versuchspersonen unter Anwendung des 15 %-Kriteriums zu vergleichen. Hier zeigte sich, dass die Fehlerraten bei einer Präsentation des FM-Stimulus auf dem linken Ohr signifikant niedriger waren, im Vergleich mit der Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten Ohr. Für die Hit-RTs ließ sich kein Effekt erkennen.

1.3. Experiment 2: Stimulusdauer FM-Stimulus

Da in Experiment 2, der Unterscheidung der Stimulusdauer bei FM-Stimuli, keine „einfachen“ Kategorien, wie z.B. für die Unterscheidung von Modulationsrichtungen, gebildet werden konnten, war für dieses Experiment eine Trainingsmessung notwendig. Hier machten sich die Versuchspersonen mit den jeweiligen Stimulusdauern vertraut, es gab jedoch keine direkte Rückmeldung. Alle zehn Versuchspersonen absolvierten diese Trainingsmessung erfolgreich mit mindestens fünfzig Durchläufen; nach eigenen Angaben hatten alle Versuchspersonen die Unterscheidung beider Stimulusdauern danach verinnerlicht.

1.3.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten

Für das ursprüngliche Experiment lag die Mehrheit (57,25 %) aller Hit-RTs über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 900 ms und 1.200 ms. Dies ergab eine mittlere Antwortschnelligkeit von $0,87 \cdot 10^{-3} \pm 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Bereich: $0,12 \cdot 10^{-3} - 1,70 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; s. Abbildung 16).

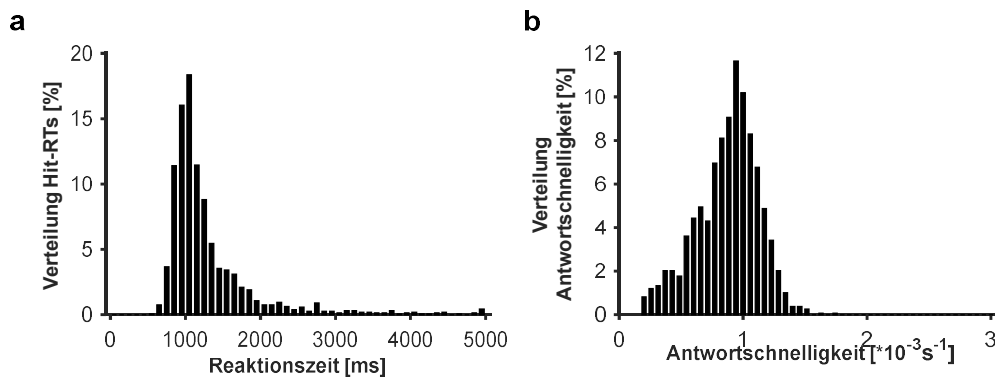


Abbildung 16: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 10) während der Unterscheidung der Stimulusdauer. (a) Prozentuale Verteilung der Hit-RTs. Hit-RTs < 50 ms werden unter „100“ und Hit-RTs > 5.000 ms unter „5.000“ auf der x-Achse zusammengefasst. (b) Prozentuale Verteilung der Antwortschnelligkeit der Hit-RTs. Antwortschnelligkeit < $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ wird unter „ $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ und Antwortschnelligkeit > $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ unter „ $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ auf der x-Achse zusammengefasst.

Betrachtet man alle Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus, lässt sich ein differenzierteres Bild erkennen. Die mittleren Hit-RTs lagen über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 907 ms und 1.744 ms (s. Abbildung 17a), wobei die Einzelkurven zum Teil unterschiedliche Verläufe aufwiesen. Im Mittel zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen Hit-RTs für die unterschiedlichen Schalldruckpegel des FM-Stimulus (max. Differenz: 353 ms; 1-Faktor-ANOVA: n.s.; s. Abbildung 17b).

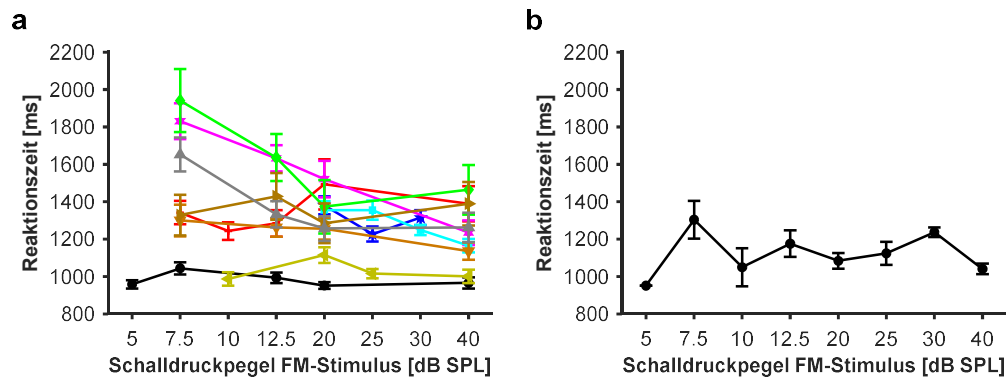


Abbildung 17: Mittlere Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer. (a) Mittlere Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (n = 10) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus.

Die Fehlerraten der Versuchspersonen stiegen zwar mit sinkendem Schalldruckpegel generell an (s. Abbildung 18a), zeigten jedoch zum Teil starke Unterschiede. Diese waren hauptsächlich bedingt durch eine Verschiebung der individuellen Kurven entlang der Schalldruckpegel des FM-Stimulus (s. Abbildung 18a). So war der allgemeine Verlauf einer steigenden Fehlerrate mit sinkendem Schalldruckpegel des FM-Stimulus auch in der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen erkennbar (Kruskal-Wallis-Test: $df = 7/33$, $\chi^2 = 23,43$, $p = 0,0014$; s. Abbildung 18b).

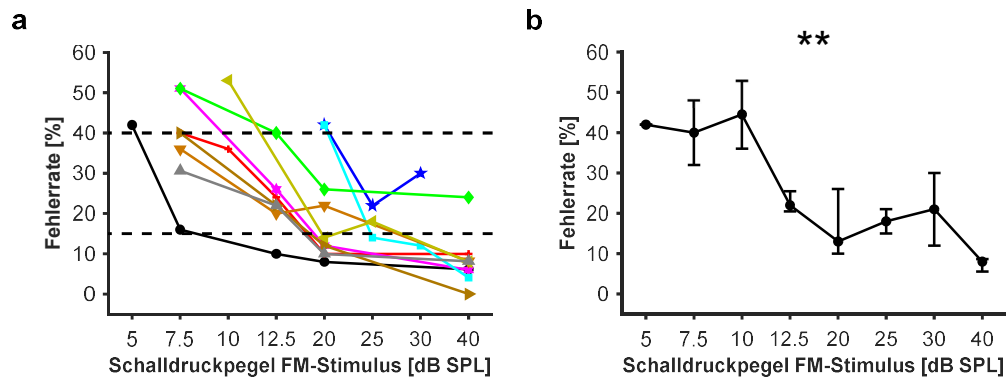


Abbildung 18: Fehllerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer.(a) Fehllerraten aller Versuchspersonen bei 3–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). Die obere gestrichelte Linie zeigt die 40 %-Schwelle und die untere gestrichelte Linie die 15 %-Schwelle an. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Grenzen wurden die Daten nicht weiter in Analysen einbezogen. (b) Mittlere Fehllerrate (Median; $n = 10$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus.

Um eine mögliche lateralisierte Verarbeitung bei der Unterscheidung der Stimulusdauer von FM-Stimuli zu untersuchen, wurden die Fehllerraten und Hit-RTs in Abhängigkeit des Ohres, auf dem der FM-Stimulus präsentiert worden ist, ausgewertet. Betrachtet man die Differenz der Fehllerraten zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus, zeigte sich auch hier wieder eine hohe Streuung zwischen den einzelnen Versuchspersonen (Bereich: -16,0–40,7 %; s. Abbildung 19a). Sowohl in den Einzelkurven als auch in der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen zeigte sich eine leichte linke EA-Tendenz in vereinzelten Schalldruckpegel-Bereichen (10 dB SPL und 20–30 dB SPL). Es konnte jedoch keine signifikante Änderung über den Verlauf der Schalldruckpegel des FM-Stimulus gezeigt werden (1-Faktor-ANOVA: n.s.; s. Abbildung 19b).

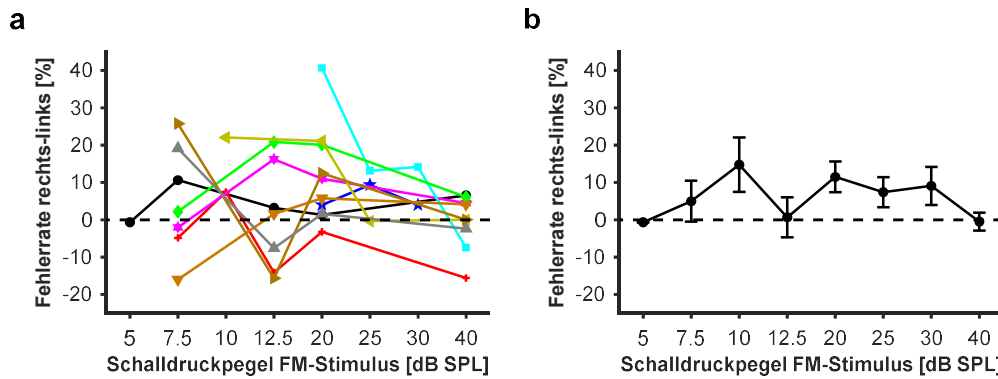


Abbildung 19: Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Fehlerrate ($n = 10$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Fehlerrate von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

Für die Differenz der medianen Hit-RTs zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit der Schalldruckpegel des FM-Stimulus ließ sich weder in den Einzelkurven der Versuchspersonen (Bereich: -452 – 738 ms; s. Abbildung 20a) noch im Verlauf der medianen Hit-RTs ein klarer Vorteil eines Ohres erkennen (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 20b).

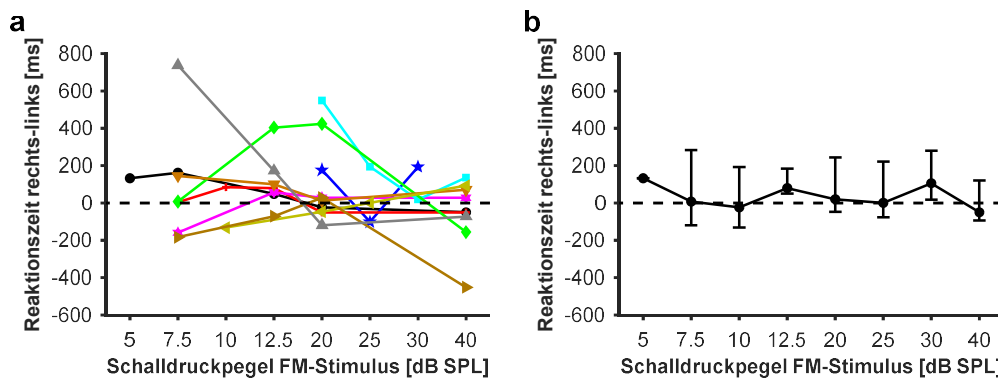


Abbildung 20: Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Stimulusdauer. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; $n = 10$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

1.3.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Die Daten aller Versuchspersonen wurden auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel unter Anwendung des 15 %-Kriteriums analysiert. Von insgesamt 10 Versuchspersonen erreichte jeweils eine das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 40 dB SPL (Fehlerrate: 24,0 %), von 20 dB SPL (Fehlerrate: 22,0 %) und von 5 dB SPL (Fehlerrate: 16,0 %). 2 Versuchspersonen erreichten das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 25 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $20,0 \pm 2,0$ %) und 4 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 12,5 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $23,5 \pm 1,6$ %). Eine Versuchsperson wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da ihre Fehlerraten nicht im Bereich von 15–40 % lagen (s. Abbildung 18a). Die nun weiter analysierten Messungen von 9 Versuchspersonen hatten eine mittlere Fehlerrate von $24,78 \pm 1,0$ %.

Auch bei der Analyse der Daten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums fiel auf, dass die Fehlerraten, sowohl zwischen Versuchspersonen als auch im Vergleich zwischen den Ohren, stark variierten. So zeigten 4 Versuchspersonen höhere Fehlerraten bei einer Präsentation des FM-Stimulus auf dem linken Ohr, während dies bei 5 Versuchspersonen bei einer Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten Ohr der Fall war (s. Abbildung 21a). Im Vergleich der gemittelten Fehlerraten aller Versuchspersonen zwischen beiden Ohren (s. Abbildung 21b) zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Präsentation des FM-Stimulus auf dem linken ($21,5 \pm 2,2$ %) oder dem rechten Ohr ($22,6 \pm 2,1$ %; T-Test: n.s.).

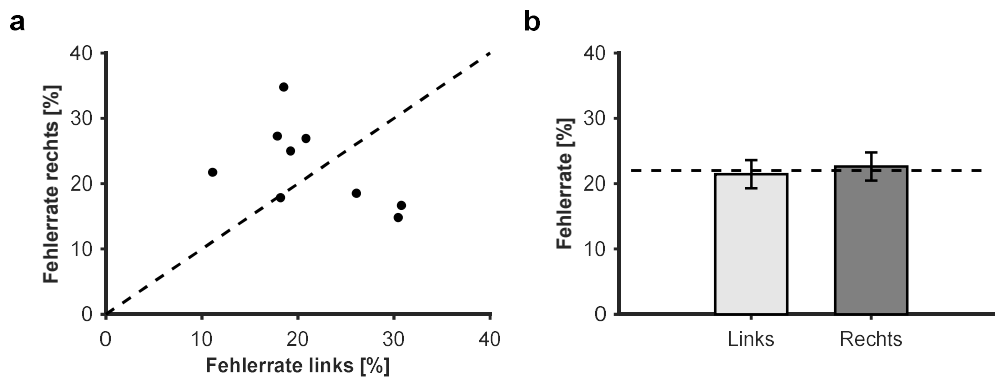


Abbildung 21: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Stimulusdauer basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle Fehlerraten der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Fehlerraten ($n = 9$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der FM-Stimulus präsentiert wurde.

Die Hit-RTs für beide Ohren lagen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, bei 990–1.681 ms. Es zeigten sich keine Unterschiede in den Hit-RTs zwischen den stimulierten Ohren, sowohl in der Einzelanalyse der Versuchspersonen (max. Differenz zwischen linkem und rechtem Ohr: 312 ms; s. Abbildung 22a) als auch im Mittel zwischen linkem (1.114 ± 49 ms) und rechtem Ohr (1.131 ± 51 ms; T-Test: n.s.; s. Abbildung 22b).

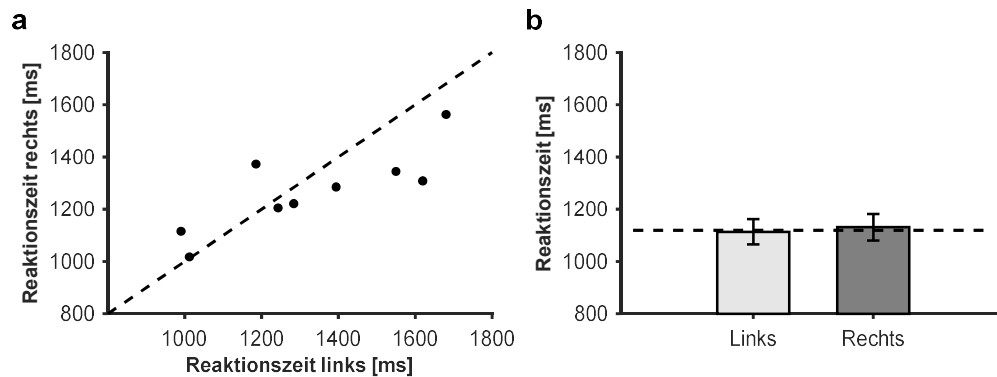


Abbildung 22: Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Stimulusdauer basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle mittlere Hit-RTs der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Hit-RTs ($n = 9$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Hit-RT. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der FM-Stimulus präsentiert wurde.

In Bezug auf die Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs keine Abhängigkeit von Alter, Geschlecht (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Ebenfalls konnte keine Abhängigkeit von der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, bei Fehlerraten und Hit-RTs sowie den PSG-Indizes des FM- und NB-Stimulus gezeigt werden (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.). Auch bei der Analyse der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte bezüglich einer Korrelation der Fehlerraten und der verschiedenen Mittelfrequenzen des FM-Stimulus keine Abhängigkeit gefunden werden (Kruskal-Wallis-Test: n.s.).

1.3.3. Einfluss der Modulationsrichtung der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Um eine mögliche Abhängigkeit der Fehlerraten und Hit-RTs von der Modulationsrichtung der FM-Stimuli zu untersuchen, wurden diese entsprechend des 15 %-Kriteriums analysiert. Betrachtet man die Fehlerraten der einzelnen Versuchspersonen separat für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli, zeigten sich bei manchen Versuchspersonen große Unterschiede (max. Differenz: 18,0 %; s. Abbildung 23a). Auch die Hit-RTs der einzelnen Versuchspersonen zeigten eine hohe Varianz für die Modulationsrichtungen des FM-Stimulus auf (max. Differenz: 662 ms; s. Abbildung 23b). Im Mittel konnte jedoch kein signifikanter Unterschied in Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- (Fehlerrate: $23,3 \pm 2,8$ %; Hit-RTs: 1.114 ± 54 ms) und abwärts-modulierten FM-Stimuli (Fehlerrate: $20,3 \pm 2,4$ %; Hit-RTs: 1.122 ± 53 ms) gezeigt werden (jeweils T-Test: n.s.; s. Abbildung 23c und 23d).

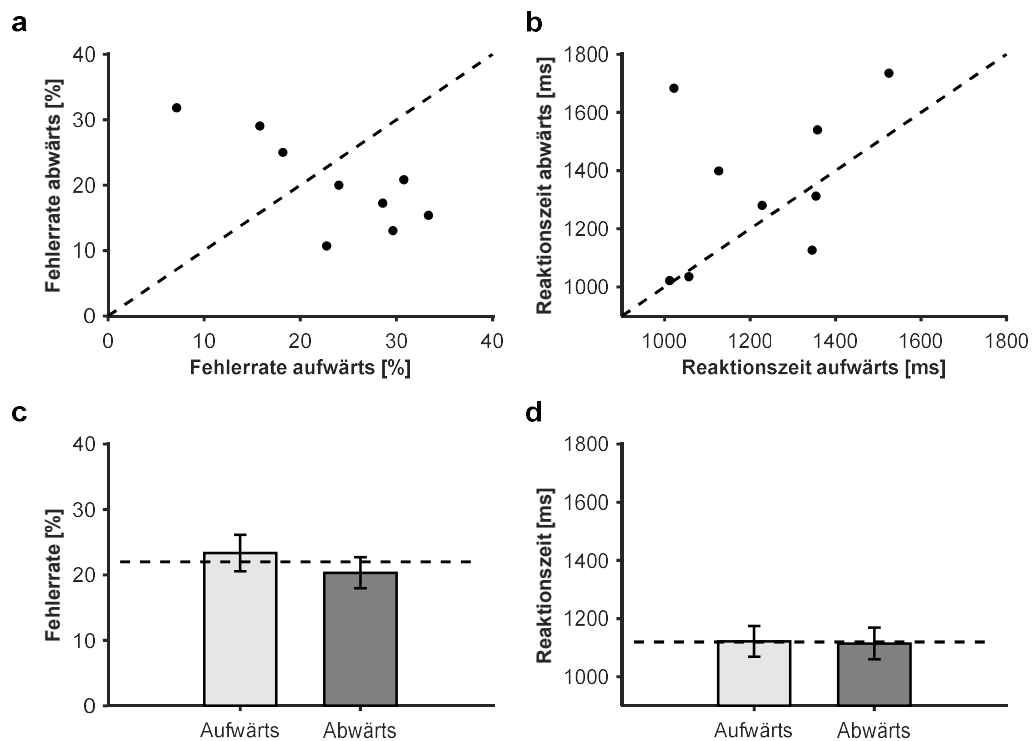


Abbildung 23: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- und abwärts-modulierten FM-Stimuli während der Unterscheidung der Stimulusdauer basierend auf dem 15 %-Kriterium. Dargestellt sind (a) die individuellen Fehlerraten und (b) die individuellen mittleren Hit-RTs der Versuchspersonen für auf- und abwärts modulierte FM-Stimuli im Vergleich. Dabei ist jeweils die Linie „abwärts = aufwärts“ als gestrichelte Diagonale gezeigt. In (c) sind die mittleren Fehlerraten ($n = 9$) und in (d) die mittleren Hit-RTs ($n = 9$) für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli im Vergleich dargestellt. Die gestrichelte waagrechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimuli gemittelte Fehlerrate bzw. Hit-RT.

Zudem konnte in den Fehlerraten in Bezug auf die Modulationsrichtung der FM-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht, Alter (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Auch in den Hit-RTs konnte in Bezug auf die Modulationsrichtung der FM-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht (1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Allerdings zeigte sich eine Korrelation der Hit-RTs mit dem Alter der Versuchspersonen (1-Faktor-ANOVA: $F_{6,2} = 24,73$, $p = 0,0394$). Dabei waren die Hit-RTs der aufwärts-modulierten FM-Stimuli bei einem Alter von 28 Jahren ($n = 2$) und 35 Jahren ($n = 1$) signifikant höher als bei einem Alter von 30 Jahren ($n = 1$, Tukey-post-hoc-Test: $p = 0,0468$ und $p = 0,0339$). Bei der Analyse der Modulationsrichtung in Abhängigkeit der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte keine Korrelation bei Fehlerraten und Hit-RTs festgestellt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.). Ebenso konnte keine Korrelation zwischen der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, und der Modulationsrichtung in Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.).

1.3.4. Einfluss der Stimulusdauer der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Um eine mögliche Abhängigkeit der Fehlerraten und Hit-RTs von der Stimulusdauer der FM-Stimuli zu untersuchen, wurden diese in Abhängigkeit des 15 %-Kriteriums miteinander verglichen. Betrachtet man die Fehlerraten der einzelnen Versuchspersonen für die beiden Stimulusdauern des FM-Stimulus, zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Versuchspersonen. So zeigten 4 Versuchspersonen deutlich höhere Fehlerraten bei einer Stimulusdauer von 400 ms, 5 Versuchspersonen dagegen bei einer Stimulusdauer von 600 ms (max. Differenz: 30,2 %, s. Abbildung 24a). Auch die Auswertung der Hit-RTs wies zum Teil deutliche Unterschiede auf (max. Differenz: 736 ms, s. Abbildung 24b). Im Mittel konnte jedoch kein signifikanter Unterschied in den Fehlerraten und Hit-RTs zwischen Stimuli mit einer Dauer von 400 ms (Fehlerrate: $21,9 \pm 3,5$ %; Hit-RTs: 1.106 ± 55 ms) und 600 ms (Fehlerrate: $21,1 \pm 3,4$ %; Hit-RTs: 1.185 ± 86 ms) gezeigt werden (jeweils T-Test: n.s.; s. Abbildung 24c und 24d).

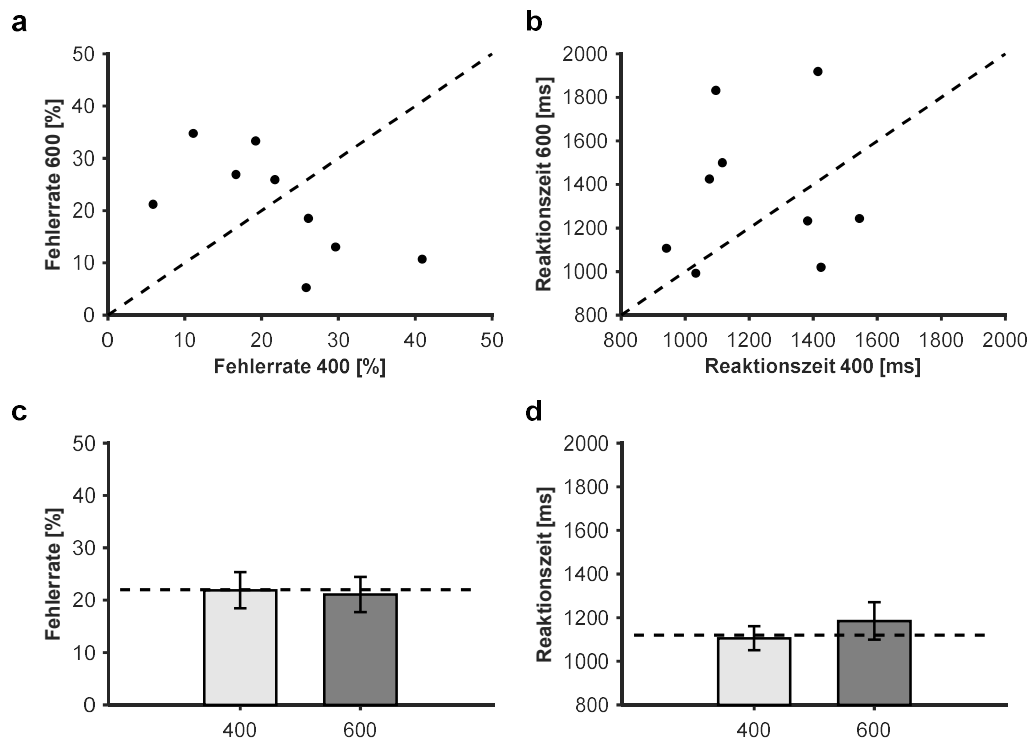


Abbildung 24: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen FM-Stimuli mit einer Dauer von 400 ms und 600 ms während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. Dargestellt sind (a) die individuellen Fehlerraten und (b) die individuellen mittleren Hit-RTs der Versuchspersonen für FM-Stimuli mit einer Dauer von 400 ms und 600 ms im Vergleich. Dabei ist jeweils die Linie „400 = 600“ als gestrichelte Diagonale gezeigt. In (c) sind die mittleren Fehlerraten ($n = 9$) und in (d) die mittleren Hit-RTs ($n = 9$) für FM-Stimuli mit einer Dauer von 400 ms und 600 ms im Vergleich dargestellt. Die waagrecht gestrichelte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimulusdauern gemittelte Fehlerrate bzw. Hit-RT.

Zudem konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs in Bezug auf die Stimulusdauer der FM-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Allerdings waren die Fehlerraten der weiblichen Versuchspersonen für FM-Stimuli mit einer Dauer von 400 ms signifikant niedriger als die Fehlerraten der männlichen Versuchspersonen (1-Faktor-ANOVA: $F_{1,7} = 6,59$, $p = 0,0371$). In den Hit-RTs konnte kein signifikanter Zusammenhang gezeigt werden (1-Faktor-ANOVA: n.s.). Bei der Analyse der Stimulusdauer in Abhängigkeit der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte keine Korrelation bei Fehlerraten und Hit-RTs festgestellt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.). Ebenso konnte keine Korrelation zwischen der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, und der Stimulusdauer in Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.).

1.3.5. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen

Versuchsperson 7077 (✳) gab nach der Trainingsmessung an, dass sie sich hauptsächlich am FM-Stimulus orientiert habe.

Versuchsperson 6569 (●) berichtete, dass, sobald sie nichts gehört habe, dies als kurz kategorisiert habe.

Zusammenfassend zeigte sich, dass ein sinkender Schalldruckpegel des FM-Stimulus mit einer steigenden Fehlerrate einhergeht. Für die Hit-RTs ließ sich kein vergleichbarer Effekt erkennen. Da die Einzeldaten der Versuchspersonen sehr unterschiedliche Sensitivitätsschwellen aufwiesen, war es für die Untersuchung der Lateralität notwendig, die Daten aller Versuchspersonen unter dem 15 %-Kriterium zu vergleichen. Allerdings ließ sich weder in den Fehlerraten noch in den Hit-RTs der Vorteil eines Ohres nachweisen.

2. Zweite Versuchsreihe (Modulationsrichtung FM-Stimulus und CV-Stimuli)

Die Experimente zur Unterscheidung von CV-Stimuli mit und ohne FM-Komponenten wurden zusammen mit Kontrollmessungen zur FM-Unterscheidung durchgeführt. Insgesamt absolvierten 23 Versuchspersonen die PSG-Bestimmung sowie die Unterscheidung der Modulationsrichtung der FM-Stimuli (Experiment 3) und der CV-Silben „da“ und „ga“ (Experiment 4). Die Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ (Experiment 5) wurde bei 19 Versuchspersonen durchgeführt, davon bei 11 Versuchspersonen an einem anderen Tag.

2.1. Bestimmung des Punktes subjektiver Gleichheit (II)

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde der PSG für die Lautstärkewahrnehmung von FM-, NB- und CV-Stimuli für jedes Ohr ermittelt. Dabei wurde die Lautstärke des adaptiven Stimulus mit der konstanten Lautstärke des Zielstimulus verglichen und entsprechend der Schalldruckpegel angepasst. Für die PSG-Bestimmung des FM- und CV-Stimulus benötigte jede Versuchspersonen 12 und für den NB-Stimulus im Mittel 12 (Median; Q1: 12, Q3: 12; Bereich: 12–13) Durchläufe (s. Abbildung 25).

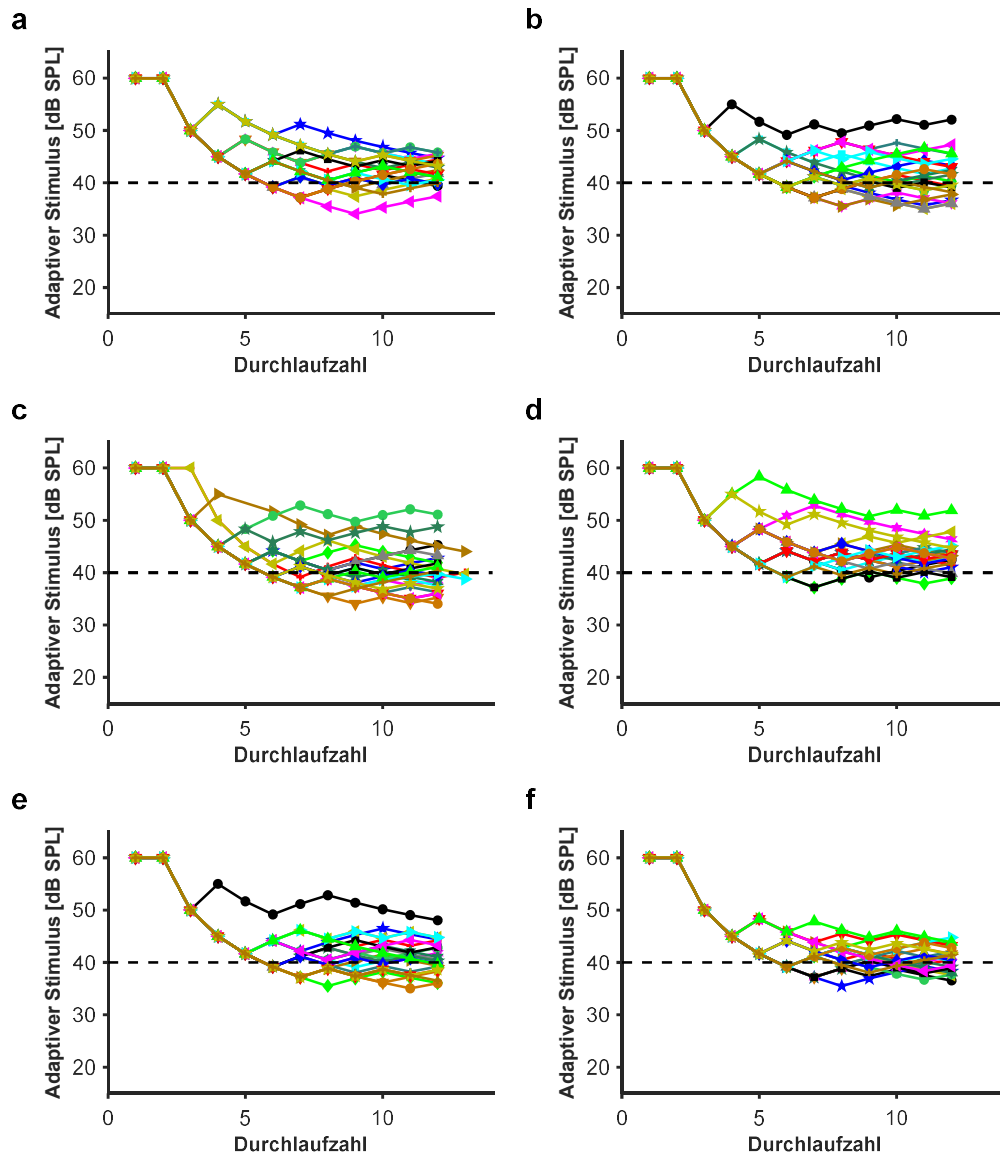


Abbildung 25: Bestimmung des PSG für die Wahrnehmung der Lautstärke des FM-, NB- und CV-Stimulus. Gezeigt sind die Einzelkurven aller 23 Versuchspersonen (verschiedene Farben und Symbole). Die gestrichelte Linie zeigt den Schalldruckpegel des Zielstimulus von 40 dB SPL an, der dem kontralateralen Ohr präsentiert wurde. Dargestellt sind die Kurven für (a) den FM-Stimulus auf dem rechten Ohr (Zielstimulus links), (b) den FM-Stimulus auf dem linken Ohr (Zielstimulus rechts), (c) den NB-Stimulus auf dem rechten Ohr (Zielstimulus links), (d) den NB-Stimulus auf dem linken Ohr (Zielstimulus rechts), (e) den CV-Stimulus auf dem rechten Ohr (Zielstimulus links), (f) den CV-Stimulus auf dem linken Ohr (Zielstimulus rechts).

Der PSG selbst lag im Mittel für Messungen mit dem FM-Stimulus bei $41,8 \pm 0,4$ dB SPL (Bereich: 36,0–52,6 dB SPL), für Messungen mit dem NB-Stimulus bei $41,8 \pm 0,5$ dB SPL (Bereich: 34,0–51,9 dB SPL) und für Messungen mit dem CV-Stimulus bei $40,7 \pm 0,3$ dB SPL (Bereich: 36,0–48,0 dB SPL). Von den absoluten Schalldruckpegelwerten der PSG-Bestimmung wurden individuelle PSG-Indizes berechnet, mit denen ein Unterschied in der Wahrnehmung der Lautstärken zwischen linkem und rechtem Ohr deutlich gemacht werden kann. Im Mittel lagen die berechneten PSG-Indizes des FM-Stimulus bei $0,6 \pm 0,6$ dB (Bereich: -6,3–4,8 dB), des NB-Stimulus bei $-1,5 \pm 0,6$ dB (Bereich: -5,4–4,2 dB) und des CV-Stimulus bei $0,2 \pm 0,5$ dB (Bereich: -3,7–5,8 dB; s. Abbildung 26a). Somit lag der maximal wahrgenommene Unterschied der Lautstärke zwischen linkem und rechtem Ohr gerundet bei 6 dB für den FM- und CV- und 5 dB für den NB-Stimulus.

Ein direkter Zusammenhang bei den PSG-Indizes war zwischen den NB- und CV-Stimuli (Wilcoxon Paarvergleichstest: $S = 224$, $Z = 2,6157$, $p = 0,0089$), sowie zwischen den NB- und FM-Stimuli (Wilcoxon Paarvergleichstest: $S = 227$, $Z = 2,7069$, $p = 0,0068$) zu erkennen (s. Abbildung 26b). Zwischen den CV- und FM-Stimuli konnte keine Abhängigkeit festgestellt werden (Wilcoxon Paarvergleichstest: n.s.).

In der Summe der drei PSG-Indizes überschritt keine Versuchsperson die gesetzte Grenze von 5 dB Wahrnehmungsunterschied zwischen linkem und rechtem Ohr. Deswegen, und da es keine systematische Messabweichung bei allen Stimuli gab, musste keine Anpassung in den folgenden Versuchen vorgenommen werden.

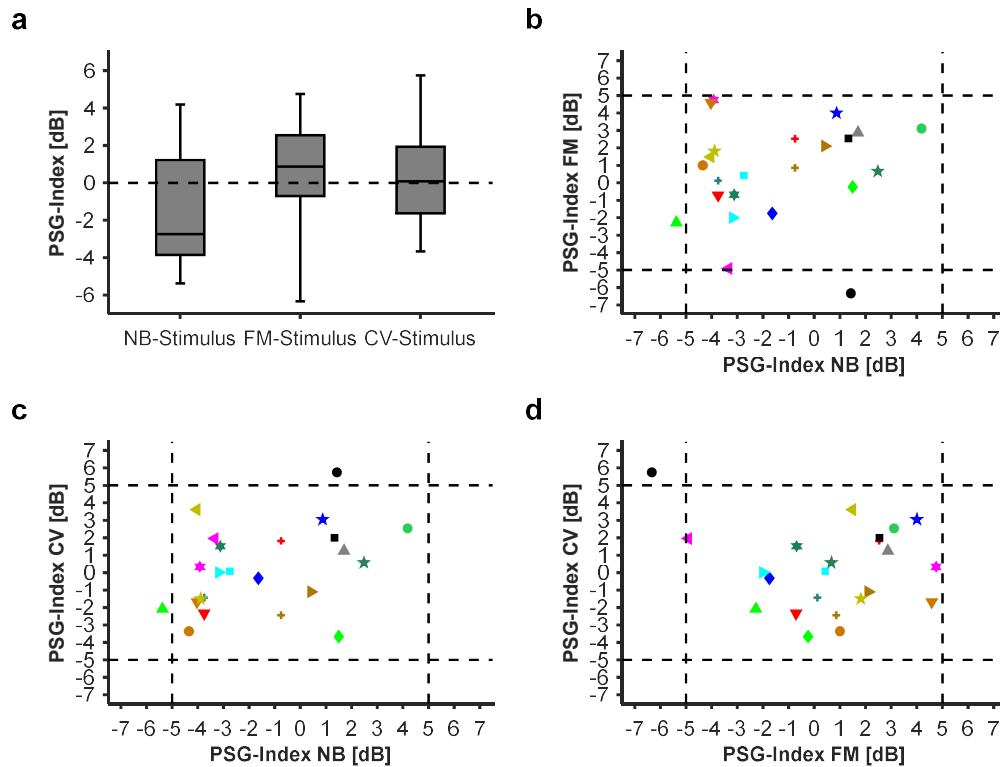


Abbildung 26: PSG-Indizes für Unterschiede in der Wahrnehmung von Lautstärken auf dem linken und rechten Ohr für den FM-, NB- und CV-Stimulus. (a) Vergleich der mittleren FM-, NB- und CV-Indizes (Median; $n = 23$). (b) FM-Index in Abhängigkeit des NB-Index für jede Versuchsperson (verschiedene Farben und Symbole). (c) CV-Index in Abhängigkeit des NB-Index für jede Versuchsperson (verschiedene Farben und Symbole). (d) CV-Index in Abhängigkeit des FM-Index für jede Versuchsperson (verschiedene Farben und Symbole).

Im Mittel lagen die RTs für Messungen mit dem FM-Stimulus bei 2.607 ms (Median; Q1: 2.071 ms, Q3: 3.568 ms; Bereich: 510–6.494 ms), für Messungen mit dem NB-Stimulus bei 2.978 ms (Median; Q1: 2.296 ms, Q3: 3.968 ms; Bereich: 490–7.006 ms) und für Messungen mit dem CV-Stimulus bei 2.420 ms (Median; Q1: 1.916 ms, Q3: 2.991 ms; Bereich: 298–4.988 ms).

Es konnte keine Abhängigkeit der PSG-Indizes des FM-, NB- und CV-Stimulus von Alter, Geschlecht (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden.

2.2. Experiment 3: Modulationsrichtung FM-Stimulus (II)

2.2.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten

In Experiment 3, der Unterscheidung der Modulationsrichtung der FM-Stimuli, lag die Mehrheit (50,34 %) aller Hit-RTs über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 700 ms und 900 ms. Dies ergab eine mittlere Antwortschnelligkeit von $1,12 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Median; Q1: $0,93 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, Q3: $1,50 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; Bereich: $0,12 \cdot 10^{-3}$ – $1,13 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; s. Abbildung 27).

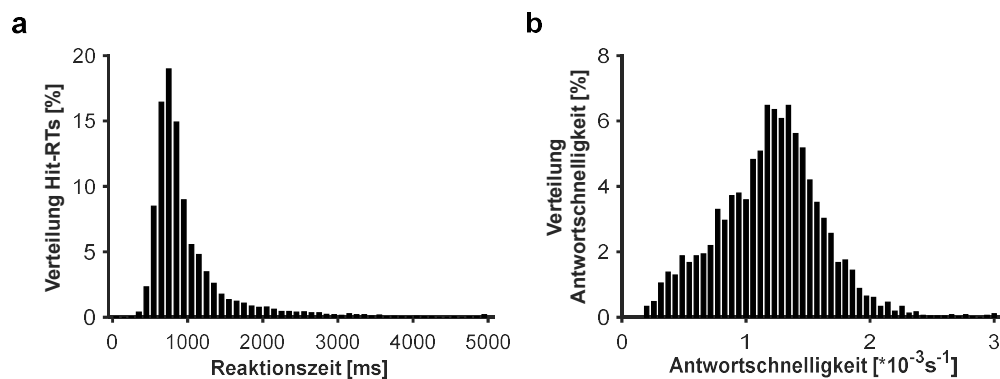


Abbildung 27: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen ($n = 23$) während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Prozentuale Verteilung der Hit-RTs. Hit-RTs $< 50 \text{ ms}$ werden unter „100“ und Hit-RTs $> 5.000 \text{ ms}$ unter „5.000“ auf der x-Achse zusammengefasst. (b) Prozentuale Verteilung der Antwortschnelligkeit der Hit-RTs. Antwortschnelligkeit $< 0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ wird unter „ $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ und Antwortschnelligkeit $> 3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ unter „ $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ auf der x-Achse zusammengefasst.

Betrachtet man alle Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus, lässt sich ein differenzierteres Bild erkennen. So lagen die mittleren Hit-RTs über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 563 ms und 2.549 ms (s. Abbildung 28a), wobei die Einzelkurven unterschiedliche Verläufe aufwiesen. Im Mittel zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied der Hit-RTs für die unterschiedlichen Schalldruckpegel des FM-Stimulus (max. Differenz: 351 ms; Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 28b).

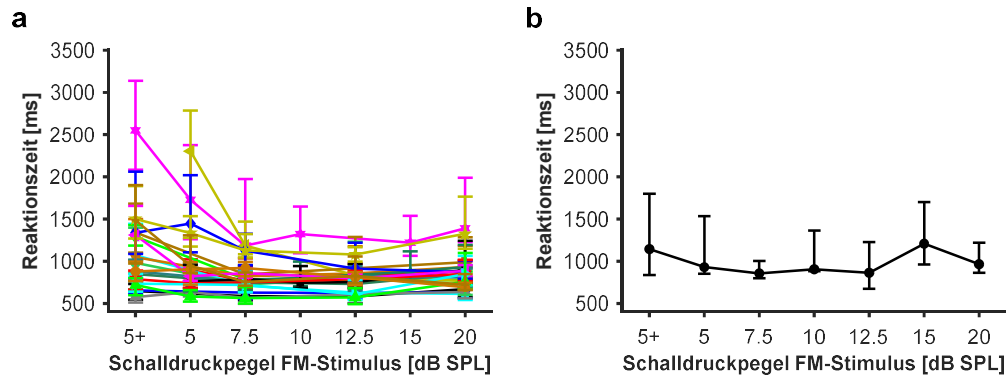


Abbildung 28: Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; n = 23) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. 5+ entspricht einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 5 dB SPL und einem um 10 dB erhöhten Schalldruckpegel des NB-Stimulus von 70 dB SPL.

Die Fehlerraten der Versuchspersonen stiegen zwar mit sinkendem Schalldruckpegel grundsätzlich an (s. Abbildung 29a), zeigten jedoch zum Teil starke Unterschiede. Diese waren meist bedingt durch eine Verschiebung der individuellen Kurven entlang der Schalldruckpegel des FM-Stimulus (s. Abbildung 29a). Der allgemeine Verlauf einer steigenden Fehlerrate mit sinkendem Schalldruckpegel des FM-Stimulus war, sowohl in allen Einzelkurven (mit Ausnahme der ersten Messung mit einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 20 dB SPL) als auch der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen, erkennbar (Kruskal-Wallis-Test: $df = 6/98$, $\chi^2 = 30,99$, $p = 2,55 \cdot 10^{-5}$; s. Abbildung 29a und 29b).

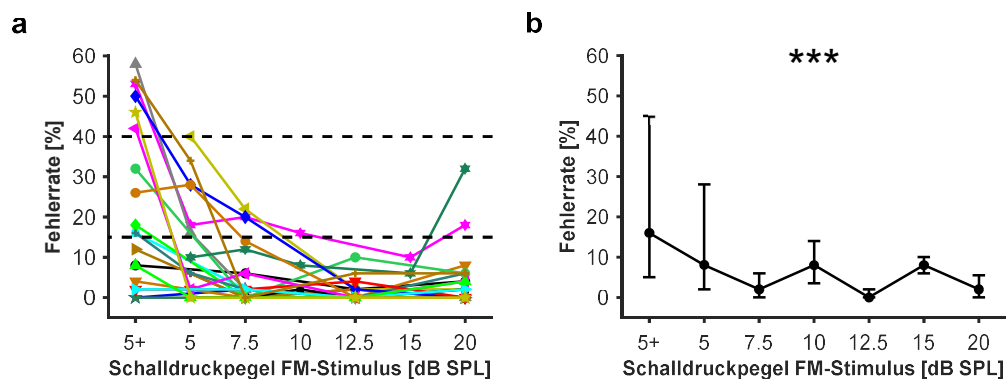


Abbildung 29: Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). Die obere gestrichelte Linie zeigt die 40 %-Schwelle und die untere gestrichelte Linie die 15 %-Schwelle an. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Grenzen wurden die Daten nicht weiter in Analysen einbezogen. (b) Mittlere Fehlerrate (Median; $n = 23$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. 5+ entspricht einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 5 dB SPL und einem um 10 dB erhöhten Schalldruckpegel des NB-Stimulus von 70 dB SPL.

Um eine mögliche lateralisierte Verarbeitung bei der Unterscheidung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli zu untersuchen, wurden die Fehlerraten und Hit-RTs in Abhängigkeit des Ohres, auf dem der FM-Stimulus präsentiert worden ist, ausgewertet. Betrachtet man die Differenz der Fehlerraten zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus, zeigte sich auch hier wieder eine hohe Streuung zwischen den einzelnen Versuchspersonen (Bereich: -34,9–34,7 %). Tendenzen für den Vorteil eines Ohres ließen sich nur bei einzelnen Versuchspersonen ausmachen (s. Abbildung 30a). In der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen zeigte sich keine Tendenz für den Vorteil eines Ohres, ebenso konnte keine signifikante Änderung über den Verlauf der Schalldruckpegel des FM-Stimulus gezeigt werden (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 30b).

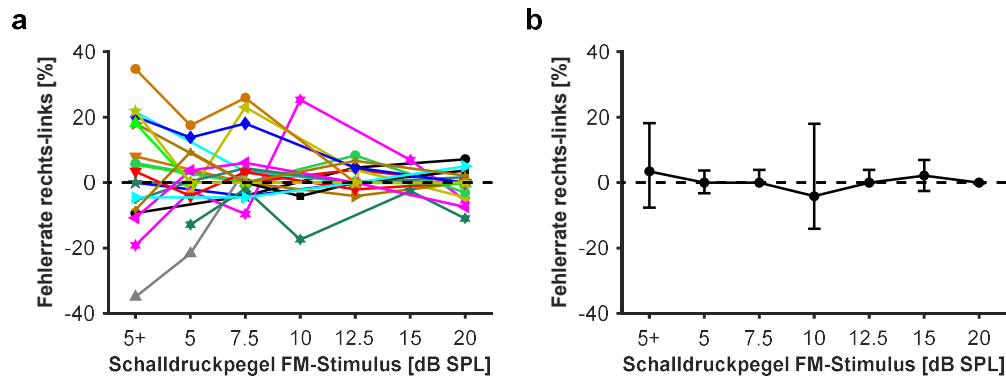


Abbildung 30: Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Fehlerrate (Median; $n = 23$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Fehlerrate von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an. 5+ entspricht einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 5 dB SPL und einem um 10 dB erhöhten Schalldruckpegel des NB-Stimulus von 70 dB SPL.

Auch für die Differenz der medianen Hit-RTs zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus ließ sich weder in den Einzelkurven der Versuchspersonen (Bereich: -759–909 ms; s. Abbildung 31a) noch im Verlauf der medianen Hit-RTs ein klarer Vorteil eines Ohres erkennen (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 31b).

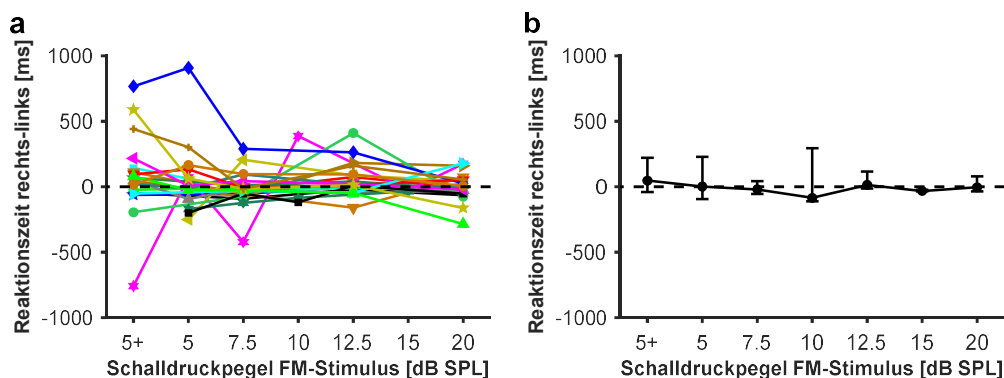


Abbildung 31: Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM-Stimulus während der Unterscheidung der Modulationsrichtung. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; $n = 23$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an. 5+ entspricht einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 5 dB SPL und einem um 10 dB erhöhten Schalldruckpegel des NB-Stimulus von 70 dB SPL.

2.2.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Die Daten aller Versuchspersonen wurden auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel unter Anwendung des 15 %-Kriteriums analysiert. Von insgesamt 23 Versuchspersonen erreichte eine das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 10 dB SPL (Fehlerrate: 16,0 %). 2 Versuchspersonen erreichten das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 7,5 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $22,0 \pm 1,0$ %), 3 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 5 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $25,0 \pm 5,3$ %) und 4 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 5 dB SPL mit einem um 10 dB erhöhten Schalldruckpegel des NB-Stimulus von 70 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $20,5 \pm 3,9$ %). 13 weitere Versuchspersonen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da die hier gemessenen Fehlerraten nicht im Bereich von 15–40 % lagen (s. Abbildung 29a). Die nun weiter analysierten Messungen von 10 Versuchspersonen hatten eine mittlere Fehlerrate von $21,8 \pm 2,2$ %.

Auch bei der Analyse der Daten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums fiel auf, dass die Fehlerraten, sowohl zwischen Versuchspersonen als auch im Vergleich zwischen den Ohren, variierten. Jedoch zeigten 8 von 10 Versuchspersonen konsistent höhere Fehlerraten für eine Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten, im Vergleich zum linken Ohr (s. Abbildung 32a). Die gemittelten Fehlerraten aller Versuchspersonen im Vergleich zwischen den Ohren (s. Abbildung 32b) zeigten, dass die Fehlerrate für die Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten Ohr ($26,4 \pm 3,2$ %) einen Trend zu höheren Werten aufwies, als auf dem linken ($16,5 \pm 3,1$ %; T-Test: $n = 10$; $T = 2,13$, $p = 0,0616$).

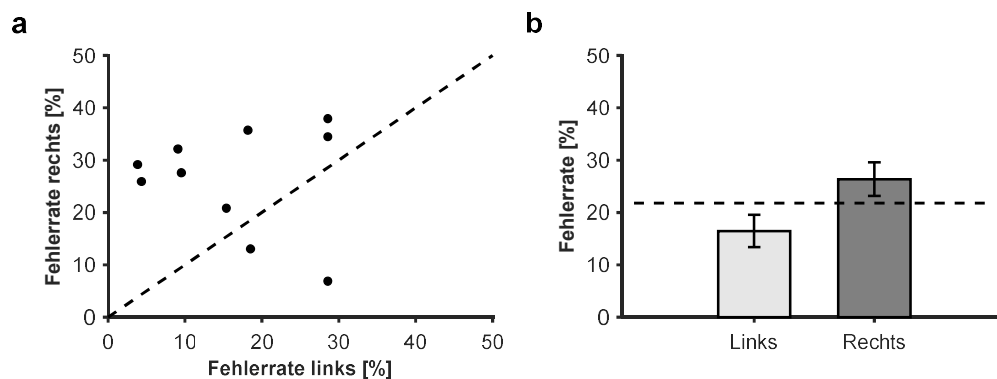


Abbildung 32: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle Fehlerraten der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Fehlerraten ($n = 10$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, dem der FM-Stimulus präsentiert wurde.

Die Hit-RTs beider Ohren lagen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, bei 666–1.700 ms. Es zeigten sich vereinzelt stärkere Unterschiede in den Hit-RTs zwischen den stimulierten Ohren in der Einzelanalyse der Versuchspersonen (max. Differenz zwischen linkem und rechtem Ohr: 417 ms; s. Abbildung 33a). Vergleicht man nun die gemittelten Hit-RTs aller Versuchspersonen zwischen beiden Ohren (s. Abbildung 33b) zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Hit-RTs nach der Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten (1.117 ± 91 ms) im Vergleich zum linken Ohr (997 ± 62 ms; T-Test: n.s.).

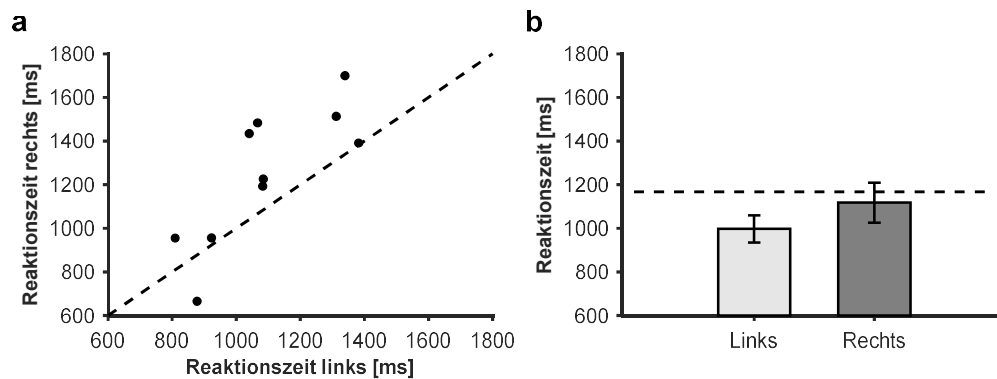


Abbildung 33: Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle mittlere Hit-RTs der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Hit-RTs ($n = 9$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Hit-RT. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der FM-Stimulus präsentiert wurde.

In Bezug auf die Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs keine Abhängigkeit von Alter, Geschlecht (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Ebenfalls konnte keine Abhängigkeit von der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, bei Fehlerraten und Hit-RTs, sowie den PSG-Indizes des FM-, NB- und CV-Stimulus gezeigt werden (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.). Auch bei der Analyse der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, bezüglich einer Korrelation der Fehlerraten und der verschiedenen Mittelfrequenzen des FM-Stimulus konnte keine Abhängigkeit gezeigt werden (Kruskal-Wallis-Test: n.s.).

2.2.3. Einfluss der Modulationsrichtung der FM-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Um eine mögliche Abhängigkeit der Fehlerraten und Hit-RTs von der Modulationsrichtung der FM-Stimuli zu untersuchen, wurden diese entsprechend des 15 %-Kriteriums analysiert. Betrachtet man die Fehlerraten der einzelnen Versuchspersonen separat für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli, zeigten sich vereinzelt große Unterschiede (max. Differenz: 24,0 %, s. Abbildung 34a). Die Hit-RTs der einzelnen Versuchspersonen waren dagegen für auf- und abwärts modulierte FM-Stimuli in einem vergleichbaren Rahmen (max. Differenz: 379 ms; s. Abbildung 34b). Im Mittel konnte kein signifikanter Unterschied in Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- (Fehlerrate: $24,7 \pm 3,4$ %; Hit-RTs: 1.024 ± 71 ms) und abwärts-modulierten FM-Stimuli (Fehlerrate: $18,8 \pm 3,2$ %; Hit-RTs: 1.061 ± 77 ms) gezeigt werden (jeweils T-Test: n.s.; s. Abbildung 34c und 34d).

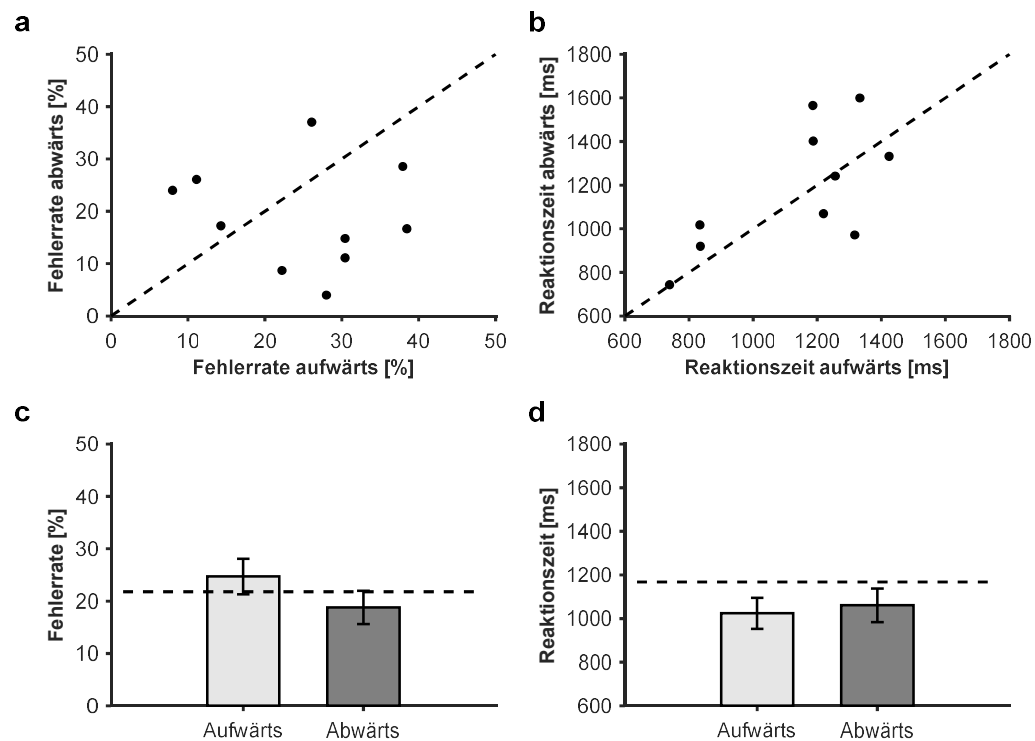


Abbildung 34: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen auf- und abwärts-modulierten FM-Stimuli während der Unterscheidung der Modulationsrichtung basierend auf dem 15 %-Kriterium. Dargestellt sind (a) die individuellen Fehlerraten und (b) die individuellen mittleren Hit-RTs der Versuchspersonen für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli im Vergleich. Dabei ist jeweils die Linie „abwärts = aufwärts“ als gestrichelte Diagonale gezeigt. In (c) sind die mittleren Fehlerraten ($n = 10$) und in (d) die mittleren Hit-RTs ($n = 10$) für auf- und abwärts-modulierte FM-Stimuli im Vergleich dargestellt. Die gestrichelte waagrechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimuli gemittelte Fehlerrate bzw. Hit-RT.

Zudem konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs in Bezug auf die Modulationsrichtung der FM-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht, Alter (jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.) und Händigkeit (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Auch bei der Analyse der Modulationsrichtung in Abhängigkeit der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, konnte keine Korrelation bei Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.). Ebenso konnte keine Korrelation zwischen der Seite, auf der der FM-Stimulus präsentiert wurde, und der Modulationsrichtung in Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.).

Zusammenfassend zeigte sich, dass ein sinkender Schalldruckpegel des FM-Stimulus mit einer steigenden Fehlerrate einhergeht. Da die Einzeldaten der Versuchspersonen sehr unterschiedliche Sensitivitätsschwellen aufwiesen, war es für die Untersuchung der Lateralität notwendig, die Daten aller Versuchspersonen unter Anwendung des 15 %-Kriteriums zu vergleichen. Hier zeigte sich ein Trend zu niedrigeren Fehlerraten und bei einer Präsentation des FM-Stimulus auf dem linken Ohr im Vergleich mit der Präsentation des FM-Stimulus auf dem rechten Ohr. Für die Hit-RTs ließ sich kein vergleichbarer Effekt erkennen.

2.3. Experiment 4: CV-Silben „da“ und „ga“

2.3.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten

In Experiment 4, der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“, lag die Mehrheit (64,54 %) aller Hit-RTs über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 600 ms und 1.000 ms. Dies ergab eine mittlere Antwortschnelligkeit von $1,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Median; Q1: $0,93 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, Q3: $1,50 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; Bereich: $0,18 \cdot 10^{-3}$ – $7,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; s. Abbildung 35).

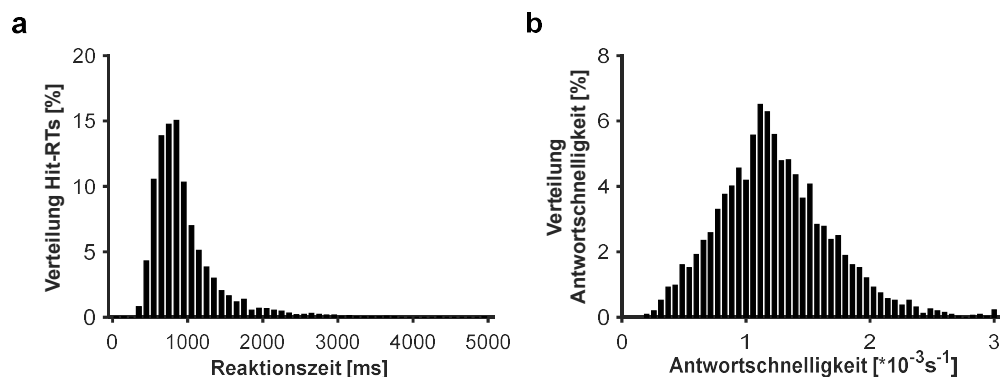


Abbildung 35: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messungen und Versuchspersonen (n = 23) während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“. (a) Prozentuale Verteilung der Hit-RTs. Hit-RTs < 50 ms werden unter „100“ und Hit-RTs > 5.000 ms unter „5.000“ auf der x-Achse zusammengefasst. (b) Prozentuale Verteilung der Antwortschnelligkeit der Hit-RTs. Antwortschnelligkeit < $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ wird unter „ $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ und Antwortschnelligkeit > $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ unter „ $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ auf der x-Achse zusammengefasst.

Betrachtet man alle Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus, lässt sich ein differenzierteres Bild erkennen. Die mittleren Hit-RTs lagen über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 475 ms und 1.868 ms (s. Abbildung 36a), wobei die Einzelkurven unterschiedliche Verläufe aufwiesen. Im Mittel zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied der Hit-RTs für die unterschiedlichen Schalldruckpegel des CV-Stimulus von 65–35 dB SPL (max. Differenz: 288 ms; Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 36b). Bei einem Schalldruckpegel des CV-Stimulus von 30 dB SPL war die mittlere Hit-RT mit 617 ms zwar erkennbar geringer als die mittlere Hit-RT der anderen Schalldruckpegel des CV-Stimulus, allerdings wurde diese Messung nur bei 2 Versuchspersonen mit konstant geringen Hit-RTs durchgeführt.

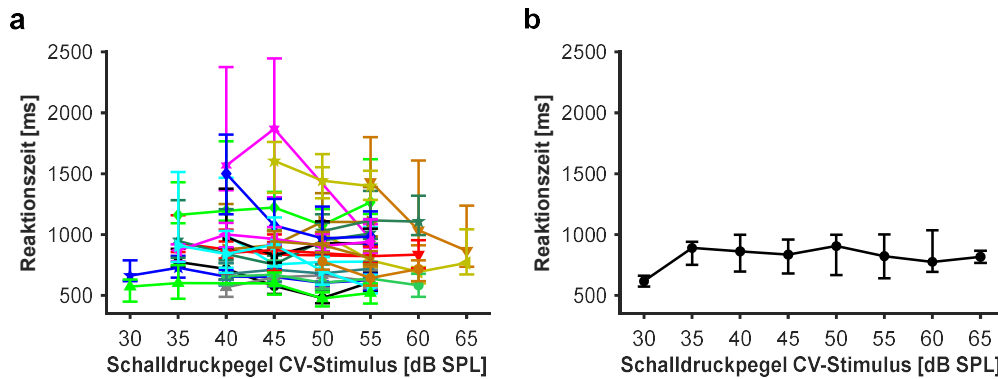


Abbildung 36: Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; $n = 23$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus.

Die Fehlerraten der Versuchspersonen stiegen zwar mit sinkendem Schalldruckpegel grundsätzlich an (s. Abbildung 37a), zeigten jedoch zum Teil starke Unterschiede. Diese waren bei einem Großteil bedingt durch eine Verschiebung der individuellen Kurven entlang der Schalldruckpegel des CV-Stimulus (s. Abbildung 37a). Besonders auffallend dabei ist, dass bei zwei Versuchspersonen höhere Schalldruckpegel des CV-Stimulus als des NB-Stimulus verwendet werden mussten, um eine Fehlerrate unter 15 % zu erhalten. Der allgemeine Verlauf einer steigenden Fehlerrate mit sinkendem Schalldruckpegel des CV-Stimulus war jedoch auch der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen, vor allem ab 50 dB SPL, erkennbar (Kruskal-Wallis-Test: $df = 7/87$; $\chi^2 = 33,92$; $p = 1,79 \cdot 10^{-5}$; s. Abbildung 37b).

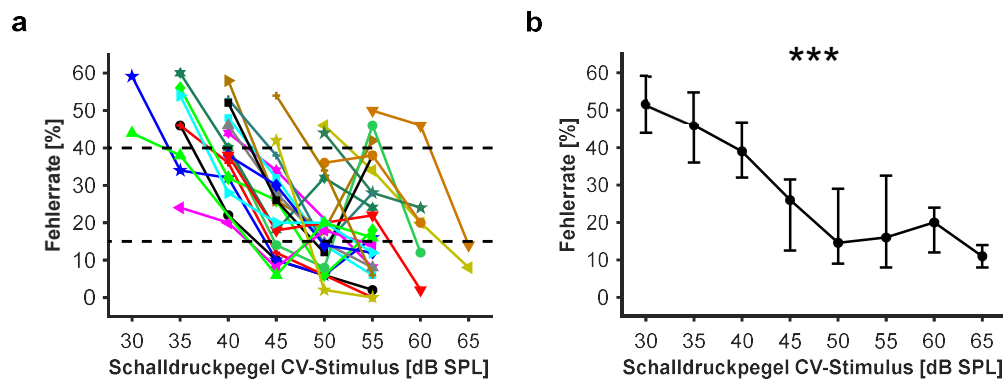


Abbildung 37: Fehllerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“. (a) Fehllerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). Die obere gestrichelte Linie zeigt die 40 %-Schwelle und die untere gestrichelte Linie die 15 %-Schwelle an. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Grenzen wurden die Daten nicht weiter in Analysen einbezogen. (b) Mittlere Fehllerrate (Median; $n = 23$) für alle Schalldruckpegel des CV-Stimulus.

Um eine mögliche lateralisierte Verarbeitung bei der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ zu untersuchen, wurden die Fehllerraten und Hit-RTs in Abhängigkeit des Ohres, auf dem der CV-Stimulus präsentiert worden ist, ausgewertet. Betrachtet man die Differenz der Fehllerraten zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus, zeigte sich auch hier wieder eine hohe Streuung zwischen den einzelnen Versuchspersonen (Bereich: $-42,0$ – $39,7$ %). Tendenzen für den Vorteil eines Ohres ließen sich nur bei einzelnen Versuchspersonen ausmachen (s. Abbildung 38a). In der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen zeigte sich eine Tendenz zu einer linken EA, jedoch gab es keine signifikante Änderung über den Verlauf der Schalldruckpegel des CV-Stimulus (1-Faktor-ANOVA: n.s.; s. Abbildung 38b).

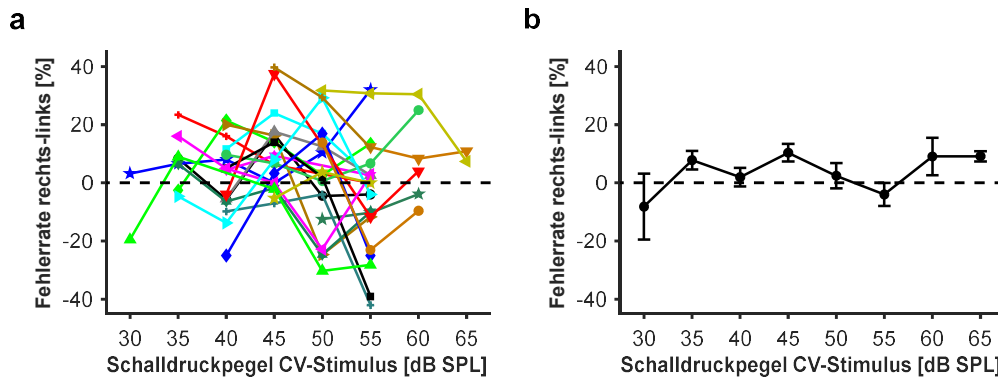


Abbildung 38: Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Fehlerrate (n = 23) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Fehlerrate von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

Für die Differenz der medianen Hit-RTs zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus ließ sich allerdings weder in den Einzelkurven der Versuchspersonen (Bereich: -522–314 ms; s. Abbildung 39a) noch im Verlauf der medianen Hit-RTs ein klarer Vorteil eines Ohres erkennen (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 39b).

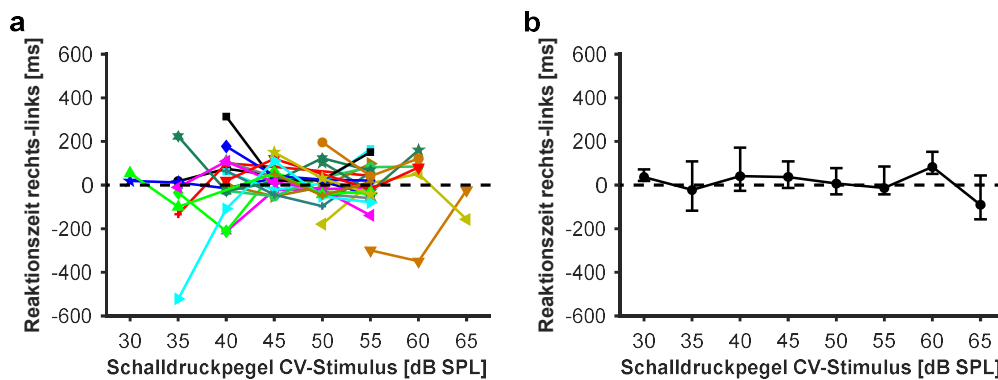


Abbildung 39: Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; n = 23) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

2.3.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Die Daten aller Versuchspersonen wurden auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel unter Anwendung des 15 %-Kriteriums analysiert. Von insgesamt 23 Versuchspersonen erreichten jeweils 3 das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 60 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $21,2 \pm 1,3$ %) und von 40 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $30,0 \pm 4,2$ %). 2 Versuchspersonen erreichten das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 55 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $2,00 \pm 4,0$ %), 4 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 50 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $22,5 \pm 3,9$ %) und 8 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 45 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $29,0 \pm 32,1$ %). 3 Versuchspersonen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da die hier gemessenen Fehlerraten nicht im Bereich von 15–40 % lagen (s. Abbildung 37a). Die nun weiter analysierten Messungen von 20 Versuchspersonen hatten eine mittlere Fehlerrate von $25,8 \pm 1,4$ %.

Auch bei der Analyse der Daten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums fiel auf, dass die Fehlerraten, sowohl zwischen Versuchspersonen als auch im Vergleich zwischen den Ohren, variierten. Von 20 Versuchspersonen zeigten 12 konsistent höhere Fehlerraten bei einer Präsentation des CV-Stimulus auf dem rechten, im Vergleich zum linken Ohr. Dagegen zeigten die weiteren 8 Versuchspersonen konsistent höhere Fehlerraten bei einer Präsentation des CV-Stimulus auf dem linken, im Vergleich zum rechten Ohr. (s. Abbildung 40a). Im Vergleich der gemittelten Fehlerraten aller Versuchspersonen zwischen beiden Ohren (s. Abbildung 40b) zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen der Präsentation des CV-Stimulus auf dem rechten Ohr ($28,8 \pm 2,9$ %) im Vergleich zum linken ($22,7 \pm 2,3$ %; T-Test: n.s.).

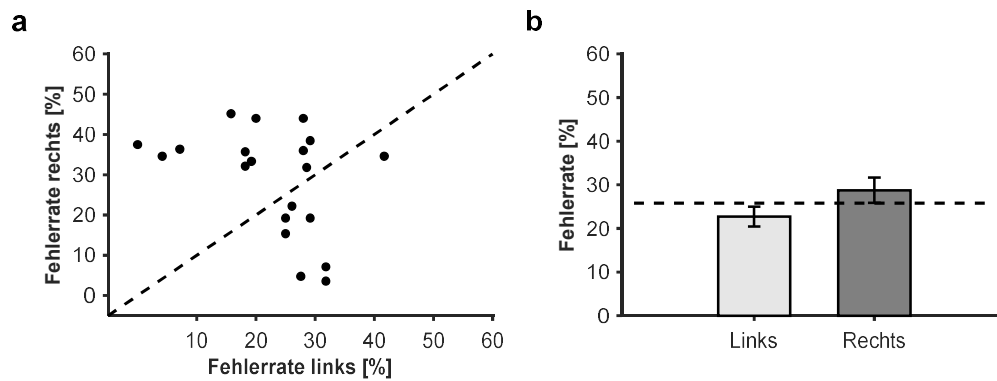


Abbildung 40: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle Fehlerraten der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Fehlerrate (n = 20) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der CV-Stimulus präsentiert wurde.

Die Hit-RTs für beide Ohren lagen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, bei 509–1.886 ms. Es zeigten sich keine Unterschiede der Hit-RTs zwischen den stimulierten Ohren, sowohl in der Einzelanalyse der Versuchspersonen (max. Differenz zwischen linkem und rechtem Ohr: 161 ms; s. Abbildung 41a) als auch im Mittel zwischen linkem (Median: 810 ms, Q1: 673 ms, Q3: 1.013 ms) und rechtem Ohr (Median: 867 ms, Q1: 708 ms, Q3: 1.070 ms; Wilcoxon Paarvergleichstest: n.s.; s. Abbildung 41b).

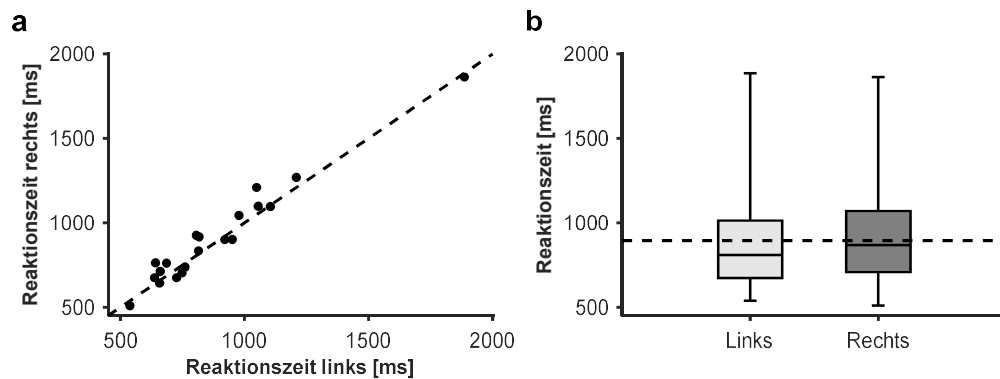


Abbildung 41: Vergleich der medianen Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle mediane Hit-RTs der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Hit-RTs (Median; $n = 20$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Hit-RT. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der CV-Stimulus präsentiert wurde.

In Bezug auf die Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs keine Abhängigkeit von Alter, Geschlecht (Fehlerrate: jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.; Hit-RTs: jeweils Kruskal-Wallis-Test: n.s.) und Händigkeit (Fehlerrate: Pearson-Korrelation: n.s.; Hit-RTs: Spearman-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Ebenfalls konnte keine Abhängigkeit von der Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, bei Fehlerraten und Hit-RTs sowie den PSG-Indizes der FM-, NB- und CV-Stimuli gezeigt werden (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.).

2.3.3. Einfluss der Art der CV-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Um eine mögliche Abhängigkeit der Fehlerraten und Hit-RTs von der Art des CV-Stimulus selbst zu untersuchen, wurden diese entsprechend des 15 %-Kriteriums analysiert. Betrachtet man die Fehlerraten der einzelnen Versuchspersonen separat für „da“- und „ga“-Stimuli, zeigten sich vereinzelt große Unterschiede (max. Differenz: 50,6 %; s. Abbildung 42a). Auch die Hit-RTs der einzelnen Versuchspersonen zeigten hohe Unterschiede für die beiden CV-Stimuli auf (max. Differenz: 736 ms; s. Abbildung 42b).

Im Mittel konnte jedoch kein signifikanter Unterschied in Fehlerraten zwischen „da“- (Median: 19,7 %, Q1: 8,7 %, Q3: 32,1 %) und „ga“-Stimuli (Median: 37,1 %, Q1: 4,2 %, Q3: 43,1 %) gezeigt werden (Wilcoxon Paarvergleichstest: n.s.; s. Abbildung 42c). Jedoch waren im Mittel die Hit-RTs der „da“-Stimuli (Median: 857 ms, Q1: 709 ms, Q3: 1.028 ms) signifikant geringer als die Hit-RTs der „ga“-Stimuli (Median: 863 ms, Q1: 653 ms, Q3: 1.001 ms; Wilcoxon Paarvergleichstest: $Z = 2,09$, $S = 161$, $n = 20$, $p = 0,0366$; s. Abbildung 42d).

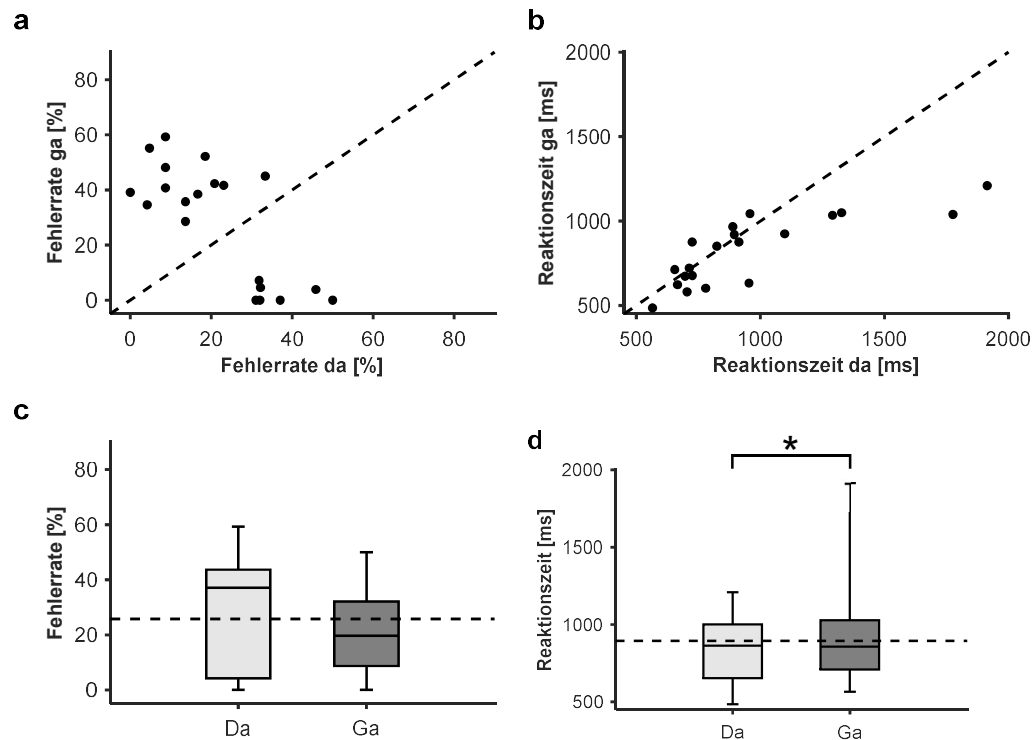


Abbildung 42: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen „da“- und „ga“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium. Dargestellt sind (a) die individuellen Fehlerraten und (b) die individuellen medianen Hit-RTs der Versuchspersonen für „da“- und „ga“-Stimuli im Vergleich. Dabei ist jeweils die Linie „da = ga“ als gestrichelte Diagonale gezeigt. In (c) sind die gemittelten Fehlerraten (Median; $n = 20$) und in (d) die mittleren Hit-RTs (Median; $n = 20$) dargestellt. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimuli gemittelte Fehlerrate bzw. Hit-RT.

Zudem konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs in Bezug auf die Art der CV-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht, Alter (jeweils Kruskal-Wallis-Test: n.s.) und Händigkeit (jeweils Spearman-Korrelation: n.s) der Versuchspersonen gezeigt werden. Auch bei der Analyse der Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, konnte in Bezug auf die Art des CV-Stimulus keine Korrelation in der Fehlerrate festgestellt werden (Spearman-Korrelation: n.s.). Allerdings hingen die Hit-RTs für die Art des CV-Stimulus von der Seite ab, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde (Spearman-Korrelation: $r = 0,5789$, $n = 20$, $p = 0,0086$). Das bedeutet, dass im Mittel die Differenz der Hit-RTs der CV-Stimuli („da“-„ga“) signifikant höher war, wenn diese auf dem linken, im Vergleich zum rechten Ohr, präsentiert wurden. Jedoch war im Mittel die Hit-RT für „ga“-Stimuli immer höher, als die Hit-RT für „da“-Stimuli. Bei der Analyse der Art des CV-Stimulus in Abhängigkeit der Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, konnte keine Korrelation bei Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.).

2.3.4. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen

Versuchsperson 6987 (◀) gab an, dass sie zwar „sehr gut in dem Erkennen und Nachahmen von Sprachmelodien sei, manchmal aber Probleme beim Sprachverständnis“ habe und hier auch „na“ anstatt „da“ verstanden habe. In der Datenanalyse konnten diesbezüglich jedoch keine besonderen Beobachtungen gemacht werden.

Zusammenfassend zeigte sich, dass ein sinkender Schalldruckpegel des CV-Stimulus mit einer steigenden Fehlerrate einhergeht. Für die Hit-RTs ließ sich kein vergleichbarer Effekt erkennen. Da die Einzeldaten der Versuchspersonen sehr unterschiedliche Sensitivitätsschwellen zeigten, war es für die Untersuchung der Lateralität notwendig, die Daten aller Versuchspersonen unter dem 15 %-Kriterium zu vergleichen. Allerdings ließ sich weder in den Fehlerraten noch in den Hit-RTs der Vorteil eines Ohres nachweisen.

2.4. Experiment 5: CV-Silben „ta“ und „ka“

2.4.1. Allgemeine Analyse der Hit-RTs und Fehlerraten

In Experiment 5, der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“, lag die Mehrheit (62,06 %) aller Hit-RTs über alle Messblöcke und Versuchspersonen hinweg zwischen 700 ms und 1.000 ms. Dies ergab eine mittlere Antwortschnelligkeit von $1,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (Median; Q1: $1,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, Q3: $1,50 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; Bereich: $0,18 \cdot 10^{-3}$ – $2,90 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; s. Abbildung 43).

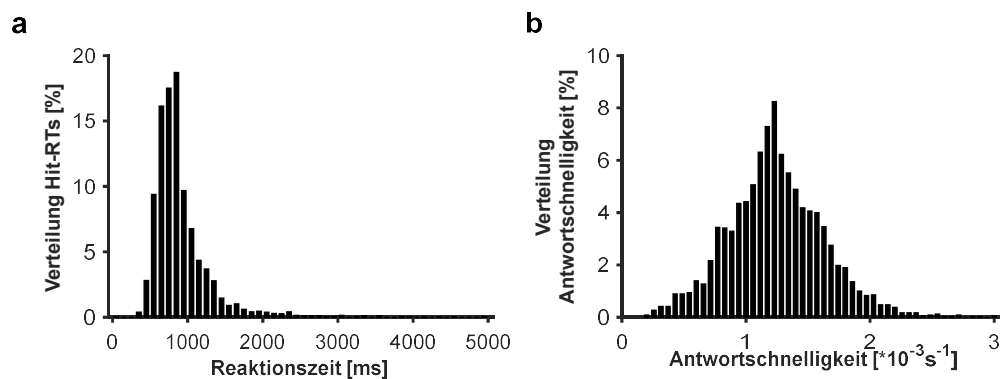


Abbildung 43: Prozentuale Verteilung aller Hit-RTs bzw. der daraus berechneten Antwortschnelligkeit für alle Messblöcke und Versuchspersonen (n = 19) während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“. (a) Prozentuale Verteilung der Hit-RTs. Hit-RTs < 50 ms wurden unter „100“ und Hit-RTs > 5.000 ms unter „5.000“ auf der x-Achse zusammengefasst. (b) Prozentuale Verteilung der Antwortschnelligkeit der Hit-RTs. Antwortschnelligkeit < $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ werden unter „ $0,20 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ und Antwortschnelligkeit > $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ unter „ $3,00 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ “ auf der x-Achse zusammengefasst.

Betrachtet man alle Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus, lässt sich ein genaueres Bild erkennen. So lagen die mittleren Hit-RTs über alle Messungen und Versuchspersonen hinweg zwischen 491 ms und 1.681 ms (s. Abbildung 44a), wobei die Einzelkurven unterschiedliche Verläufe aufwiesen. Im Mittel zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied der Hit-RTs für die unterschiedlichen Schalldruckpegel des CV-Stimulus (max. Differenz: 125 ms; Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 44b).

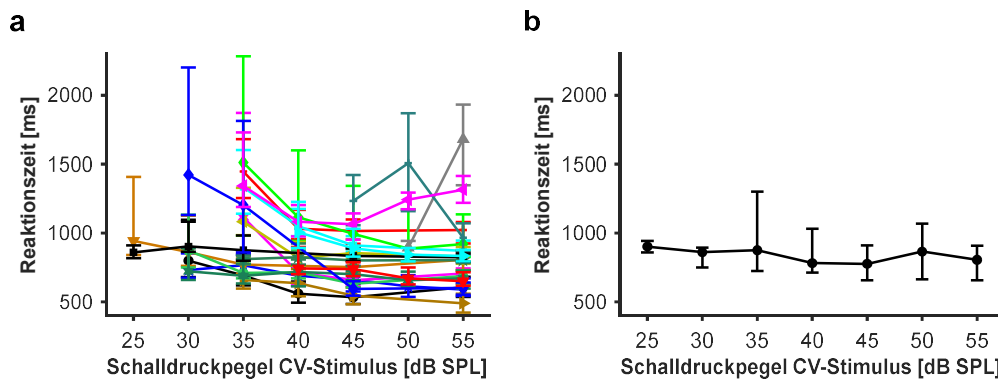


Abbildung 44: Mediane Hit-RTs in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; n = 19) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus.

Die Fehlerraten der Versuchspersonen stiegen zwar mit sinkendem Schalldruckpegel grundsätzlich an (s. Abbildung 45a), zeigten jedoch zum Teil starke Unterschiede. Diese waren bei einem Großteil bedingt durch eine Verschiebung der individuellen Kurven entlang der Schalldruckpegel des CV-Stimulus (s. Abbildung 45a). So war der allgemeine Verlauf einer steigenden Fehlerrate mit sinkendem Schalldruckpegel des CV-Stimulus auch der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen, besonders prägnant unterhalb von 45 dB SPL, erkennbar (Kruskal-Wallis-Test: $df = 6/76$, $\chi^2 = 46,50$, $p = 0,2522 \cdot 10^{-7}$; s. Abbildung 45b).

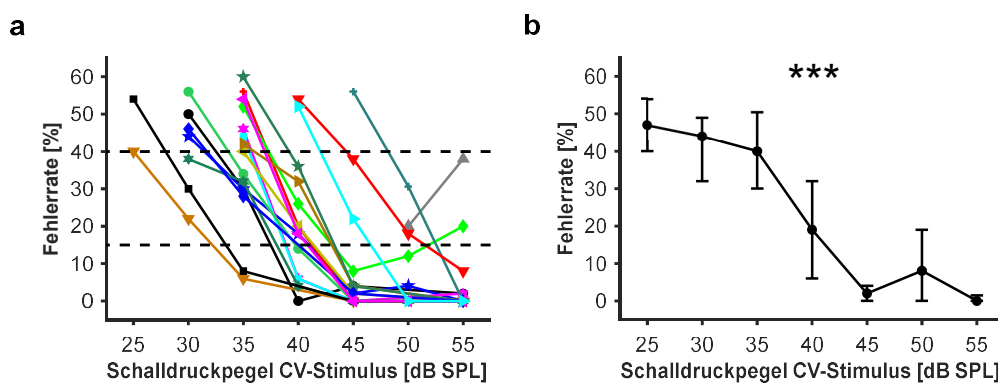


Abbildung 45: Fehlerrate in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). Die obere gestrichelte Linie zeigt die 40 %-Schwelle und die untere gestrichelte Linie die 15 %-Schwelle an. Oberhalb bzw. unterhalb dieser Grenzen wurden die Daten nicht weiter in Analysen einbezogen. (b) Mittlere Fehlerrate (Median; n = 19) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus.

Um eine mögliche lateralisierte Verarbeitung bei der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ zu untersuchen, wurden die Fehlerraten und Hit-RTs in Abhängigkeit des Ohres, auf dem der CV-Stimulus präsentiert worden ist, ausgewertet. Betrachtet man die Differenz der Fehlerraten zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus, zeigte sich auch hier wieder eine große Streuung zwischen den einzelnen Versuchspersonen (Bereich: -26,9–47,6 %). Bei den meisten Versuchspersonen war jedoch ein Trend zu einer linken EA erkennbar (s. Abbildung 46a). Auch in der gemittelten Kurve aller Versuchspersonen zeigte sich eine Tendenz zu einer linken EA, jedoch gab es keine signifikante Änderung der Differenz der Fehlerraten über den Verlauf der Schalldruckpegel des CV-Stimulus (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 46b).

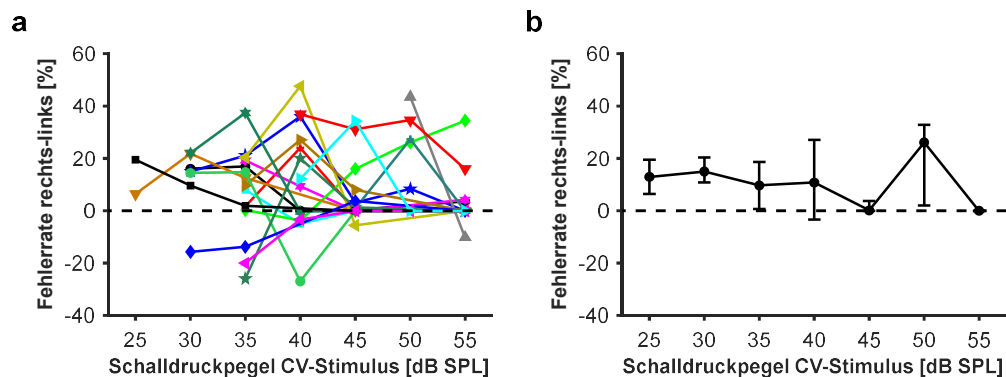


Abbildung 46: Differenz der Fehlerrate zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“. (a) Fehlerraten aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Fehlerrate (Median; n = 19) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Fehlerrate von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

Für die Differenz der Hit-RTs zwischen rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus ließ sich weder in den Einzelkurven der Versuchspersonen (Bereich: -547–882 ms; s. Abbildung 47a) noch im Verlauf der medianen Hit-RTs ein klarer Vorteil eines Ohres erkennen (Kruskal-Wallis-Test: n.s.; s. Abbildung 47b).

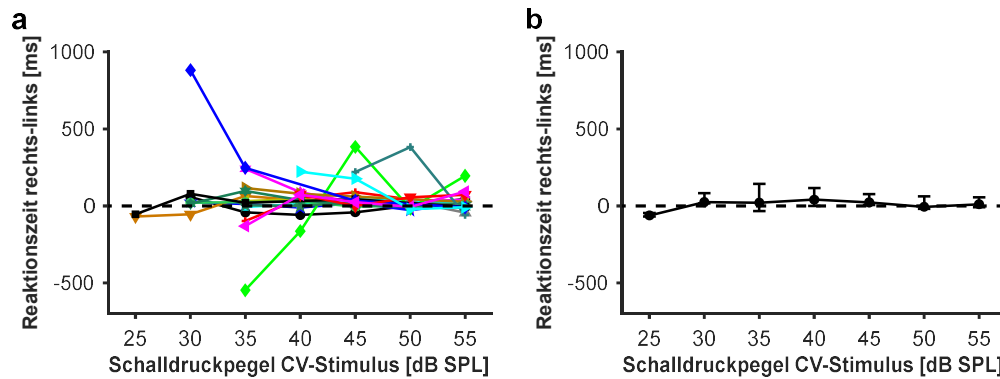


Abbildung 47: Differenz der medianen Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des CV-Stimulus während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“. (a) Mediane Hit-RTs aller Versuchspersonen bei 4–6 verschiedenen Schalldruckpegeln des CV-Stimulus, gezeigt als Einzelkurven (verschiedene Farben und Symbole). (b) Mittlere Hit-RT (Median; $n = 19$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des CV-Stimulus. Die gestrichelte Linie zeigt eine gleiche Hit-RTs von rechtem und linkem Ohr (Differenz = 0) an.

2.4.2. Lateralität der Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Die Daten aller Versuchspersonen wurden auf einem vergleichbaren Sensitivitätslevel unter Anwendung des 15 %-Kriteriums analysiert. Von insgesamt 19 Versuchspersonen erreichten 3 das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 50 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $22,9 \pm 3,9$ %). Eine Versuchsperson erreichte das 15 %-Kriterium bei einem Schalldruckpegel von 45 dB SPL (Fehlerrate: 22,0 %), 7 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 40 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $24,3 \pm 2,7$ %), 4 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 35 dB SPL (mittlere Fehlerrate $31,0 \pm 1,3$ %) und 2 Versuchspersonen bei einem Schalldruckpegel von 30 dB SPL (mittlere Fehlerrate: $26,0 \pm 4,0$ %). 2 weitere Versuchspersonen wurden von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da die hier gemessenen Fehlerraten nicht im Bereich von 15–40 % lagen (s. Abbildung 45a). Die nun weiter analysierten Messungen von 17 Versuchspersonen hatten eine mittlere Fehlerrate von $26,7 \pm 1,5$ %.

Auch bei der Analyse der Daten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums fiel auf, dass die Fehlerraten, sowohl zwischen Versuchspersonen als auch im Vergleich zwischen den Ohren, variierten. 14 von 17 Versuchspersonen zeigten jedoch höhere Fehlerraten für eine Präsentation des CV-Stimulus auf dem rechten, im Vergleich zum linken Ohr (s. Abbildung 48a). Ebenfalls zeigten die gemittelten Fehlerraten aller Versuchspersonen im Vergleich zwischen den Ohren (s. Abbildung 48b), dass die Fehlerrate für die Präsentation des CV-Stimulus auf dem rechten Ohr ($37,1 \pm 2,4$ %) signifikant höher war als auf dem linken ($15,1 \pm 2,8$ %; T-Test: $n = 17$, $T = 5,27$, $p = 7,63 \cdot 10^{-5}$).

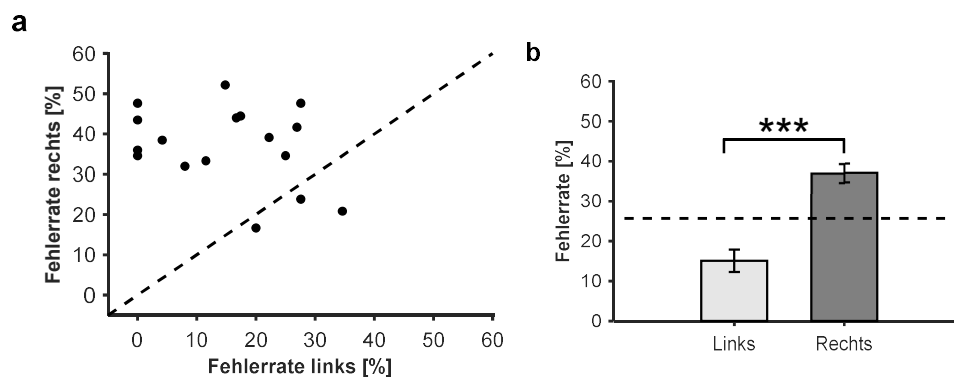


Abbildung 48: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle Fehlerraten der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Fehlerrate ($n = 17$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der CV-Stimulus präsentiert wurde.

Die Hit-RTs für beide Ohren lagen, unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, bei 618–1.721 ms, der maximale Unterschied zwischen beiden Ohren lag bei 382 ms (s. Abbildung 49a). Dabei waren im Mittel die Hit-RTs nach einer Präsentation des CV-Stimulus auf dem linken Ohr (Median: 859 ms, Q1: 691 ms, Q3: 1.001 ms) signifikant niedriger als auf dem rechten Ohr (Median: 865 ms, Q1: 714 ms, Q3: 1.078 ms; Wilcoxon Paarvergleichstest: $Z = 2,20$, $S = 123$, $n = 17$, $p = 0,0277$; s. Abbildung 49b).

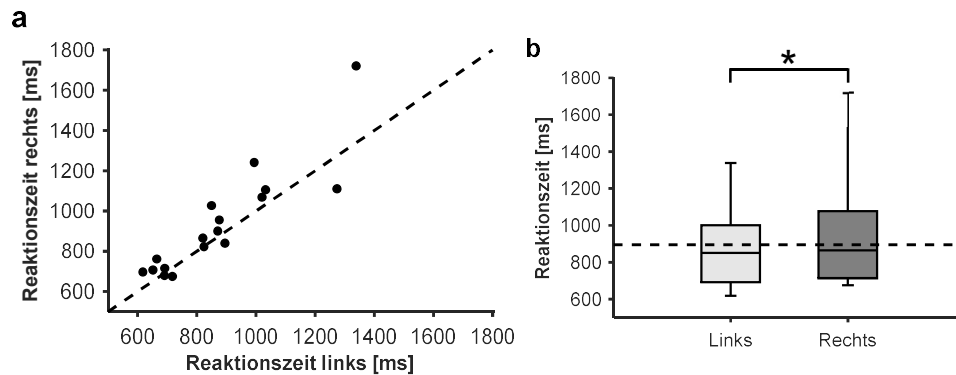


Abbildung 49: Vergleich der mittleren Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ basierend auf dem 15 %-Kriterium. (a) Individuelle mediane Hit-RTs der Versuchspersonen für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt. (b) Mittlere Hit-RTs (Median; $n = 17$) für linkes und rechtes Ohr im Vergleich. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Hit-RT. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der CV-Stimulus präsentiert wurde.

In Bezug auf die Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs keine Abhängigkeit von Alter, Geschlecht (Fehlerrate: jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.; Hit-RTs: jeweils Kruskal-Wallis-Test: n.s.) und Händigkeit (Fehlerrate: Pearson-Korrelation: n.s.; Hit-RTs: Spearman-Korrelation: n.s.) der Versuchspersonen gezeigt werden. Ebenfalls konnte keine Abhängigkeit von der Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, bei Fehlerraten und Hit-RTs sowie den PSG-Indizes der FM-, NB- und CV-Stimuli gezeigt werden (jeweils Pearson-Korrelation: n.s.).

2.4.3. Einfluss der Art der CV-Stimuli auf die Hit-RTs und Fehlerraten unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums

Um eine mögliche Abhängigkeit der Fehlerraten und Hit-RTs von der Art des CV-Stimulus selbst zu untersuchen, wurden diese entsprechend des 15 %-Kriteriums analysiert. Betrachtet man die Fehlerraten der einzelnen Versuchspersonen separat für „ta“- und „ka“-Stimuli, zeigten sich vereinzelt große Unterschiede (max. Differenz: 48,2 %; s. Abbildung 50a). Die Hit-RTs der einzelnen Versuchspersonen waren dagegen in einem vergleichbaren Rahmen (max. Differenz: 294 ms; s. Abbildung 50b).

Im Mittel waren sowohl die Fehlerraten als auch die Hit-RTs der „ta“-Stimuli (Fehlerrate: $31,4 \pm 2,5$ %; Hit-RTs: Median: 885 ms, Q1: 732 ms, Q3: 1.076 ms) signifikant höher als die Fehlerraten und Hit-RTs der „ka“-Stimuli (Fehlerrate: $18,4 \pm 3,3$ %; T-Test: $n = 17$, $T = 2,67$, $p = 0,0167$; Hit-RTs: Median: 837 ms, Q1: 682 ms, Q3: 1.028 ms; Wilcoxon Paarvergleichstest: $Z = 2,20$, $S = 123$; $n = 17$; $p = 0,0277$; s. Abbildung 50c und 50d).

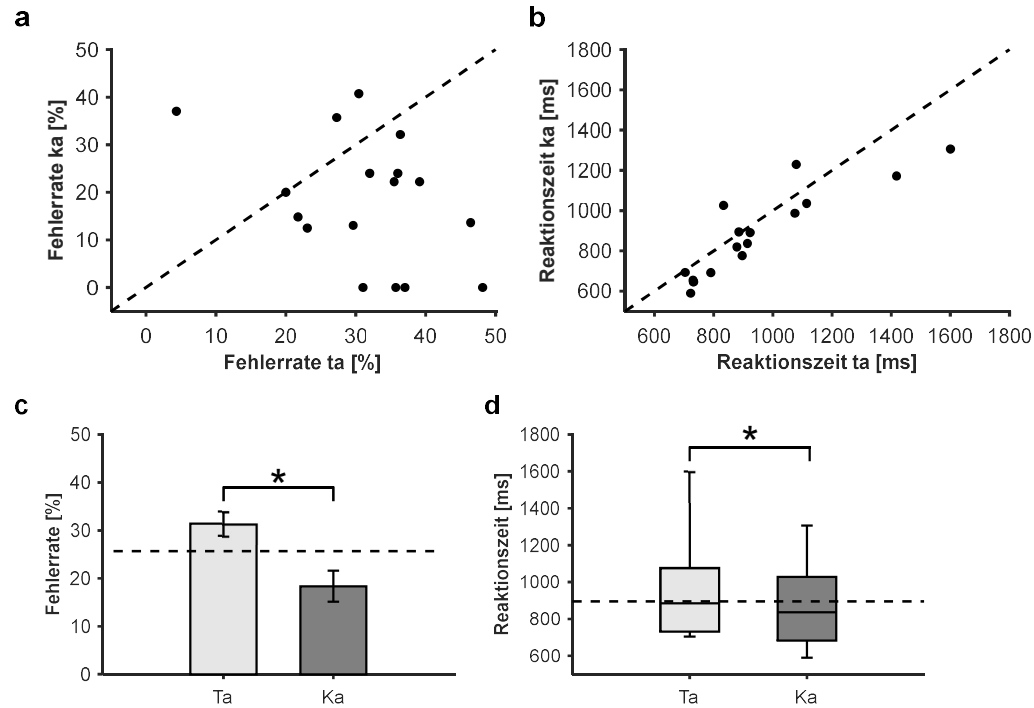


Abbildung 50: Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs zwischen „ta“- und „ka“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ basierend auf dem 15 %-Kriterium. Dargestellt sind (a) die individuellen Fehlerraten und (b) die individuellen medianen Hit-RTs der Versuchspersonen für „ta“- und „ka“-Stimuli im Vergleich. Dabei ist jeweils die Linie „ta = ka“ als gestrichelte Diagonale gezeigt. In (c) sind die mittleren Fehlerraten ($n = 17$) und in (d) die mittleren Hit-RTs (Median; $n = 17$) für „ta“- und „ka“-Stimuli im Vergleich dargestellt. Die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate bzw. Hit-RT.

Zudem konnte in den Fehlerraten und Hit-RTs in Bezug auf die Art der CV-Stimuli kein Zusammenhang mit Geschlecht, Alter (Fehlerrate: jeweils 1-Faktor-ANOVA: n.s.; Hit-RTs: jeweils Kruskal-Wallis-Test: n.s) und Händigkeit (Fehlerrate: Pearson-Korrelation: n.s.; Hit-RTs: Spearman-Korrelation: n.s) der Versuchspersonen gezeigt werden.

Auch bei der Analyse der Art des CV-Stimulus in Abhängigkeit der Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, konnte keine Korrelation bei Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.). Ebenso konnte keine Korrelation zwischen der Seite, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde, und der Art des CV-Stimulus in Fehlerraten und Hit-RTs gezeigt werden (jeweils Spearman-Korrelation: n.s.).

2.4.4. Abgleich der Messdaten mit Aussagen der Versuchspersonen

Versuchsperson 6986 (◆) erklärte, dass sie „links eher „ta“ und rechts eher „ka““ gehört habe. Da die Präsentation der CV-Stimuli zufällig auf beiden Ohren erfolgte, konnte diese Angabe nicht bestätigt werden.

Versuchsperson 7169 (▶) gab an, dass ihr die Identifikation von „ka“ leichter fiel als „ta“. Dies zeigte sich auch in den Daten der Messung unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums. Hier lag die Fehlerrate für „ta“-Stimuli bei 46,42 %, während diese für „ka“-Stimuli bei 13,64 % lag.

Versuchsperson 7579 (●) bemerkte, mehr „ka“ als „ta“ gehört zu haben. Da die CV-Stimuli zufällig auf beide Ohren verteilt wurden, konnte diese Angaben nicht bestätigt werden. Es konnte auch kein signifikanter Unterschied in den Fehlerraten für „ka“- und „ta“-Stimuli für diese Versuchsperson gefunden werden.

Für Versuchsperson 7878 (|) war eine Unterscheidung auf dem linken Ohr immer schwieriger als auf dem rechten Ohr. Die Datenanalyse zeigte jedoch eine klare linke EA für die Messung unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums (Differenz Fehlerrate rechts-links: 27,3 %). Für alle weiteren Messungen lag die Differenz der Fehlerrate unter 1 %.

Versuchsperson 6987 (▼) gab an, dass dieses Experiment das Einfachste dieser Versuchsreihe gewesen sei. Tatsächlich waren die Fehlerraten dieser Versuchsperson für dieses Experiment für alle Schalldruckpegel des CV-Stimulus deutlich niedriger im Vergleich mit Experiment 4. Im Vergleich mit Experiment 3 waren die Fehlerraten für vergleichbare Schalldruckpegel jedoch deutlich höher. Allerdings kann es hier zu einer anderen subjektiven Wahrnehmung der Versuchsperson gekommen sein, da die Fehlerraten pro Messung zwischen Experiment 3 und Experiment 5 nahezu identisch waren und eine Erhöhung des Schalldruckpegels nicht wahrgenommen wurde.

Zusammenfassend zeigte sich, dass ein sinkender Schalldruckpegel des CV-Stimulus mit einer steigenden Fehlerrate einhergeht. Für die Hit-RTs ließ sich kein vergleichbarer Effekt erkennen. Da die Einzeldaten der Versuchspersonen sehr unterschiedliche Sensitivitätsschwellen aufwiesen, war es für die Untersuchung der Lateralität notwendig, die Daten aller Versuchspersonen unter dem 15 %-Kriterium zu vergleichen. Hier zeigten sich signifikant niedrigere Fehlerraten und Hit-RTs bei Präsentation des CV-Stimulus auf dem linken Ohr, im Vergleich mit der Präsentation des CV-Stimulus auf dem rechten Ohr.

IV. Diskussion

1. Methodische Aspekte des dichotischen Versuchsparadigmas

1.1. PSG-Bestimmung

Notwendige Voraussetzung für das gewählte Unterscheidungsparadigma mit *kontralateralem* Rauschen war die PSG-Bestimmung bei jeder Versuchsperson. Damit konnte klar gezeigt werden, dass das generelle Hörvermögen der Versuchspersonen zwischen dem linken und rechten Ohr nicht unterschiedlich sensitiv war. Es können daher alle aufgezeigten Effekte auf die spezifische Unterscheidungsleistung der jeweiligen Seite des Hörsystems bzw. der Hemisphären zurückgeführt werden und nicht auf unterschiedliche Hörschwellen (Empfindlichkeit) der beiden Ohren.

Die PSG-Bestimmung selbst verlief, sowohl auf Seiten des Messsystems als auch auf Seiten der Versuchspersonen, ohne Schwierigkeiten. Allerdings ließ sich feststellen, dass die PSG-Bestimmung der einzelnen Stimuli zu unterschiedlichen Ergebnissen, auch der Indizes gleicher Versuchspersonen, führen können. So waren die ermittelten Indizes der NB-Stimuli am höchsten, die der CV-Stimuli am niedrigsten. Dies könnte daran liegen, dass sich bei den NB-Stimuli zusätzlich eventuelle geringe Unterschiede in der Hörschwelle außerhalb des Frequenzbereichs der Teststimuli auswirken können. Diese wurden als untergeordnet eingestuft und in der Studie nicht im Detail erfasst.

Zudem schwankten die PSG-Indizes der Versuchspersonen zwischen den Versuchsreihen (bei sechs Versuchspersonen und zwölf Index-Bestimmungen war die maximale Streubreite 8,9 dB) jedoch immer nur innerhalb des gesetzten Kriteriums von max. 5 dB Unterschied zwischen rechtem und linkem Ohr. Dies zeigt, dass das hier gesetzte Kriterium auch der auftretenden Varianz der Indizes entspricht.

In der ersten Versuchsreihe waren Frauen im Mittel auf dem rechten Ohr sensitiver als auf dem linken Ohr, bei Männern war dies umgekehrt. Frühere Studien deuten darauf hin, dass das rechte Ohr grundsätzlich sensitiver ist als das linke Ohr, jedoch wurde dieser Effekt bisher vor allem bei Männern beobachtet (s. z.B. Kannan und Lipscomb, 1974; Chung et al., 1983; McFadden, 1993). Auch spontane otoakustischen Emissionen, deren Messung in der Praxis zur Bestimmung der Hörfähigkeit genutzt werden, treten häufiger auf dem rechten Ohr auf (s. z.B. Bilger et al., 1990) und können dort, bei transitorisch evozierten otoakustischen Emissionen, auch höhere Amplituden anzeigen (s. z.B. Khalfa et al., 1998).

1.2. Unterscheidungsexperimente

Für alle fünf Unterscheidungsexperimente konnte anhand steigender (Gesamt-) Fehlerraten gezeigt werden, dass die Unterscheidungsaufgaben mit sinkendem Schalldruckpegel (der zu unterscheidenden Stimuli) signifikant schwerer wurden und damit typischem psychometrischen Verhalten entsprachen. Dies deckt sich auch mit den nach den Messungen getätigten Aussagen aller Versuchspersonen.

Für die Hit-RTs konnte ein solcher Zusammenhang jedoch nicht gezeigt werden. Auch in der weiteren Analyse gab es nur im Einzelfall signifikante Unterschiede in den Hit-RTs. Dies könnte daran liegen, dass die Versuchspersonen im Vorfeld keinerlei Anweisungen bezüglich der Reaktionsschnelligkeit oder Genauigkeit erhalten hatten, und sich (einzelne Versuchspersonen) damit eher auf eine möglichst geringe Fehler-rate konzentriert hatten. Zudem war das erlaubte Antwortfenster im Versuch verhältnismäßig lang im Vergleich zur typischen RT im akustischen Bereich von ca. 250 ms. Im unter-schweligen Bereich traten dabei sehr unterschiedliche Strategien auf: Ein Teil der Versuchspersonen nahm sich viel Zeit für die Entscheidung, andere trafen die für sie offensichtlich nicht lösbare Unterscheidung schnell (und zufällig).

Ebenso konnte aber auch in allen fünf Unterscheidungsexperimenten gezeigt werden, dass die Unterscheidungsschwellen zwischen den Versuchsperson, sowohl in der Fehlerrate als auch in den Hit-RTs, große Unterschiede aufwiesen. Daher lieferte auch eine Analyse der einzelnen Ohren an spezifischen Messpunkten, d.h. an festen Schalldruckpegeln des zu unterscheidenden Stimulus, nur selten eine Tendenz für den Vorteil eines Ohres. Eine gute Vergleichbarkeit zwischen Versuchspersonen ergab sich im Gegensatz dazu durch die Analyse unter dem 15 %-Kriterium, d.h. bei vergleichbarem Schwierigkeitsgrad. Die Wahl dieses Kriteriums selbst erwies sich als sehr geeignet. So konnten bei einer hohen Effektstärke immer genügend Daten für eine statistische Analyse herangezogen werden. Des Weiteren konnte bei einer Durchlaufzahl von fünfzig auch der Effekt einer versehentlich fälschlich abgegebenen Entscheidung („Taste wurde falsch bedient“) auf die Gesamtauswertung gering gehalten werden (eine einzelne falsche Entscheidung entspricht einer Änderung der Fehlerrate um 2 Prozentpunkte).

Die nach Vorversuchen gewählte Höhe des Schalldruckpegels des NB-Stimulus von 60 dB SPL bzw. 70 dB SPL erwies sich als geeignet. So war dieser für die meisten Versuchspersonen hoch genug gewählt, um den Schwierigkeitsgrad der Unterscheidung auf dem *kontralateralen* Ohr im psychometrischen Bereich zu halten, jedoch ohne Beeinträchtigungen der Hörleistung im Verlauf der Experimente oder im Anschluss hervorzurufen.

2. Einfluss der Unterscheidungsparameter: Modulationsrichtung vs. Stimulusdauer von FM-Stimuli (Erste Versuchsreihe)

2.1. Unterscheidung der FM-Modulationsrichtung (Experiment 1)

Für die Unterscheidung der Modulationsrichtung der FM-Stimuli waren die Fehleraten im Mittel höher, wenn der FM-Stimulus auf dem rechten Ohr präsentiert wurde. Diese generelle Tendenz einer linken EA war vor allem ab bzw. unter einem Schalldruckpegel des FM-Stimulus von 12,5 dB SPL zu erkennen. Betrachtet man nun die Fehlerraten aller Versuchspersonen unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, konnte eine klare linke EA gezeigt werden. Das bedeutet, dass unter der Anwesenheit eines *kontralateralen* Rauschens die Modulationsrichtung von den Versuchspersonen signifikant besser bestimmt werden konnte, wenn der FM-Stimulus auf dem linken Ohr präsentiert wurde.

Dies zeigt auf Verhaltensebene, dass die rechte Hemisphäre eine wichtige Rolle bei der Bestimmung/Verarbeitung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli spielt. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit einer Vielzahl von Studien am Menschen (s. z.B. Poeppel, 2004; Brechmann und Scheich, 2005; König et al., 2008) und an Tieren (s. z.B. Wetzel et al., 1998b; Rybalko et al., 2006), die eine essentielle Rolle der rechten Hemisphäre, bzw. des rechten AC, für die Unterscheidung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli zeigen. Zusätzlich dazu zeigte dieses Experiment, dass sich mit dieser psychophysischen Methode die Daten aus fMRT-Messungen mit vergleichbaren Parametern (s. Behne et al., 2005) verifizieren lassen. Damit ist klar, dass die erhöhte Aktivität in der rechten Hemisphäre (bzw. des rechten AC) auch von perceptueller Bedeutung ist.

Gleichzeitig konnte die Lateralisierung damit auch bei sehr unterschiedlichen Stimuluspegeln gezeigt werden. Bei den fMRT-Messungen wurden dabei FM-Stimuli mit hohen Schalldruckpegeln verwendet, um einen Effekt in den fMRT-Daten sichtbar zu machen. Dadurch war jedoch kein Effekt in den psychophysischen Daten zu erkennen. In diesem Experiment wurden dagegen schwellennahe Schalldruckpegel des FM-Stimulus verwendet, um einen psychophysischen Effekt sichtbar zu machen. Es konnte somit auf einer weiteren Beschreibungsebene gezeigt werden, dass es sich bei der Spezialisierung der rechten Hemisphäre wirklich um den FM-Erkennungsmechanismus handelt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine klare Dominanz der rechten Hemisphäre für die Unterscheidung der Modulationsrichtung von FM-Stimuli in den hier erhobenen Daten und in Einklang mit der aktuellen Literatur gezeigt werden konnte. Gleichzeitig konnte auch gezeigt werden, dass Messungen mit *kontralateralem* Rauschen, als spezielle Form des *dichotic-listening*, sehr gut geeignet sind, um eindeutige Ergebnisse in psychophysischen Experimenten zu erzielen.

2.2. Unterscheidung der FM-Stimulusdauer (Experiment 2)

Für die Unterscheidung der Stimulusdauer von FM-Stimuli waren die Fehlerraten im Mittel bei einigen Schalldruckpegeln des FM-Stimulus niedriger, wenn dieser auf dem linken Ohr präsentiert wurde. Diese Tendenz konnte jedoch nicht statistisch gefestigt werden. Auch die Analyse der Daten unter dem 15 %-Kriterium zeigte im Vergleich der Fehlerraten und Hit-RTs keinen Unterschied in der Unterscheidungsleistung zwischen beiden Ohren. Somit muss davon ausgegangen werden, dass beide Hemisphären für eine Unterscheidung der Stimulusdauer benötigt werden. Dieser Effekt war ebenso in der fMRT-Studie mit vergleichbaren Parametern von Behne et al. (2005) und auch in der Studie von Angenstein und Brechmann (2013a) zu erkennen, die eine Erhöhung der Aktivität sowohl in der rechten als auch linken Hemisphäre für die Unterscheidung von identischen Stimulusdauern zeigen konnten. Dass dieses Ergebnis auch mit anderen Stimulusdauern und durch das Vergleichen von Stimulusdauern erreicht werden kann, zeigen zum Beispiel die Studien von Mills und Rollman (1979) und List und Justus (2007).

Dass hier keine Lateralisierung bei der Unterscheidung der FM-Stimulusdauer gezeigt wurde, könnte aber auch daran liegen, dass weitere Einflussfaktoren die rechtsseitige Verarbeitung von FM-Stimuli überdecken. Um daher einen spezifischen Effekt des Paradimentyps (Kategorisierung und Vergleich) sowie der Stimulusart selbst näher zu untersuchen, wurden diese Parameter in einer Folgestudie (Alsakloul, 2018) gezielt untersucht. Die dort erhobenen Daten wurden für die vorliegende Arbeit nochmals mit den hier verwendeten Analyseparametern untersucht und werden hier im Vergleich diskutiert.

In der Studie wurden 20 Versuchspersonen in vier aufeinander folgenden Experimenten gemessen; der grundsätzliche Versuchsaufbau entsprach dabei dem dieser Arbeit. Das erste Experiment dieser Studie wurde äquivalent zu Experiment 2 dieser Arbeit durchgeführt und es ließ sich ein schwacher Trend für eine linke EA in den Fehlerraten erkennen (T-Test: $n = 17$, $T = 2,99$, $p = 0,0631$). Bei einer Betrachtung der einzelnen Fehlerraten unter dem 15 %-Kriterium fällt auf, dass 59 % der Versuchspersonen eine linke und 35 % eine rechte EA aufwiesen. Im zweiten Experiment der Folgestudie wurde ein Reinton als Stimulus präsentiert. Im dritten und vierten Experiment wurden für die beiden Reiztypen dann statt der Kategorisierung der Stimulusdauer ein *two-interval forced choice*-Paradigma verwendet, das bedeutet, dass immer zwei Stimuli nacheinander präsentiert wurden. Im Anschluss daran musste die Versuchsperson angeben, ob die Stimulusdauern der präsentierten Stimuli gleich oder verschieden waren. Als Stimuli wurden für das dritte Experiment FMs und für das vierte Experiment Reintöne verwendet. Für alle drei Experimente war jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Ohren zu erkennen (jeweils T-Test: n.s.).

Für das Kategorisieren von Reinton-Stimuli (zweites Experiment) lag auch ein nahezu ausgeglichenes Verhältnis von Versuchspersonen mit einer linken (47 %) und rechten EA (53 %) vor. Für das Vergleichen von Stimulusdauern im 2-AFC-Paradigma hingegen zeigte eine Mehrheit (63 %) der Versuchspersonen eine linke EA für Reinton-Stimuli (viertes Experiment), während das Verhältnis von Versuchspersonen mit einer linken (53 %) bzw. rechten EA (41 %) bei FM-Stimuli (drittes Experiment) auch nahezu ausgeglichen war.

Schlussfolgernd aus allen vier Experimenten lässt sich sagen, dass die Verarbeitung der Stimulusdauer, über die unterschiedlichen Stimulus- und Paradigmentypen hinweg, keine signifikanten Unterschiede in der Leistung beider Ohren und somit auch Hemisphären aufwies. Es war lediglich einmalig ein schwacher Trend für eine linke EA in den Fehlerraten und in den Prozentsätzen der Versuchspersonen erkennbar, was bedeuten kann, dass die rechte Hemisphäre eine stärkere Rolle in der Verarbeitung der hier verwendeten Stimulusdauern von 400 ms und 600 ms spielt.

Diese Erkenntnis fügt sich wiederum in die *asymmetric-sampling-theory* von Poeppel (2003), nach der Stimuli mit kurzer Dauer (< 50 ms) vorwiegend auf der linken Hemisphäre und Stimuli mit langer Dauer (> 150 ms) vorwiegend auf der rechten Hemisphäre verarbeitet werden. Diese Theorie wird auch z.B. durch die Studien von Inouchi et al. (2002), Belin et al. (2002), Nenadic et al. (2003) und Boemio et al. (2005) unterstützt. Da es aber auch zahlreiche Studien mit einer erhöhten Aktivität in der rechten Hemisphäre bzw. einer linken EA für Studien mit kurzer Stimulusdauer gibt (z.B. Schall et al., 2003; Molholm et al., 2005; De Sanctis et al., 2009), bleibt der Widerspruch zwischen dieser Theorie und den Erkenntnissen dieser Experimente.

Abschließend lässt sich feststellen, dass bei der Aufgabenstellung „Stimulusdauer“ für die Unterscheidung und Kategorisierung dieses Parameters von FM- und Reinton-Stimuli keine klare Dominanz einer Hemisphäre (Lateralisierung) erkennbar ist, dies entspricht dem Bild der zum Teil kontrovers geführten Diskussion in der aktuellen Literatur.

2.3. Vergleich von Richtungs- und Dauer-Unterscheidung von FM-Stimuli (Experiment 1 und Experiment 2)

Um eine Einordnung des Schwierigkeitsgrades der beiden Experimente zu treffen, kann sowohl die prozentuale Verteilung als auch die Antwortschnelligkeit der Hit-RTs betrachtet werden. Hierbei fällt auf, dass diese während der Richtungs-Unterscheidung deutlich niedriger als während der Dauer-Unterscheidung war (s. Abbildung 51b). Auch waren die Fehlerraten während der Richtungs-Unterscheidung deutlich niedriger als während der Dauer-Unterscheidung (s. Abbildung 51a). Zudem mussten die Schalldruckpegel des FM-Stimulus zu Beginn der Dauer-Unterscheidung viel höher gewählt werden, um vergleichbare Fehlerraten wie bei der Richtungs-Unterscheidung zu erhalten. Die Differenz der Fehlerraten zwischen beiden Experimenten sank erst für die zwei niedrigsten Schalldruckpegel des FM-Stimulus (7,5 dB SPL und 5 dB SPL) deutlich, da sich die Unterscheidungsleistung in beiden Experimenten in diesem Bereich dem Zufallsniveau (50 %) annäherte.

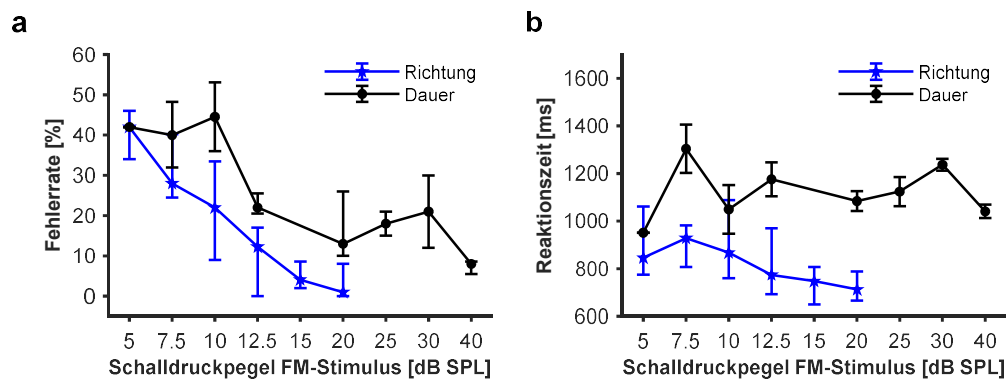


Abbildung 51: Vergleich der Schalldruckpegel-Abhängigkeit der mittleren Fehlerraten und Hit-RTs aller Versuchspersonen zwischen Richtungs- und Dauer-Unterscheidung. (a) Mittlere Fehlerrate (Median; $n = 10$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus für Richtungs- (blau) und Dauer- (schwarz) Unterscheidung. (b) Mittlere Hit-RT (Dauer: Mittelwert; Richtung: Median; $n = 10$) für alle gemessenen Schalldruckpegel des FM-Stimulus. Darstellung wie in (a).

Auch im Bereich des 15 %-Kriterium zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen beiden Experimenten. So konnten die Daten der Versuchspersonen im Richtungs-Experiment für Schalldruckpegel des FM-Stimulus im Mittel bei 10 dB SPL, im Dauer-Experiment jedoch im Mittel erst bei 20 dB SPL analysiert werden. Dies gesamt lässt darauf schließen, dass der Schwierigkeitsgrad für die Richtungs-Unterscheidung der FM-Stimuli deutlich geringer war als für die Dauer-Unterscheidung. Für den Unterscheidungsprozess an sich stellte eine Kategorisierung der Stimulusdauer in „kurz“ und „lang“ für die meisten Versuchspersonen auch eine größere Schwierigkeit dar, als eine Unterscheidung der Modulationsrichtung. Dies liegt darin begründet, dass es sich bei zuerst genanntem um eine persönliche Einschätzung jeder Versuchsperson handelte, die erst mit den vorhandenen Stimuli z.B. in der Trainingsmessung abgeglichen werden musste.

Die Reihenfolge der beiden Experimente machte keinen Unterschied. Somit kann davon ausgegangen werden, dass beide Experimente von den Versuchspersonen als eigenständig (nicht zusammenhängend) betrachtet wurden und keinen Einfluss, wie z.B. Lerneffekte, oder Übertragung von Aufgaben, aufeinander ausgeübt haben.

Vergleicht man beide Experimente unter dem Gesichtspunkt der Lateralität, kann man die Einzeldaten von 8 Versuchspersonen bei Messungen unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums heranziehen. So zeigte die Differenz der Fehlerraten zwischen rechtem und linkem Ohr, dass 38 % der Versuchspersonen eine konstante linke EA aufwiesen, alle anderen Versuchspersonen zeigten entgegengesetzte Werte für beide Experimente (linke EA für Richtungs-Unterscheidung und rechte EA für Dauer-Unterscheidung; s. Abbildung 52a). Für die Hit-RTs zeigten 37,5 % der Versuchspersonen eine rechte und 25 % eine linke EA über beide Experimente hinweg. Für 37,5 % der Versuchspersonen wechselte der Vorteil eines Ohres je nach Experiment (s. Abbildung 52b).

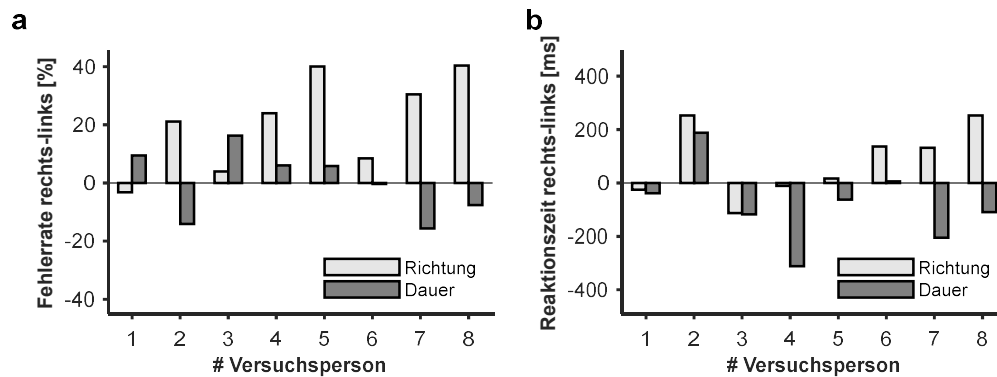


Abbildung 52: Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 8) zwischen Richtungs- und Dauer-Unterscheidung. Dargestellt sind die Differenzen zwischen rechtem und linkem Ohr nach Präsentation des FM-Stimulus für die Richtungs- (hellgrau) und Dauer- (dunkelgrau) Unterscheidung für (a) die Fehlerrate, (b) die Hit-RT.

Zusammenfassend zeigen beide Experimente, dass alleine ein unterschiedlicher Unterscheidungsparameter zu verschiedenen Lateralisierungsergebnissen führen kann. Zudem zeigte hier der Unterscheidungsparameter auch einen nachweislichen Einfluss auf den Schwierigkeitsgrad.

3. Einfluss der Stimulustypen: Analyse von Einzelparametern oder Spracheinheiten (Zweite Versuchsreihe)

3.1. Wiederholung der FM-Richtungs-Unterscheidung (Experiment 3)

Experiment 3 dieser Arbeit entsprach in seiner Struktur und Aufgabensstellung Experiment 1. Die Unterschiede lagen in der Auswahl und Anzahl der Versuchspersonen und der Messumgebung. Als Konsequenz der letzteren Variablen konnten deutlich geringere Fehlerraten, jedoch nicht Hit-RTs, in diesem Experiment gezeigt werden, so dass eine zusätzliche Messung mit lauterem NB-Stimulus angefügt wurde, um den Schwierigkeitsgrad zu erhöhen. Trotzdem konnten nur die Daten von 10 Versuchspersonen unter dem 15 %-Kriterium analysiert werden, da die Fehlerraten der verbleibenden 13 Versuchspersonen zum Großteil auch beim höchsten Schwierigkeitsgrad zu niedrig waren. Von einer weiteren Anpassung des Schwierigkeitsgrades wurde aus folgenden Gründen abgesehen: Ein noch lauterer NB-Stimulus wurde in Vorversuchen als unangenehm empfunden, die hohe „Lärm-belastung“ hätte möglicherweise das Gehör über die Dauer des Experiments beeinflusst. Die deutlich höheren Fehlerraten bei CV-Unterscheidungen (Experiment 4 und Experiment 5) zeigen außerdem, dass man die Erkennungsschwierigkeit nicht hätte generell erhöhen sollen. Wenn dies andererseits in diesem Experiment mit einem noch leiseren FM-Stimulus versucht worden wäre, hätte man sehr nahe an der absoluten Hörschwelle gemessen, wo wiederum individuelle Unterschiede zwischen Versuchspersonen sehr deutlich werden.

Im Gesamtvergleich der Fehlerraten und Hit-RTs für das rechte und linke Ohr war, im Gegensatz zum Experiment 1, keine klare Tendenz für den Vorteil eines Ohres zu erkennen. Auch hier gab es wieder starke Sensitivitätsunterschiede zwischen den einzelnen Versuchspersonen. Unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums konnte auch hier ein Trend zu einer linken EA in Fehlerrate und auch Hit-RTs gezeigt werden. Besonders beachtenswert ist dabei, dass eine linke EA für 80 % der Versuchspersonen in der Fehlerrate und sogar für 90 % der Versuchspersonen in den Hit-RTs gezeigt werden konnte. Somit hatten eine bzw. zwei Versuchspersonen einen erheblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Daten.

Versuchsperson 7169 (▲, weiblich, 29 Jahre, *Edinburgh Handedness Inventory* = 1, keine weiteren Auffälligkeiten) zeigte dabei eine rechte EA in Hit-RT- und Fehlerrate bei einer Gesamtfehlerrate von 16,0 %. Auffallend ist dabei, dass in den Messungen vor und nach der analysierten Messung eine linke EA zu beobachten war. Da diese Versuchsperson auch schon am Experiment 1 (hier als Versuchsperson 7574, ◀) teilgenommen hatte, ließ sich feststellen, dass sie dort unter dem 15 %-Kriterium eine klare linke EA gezeigt hatte.

Versuchsperson 7579 (|, männlich, 29 Jahre, *Edinburgh Handedness Inventory* = 0,73–1, keine weiteren Auffälligkeiten) zeigte in diesem Experiment eine rechte EA in der Fehlerrate, nicht jedoch in der Hit-RT, bei einer Gesamtfehlerrate von 16,0 %. Auch hier war aber für alle Messungen außerhalb des 15 %-Kriteriums eine linke EA erkennbar, wie auch in der Messung unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums in Experiment 1 (hier als Versuchsperson 7476, ▼).

Damit zeigte sich auch, dass die Leistung eines Ohres, sowohl innerhalb eines Experiments als auch zwischen zwei Messreihen, bei Versuchspersonen variieren können, wie auch Studien von z.B. Pizzamiglio et al. (1974), Blumstein et al. (1975) und Speaks und Niccum (1977) zeigen.

Um diesen Effekt genauer zu untersuchen, wurden die Daten der 4 weiteren Versuchspersonen, die sowohl an Experiment 1 als auch Experiment 3 teilgenommen haben, vergleichend analysiert. Als erstes fällt dabei auf, dass Versuchsperson 6970 (★, im ersten Experiment 6569, ●) in beiden Experimenten immer Fehlerraten unter 15,0 % aufwies und somit diese Daten nicht weiter analysiert werden konnten. Auch die Messungen von Versuchsperson 8588 (★, im ersten Experiment 7675, ►) konnten nicht unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums analysiert werden. Es zeigte sich jedoch auch hier in den Daten außerhalb des 15 %-Kriteriums eine linke EA, wie auch schon in Experiment 1, vor allem unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, gezeigt werden konnte. Die Versuchspersonen 6978 (★, im ersten Experiment 7077, ★) und 6982 (■, im ersten Experiment 8477, ▲) zeigten in beiden Experimenten, auch unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, eine klare linke EA. Somit lässt sich zeigen, dass zwar Unterschiede in den Leistungen eines einzelnen Ohres bei einer Versuchsperson auftreten können, diese aber hier nicht den Regelfall abbildeten. Dennoch müssen diese in die Verlässlichkeit der Messmethode mit einbezogen und mit anderen Methoden verglichen werden.

3.2. Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ (Experiment 4)

Für die Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ war in den Differenzen der Fehlerraten die Tendenz zu einer linken EA erkennbar. Diese lies sich jedoch nicht anhand der Datenanalyse unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums nachweisen. Dagegen zeigten sich klare Unterschiede für die Präsentation der verschiedenen CV-Silben in den Fehlerdaten der einzelnen Versuchspersonen und in der mittleren Hit-RT aller Versuchspersonen. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse der Lateralisierung auch von der Art der CV-Silben abhängen können. Dieser Effekt kann auf eine Stimulusdominanz hindeuten, wie sie ursprünglich für CV-Paare beim *dichotic-listening* beschrieben worden ist (s. z.B. Speaks et al., 1981, Voyer und Techentin, 2009). Das bedeutet, dass eine CV-Silbe aufgrund ihrer Stimuluseigenschaften öfter genannt wird, unabhängig davon auf welchem Ohr diese präsentiert wird.

Um diesen Effekt näher zu untersuchen und eine mögliche Strategie der einzelnen Versuchspersonen für diese Unterscheidungsexperimente herauszufinden, wurden die Versuchspersonen nach Abschluss des Experimentes dazu befragt. Dabei merkten 9 Versuchspersonen an, dass sie vorwiegend „da“ erkannt bzw. gehört hatten, 4 Versuchspersonen erklärten das Gleiche für „ga“. 10 weitere Versuchspersonen machten hierzu keine Angaben und wurden daher als „neutral“ („ne“) eingestuft.

Vergleicht man nun die Gruppen der „da“- , „ga“- und „ne“-Hörer, fallen in Bezug auf die Leistungen der Ohren für die Fehlerraten und Hit-RTs, unter Berücksichtigung des 15 % Kriteriums, große Unterschiede in den Einzelwerten der Versuchspersonen der drei Gruppen auf. So zeigten 88 % der „da“-Hörer eine linke EA (s. Abbildung 53a), auch im Mittel zeigte sich für die „da“-Hörer eine signifikant höhere Fehlerrate, wenn der CV-Stimulus auf dem rechten Ohr präsentiert wurde (T-Test: $n = 9$, $T = 3,51$, $p = 0,0099$; s. Abbildung 53b).

Im Gegensatz dazu zeigten 100 % der „ga“-Hörer eine rechte EA (s. Abbildung 53c) und somit war auch im Mittel die Fehlerrate höher bei Präsentation des CV-Stimulus auf dem linken Ohr (s. Abbildung 53d). Aufgrund der niedrigen Anzahl der Versuchspersonen (unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums: 3 Versuchspersonen) in dieser Gruppe konnte jedoch keine weitere Signifikanzanalyse durchgeführt werden. Bei den „ne“-Hörern war das Verhältnis der Fehlerraten nach Präsentation des CV-Stimulus auf dem rechten Ohr oder linken Ohr nahezu ausgeglichen (linke EA 56 %, rechte EA 44 %; s. Abbildung 53e). In Bezug auf die mittleren Fehlerraten der „ne“-Hörer konnte dagegen kein signifikanter Unterschied zwischen Präsentation auf dem rechten und linken Ohr gezeigt werden (T-Test: n.s.; s. Abbildung 53f).

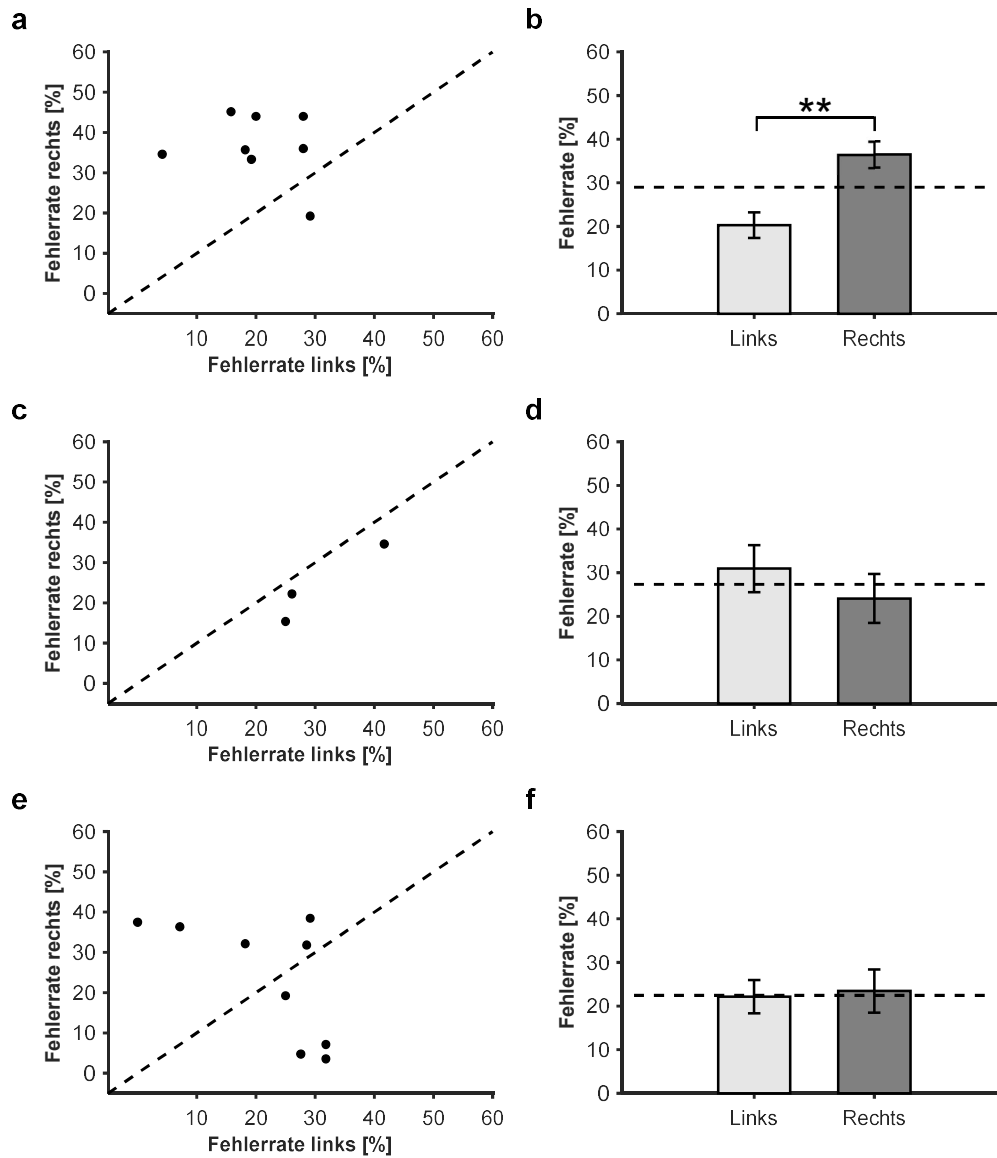


Abbildung 53: Vergleich der Fehlerraten zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“- , „ga“- und „ne“-Hörer. Dargestellt sind in der linken Spalte die individuellen Fehlerraten für linkes und rechtes Ohr im Vergleich (die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt) und in der rechten Spalte die mittleren Fehlerraten für linkes und rechtes Ohr im Vergleich (die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Fehlerrate). Untereinander sind die Ergebnisse für (a) und (b) die „da“-Hörer (n = 8), (c) und (d) die „ga“-Hörer (n = 3) und (e) und (f) die „ne“-Hörer (n = 9) dargestellt. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der CV-Stimulus präsentiert wurde.

Für die Hit-RTs zeigte sich in keiner der Gruppen, weder im Vergleich der Einzeldaten (s. Abbildung 54a, 54c, 54e), noch im Mittel (s. Abbildung 54b, 54d, 54f), ein signifikanter Unterschied zwischen rechtem und linkem Ohr („da“-Hörer: T-Test: n.s.; „ne“-Hörer: Wilcoxon-Paarvergleichstest: n.s.).

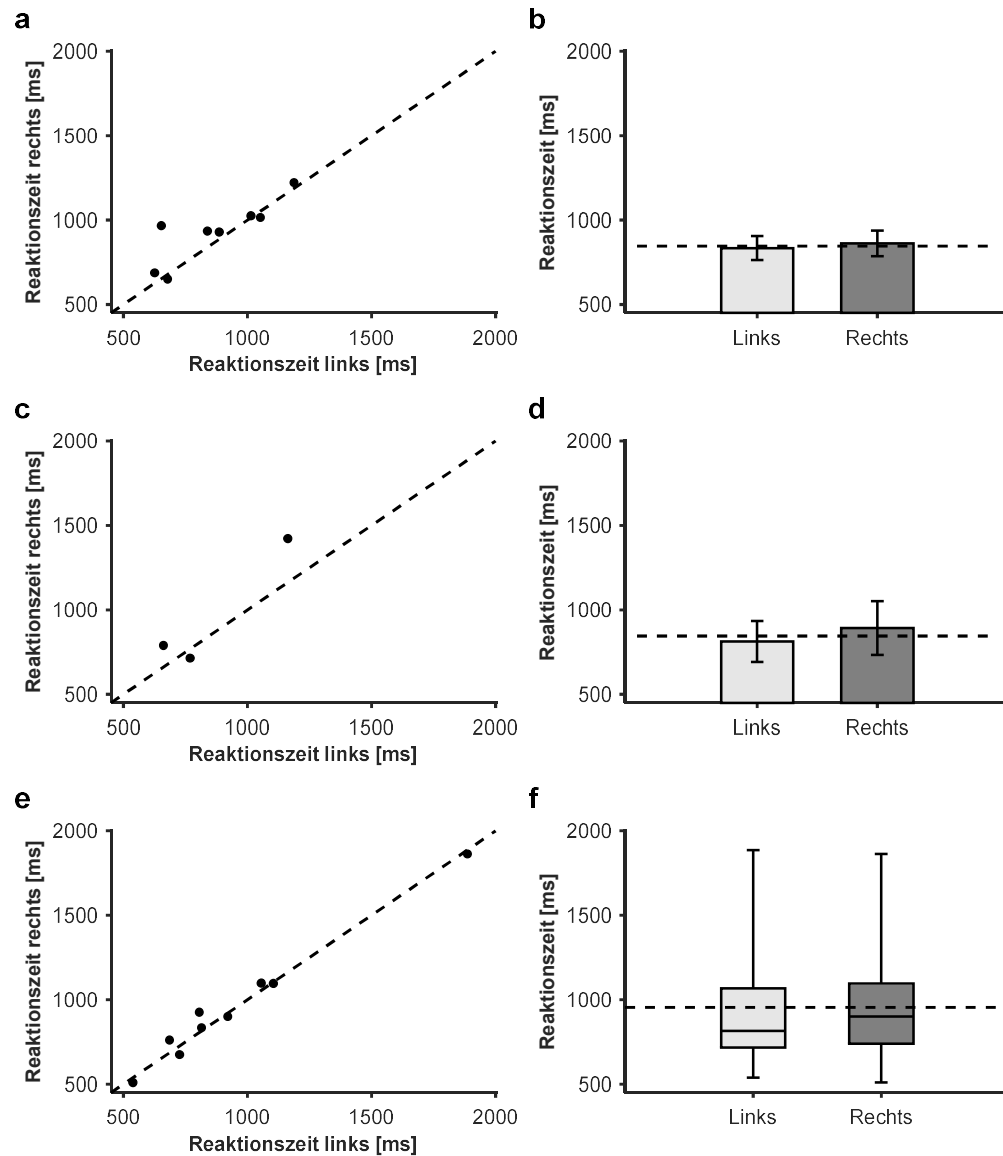


Abbildung 54: Vergleich der Hit-RTs zwischen linkem und rechtem Ohr während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“-, „ga“- und „ne“-Hörer. Dargestellt sind in der linken Spalte die mittleren Hit-RTs für linkes und rechtes Ohr im Vergleich (die Linie „links = rechts“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt) und in der rechten Spalte die mittleren Hit-RTs für linkes und rechtes Ohr im Vergleich (die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Ohren gemittelte Hit-RT). Untereinander sind die Ergebnisse für (a) und (b) die „da“-Hörer (n = 8), (c) und (d) die „ga“-Hörer (n = 3) und (e) und (f) die „ne“-Hörer (n = 9) dargestellt. Die Seite (links/rechts) bezieht sich immer auf das Ohr, auf dem der CV-Stimulus präsentiert wurde.

Betrachtet man die Fehlerraten und Hit-RTs der unterschiedlichen Hörer-Gruppen unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums hinsichtlich der unterschiedlichen Arten der CV-Stimuli, zeigte sich auch hier ein sehr differenziertes Bild. So wiesen 88 % der „da“-Hörer höhere Fehlerraten für „ga“-Stimuli als für „da“-Stimuli (s. Abbildung 55a) auf, im Mittel war jedoch kein signifikanter Unterschied in den Fehlerraten zwischen „ga“- und „da“-Stimuli (T-Test: n.s.; s. Abbildung 55b) zu erkennen. Das Gegenteil war bei „ga“-Hörern der Fall. Von diesen zeigten 67 % eine höhere Fehlerrate für „da“-Stimuli als für „ga“-Stimuli (s. Abbildung 55c), was auch in den Mittelwerten erkennbar war (s. Abbildung 55d). Von den „ne“-Hörern zeigten 56 % der Versuchspersonen zum Teil deutlich höhere Fehlerraten für „ga“-Stimuli, bei den restlichen 44 % der Versuchspersonen war dies für „da“-Stimuli der Fall (s. Abbildung 55e). Im Mittel ließen sich keine Unterschiede zwischen „da“- und „ga“-Stimuli erkennen (T-Test: n.s.; s. Abbildung 55f).

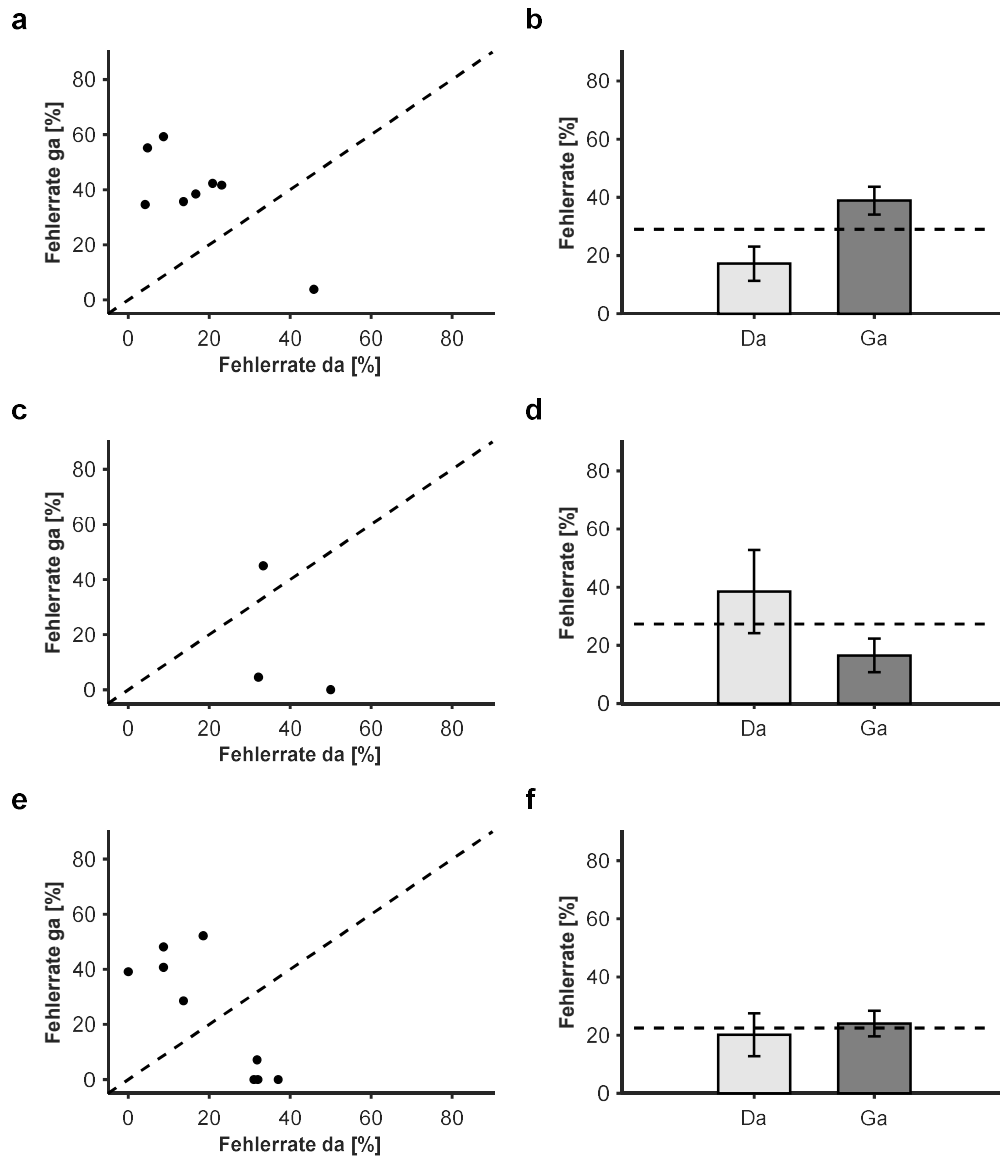


Abbildung 55: Vergleich der Fehlerraten zwischen „da“- und „ga“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“-, „ga“- und „ne“-Hörer. Dargestellt sind in der linken Spalte die individuellen Fehlerraten für „da“- und „ga“-Stimuli im Vergleich (die Linie „da = ga“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt) und in der rechten Spalte die mittleren Fehlerraten für „da“- und „ga“-Stimuli im Vergleich (die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimuli gemittelte Fehlerrate). Untereinander sind die Ergebnisse für (a) und (b) die „da“-Hörer (n = 8), (c) und (d) die „ga“-Hörer (n = 3) und (e) und (f) die „ne“-Hörer (n = 9) dargestellt.

Für die Hit-RTs konnte dagegen in keiner der drei Gruppen, weder im Vergleich der Einzeldaten (s. Abbildung 56a, 56c, 56e), noch im Mittel (s. Abbildung 56b, 56d, 56f), ein Unterschied zwischen „da“- und „ga“-Stimuli („da“-Hörer: T-Test: n.s.; „ne“-Hörer: T-Test: n.s.) gezeigt werden.

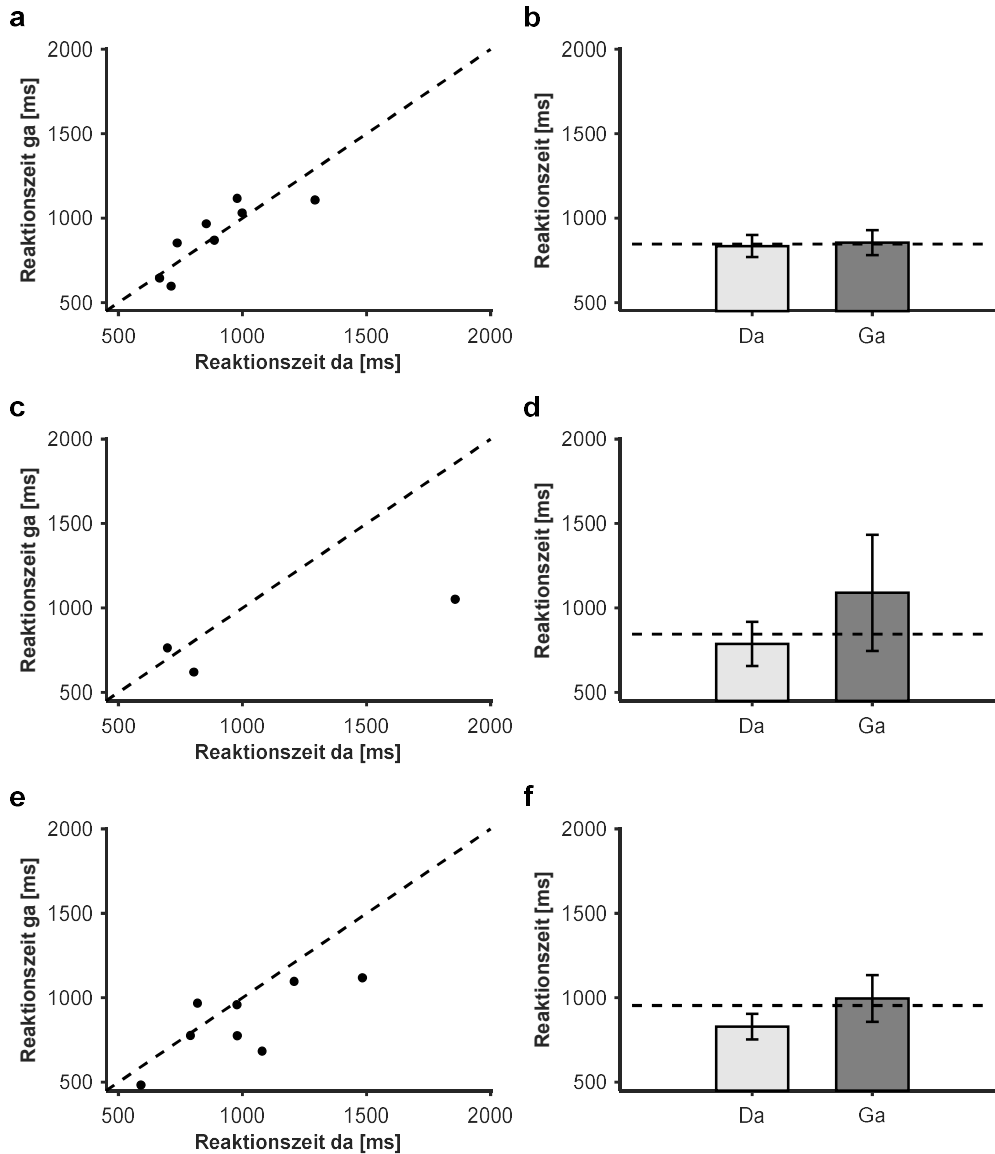


Abbildung 56: Vergleich der Hit-RTs zwischen „da“- und „ga“-Stimuli während der Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ basierend auf dem 15 %-Kriterium für die Gruppen der „da“-, „ga“- und „ne“-Hörer. Dargestellt sind in der linken Spalte die individuellen mittleren Hit-RTs für „da“- und „ga“-Stimuli im Vergleich (die Linie „da = ga“ ist als gestrichelte Diagonale gezeigt) und in der rechten Spalte die mittleren Hit-RTs für „da“- und „ga“-Stimuli im Vergleich (die gestrichelte waagerechte Linie zeigt die zusätzlich über beide Stimuli gemittelte Hit-RT). Untereinander sind die Ergebnisse für (a) und (b) die „da“-Hörer (n = 8), (c) und (d) die „ga“-Hörer (n = 3) und (e) und (f) die „ne“-Hörer (n = 9) dargestellt.

Somit ließ sich für die Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ zeigen, dass, je nach Strategie der Versuchsperson, Unterschiede in der Lateralisierung auftreten können. Allerdings ist noch völlig unklar, auf welchen Mechanismen diese Hör-Strategien beruhen, da für die Angabe, welche CV-Silbe „besser erkannt“ wurde, vergleichbare Literaturangaben fehlen. Als eine mögliche Erklärung kommt eine individuell unterschiedliche Wahrnehmung der CV-Silben in Betracht. So ist zu vermuten, dass ein Teil der Versuchsgruppe eine (unterbewusste) Kategorisierung der Stimuli in „Wort“ („da“) und „kein Wort“ („ga“) getroffen hat. Auch eine Stimulusdominanz bei einem Teil der Versuchspersonen wäre so zu erklären.

Abschließend lässt sich für dieses Experiment festhalten, dass kein allgemeiner Vorteil eines Ohres für die Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“, über alle Versuchspersonen hinweg, zu erkennen war. Vielmehr scheint eine Lateralisierung von der Strategie der einzelnen Versuchspersonen bzw. deren individueller Wahrnehmung der CV-Silben abzuhängen.

3.3. Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ (Experiment 5)

Für die Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ waren die Fehlerraten im Mittel für alle Schalldruckpegel des CV-Stimulus niedriger, wenn dieser auf dem linken Ohr präsentiert wurde, d.h. es war eine klare linke EA erkennbar. Auch der Großteil der einzelnen Versuchspersonen hatte eine niedrigere Fehlerrate, wenn der CV-Stimulus auf dem linken Ohr präsentiert wurde. Betrachtet man die Fehlerraten und Hit-RTs aller Versuchspersonen unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums, zeigte sich eine klare linke EA. Das bedeutet, dass unter der Anwesenheit eines kontralateralen Rauschens, die Versuchspersonen die CV-Silben „ta“ und „ka“ signifikant besser unterscheiden konnten, wenn diese auf dem linken Ohr präsentiert wurden. Besonders deutlich war dies in den Einzeldaten der Versuchspersonen. So lagen bei 4 Versuchspersonen die Fehlerraten für eine Präsentation des CV-Stimulus auf dem linken Ohr bei 0,0 %, während sie bei der Präsentation auf dem rechten Ohr bei über 30,0 % lagen. Zudem zeigten die Versuchspersonen bei korrekt getroffenen Entscheidungen signifikant kürzere RTs, wenn die CV-Silben auf dem linken Ohr präsentiert wurden. Daraus lässt sich wiederum schließen, dass die rechte Hemisphäre eine wichtige Rolle bei der Unterscheidung dieser beiden CV-Silben spielt.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Fehlerraten und Hit-RTs für „ta“-Stimuli signifikant höher waren als für „ka“-Stimuli, was auf eine Stimulusdominanz von „ka“-Stimuli hinweist. Die Stärke dieser Dominanz war von der Seite abhängig, auf der der CV-Stimulus präsentiert wurde. Auch hier fehlen bisher vergleichbare Literaturangaben.

Zusammenfassend konnte mit diesem Experiment gezeigt werden, dass eine klare Dominanz der rechten Hemisphäre für die Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“ besteht.

3.4. Vergleich der Experimente 3, 4 und 5: Abhängigkeit der Lateralisierung in der Unterscheidungsfähigkeit vom Stimulustyp

Im Vergleich der Experimente 3, 4 und 5 ließen sich in Abhängigkeit der mittleren Fehlerraten (gemittelt über alle Versuchspersonen und beide Ohren) vom Schalldruckpegel des zu unterscheidenden Stimulus klare Unterschiede im Schwierigkeitslevel zeigen (s. Abbildung 57a). So wurden in Experiment 3 FM-Stimuli mit einem Schalldruckpegel von 5–20 dB SPL verwendet, die mittlere Fehlerrate lag dabei immer unter 20,0 %. In Experiment 4 wurden dagegen die CV-Stimuli „da“ und „ga“ mit einem Schalldruckpegel von 30–65 dB SPL präsentiert, die mittleren Fehlerraten lagen dabei zwischen 12,0 % und 52,0 %. In Experiment 5 wurden schließlich die CV-Stimuli „ta“ und „ka“ mit einem Schalldruckpegel von 25–55 dB SPL präsentiert, die mittleren Fehlerraten lagen hier zwischen 0,0 % und 48,0 %.

Zusammengefasst ließ sich daher zeigen, dass die Unterscheidung von FM-Stimuli hinsichtlich ihrer Modulationsrichtung für die Versuchspersonen deutlich einfacher war als die Unterscheidung von verschiedenen CV-Stimuli. Dabei war die Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ wiederum schwieriger als die Unterscheidung der CV-Silben „ta“ und „ka“. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen der Studien von Bryden et al. (1983) und Rimol et al. (2006), in denen gezeigt werden konnte, dass CV-Silben mit langer VOT („ta“ und „ka“) öfter wahrgenommen und (korrekt) angezeigt werden als CV-Silben mit kurzer VOT („da“ und „ga“), unabhängig von der präsentierten Seite. Bemerkenswerterweise zeigte sich alleine für das schwierigste Experiment dieser Versuchsreihe (CV-Unterscheidung „da“ und „ga“) kein Lateralisierungseffekt in den Fehlerdaten. In den Hit-RTs dagegen ließen sich keine Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Experimente zeigen (s. Abbildung 57b).

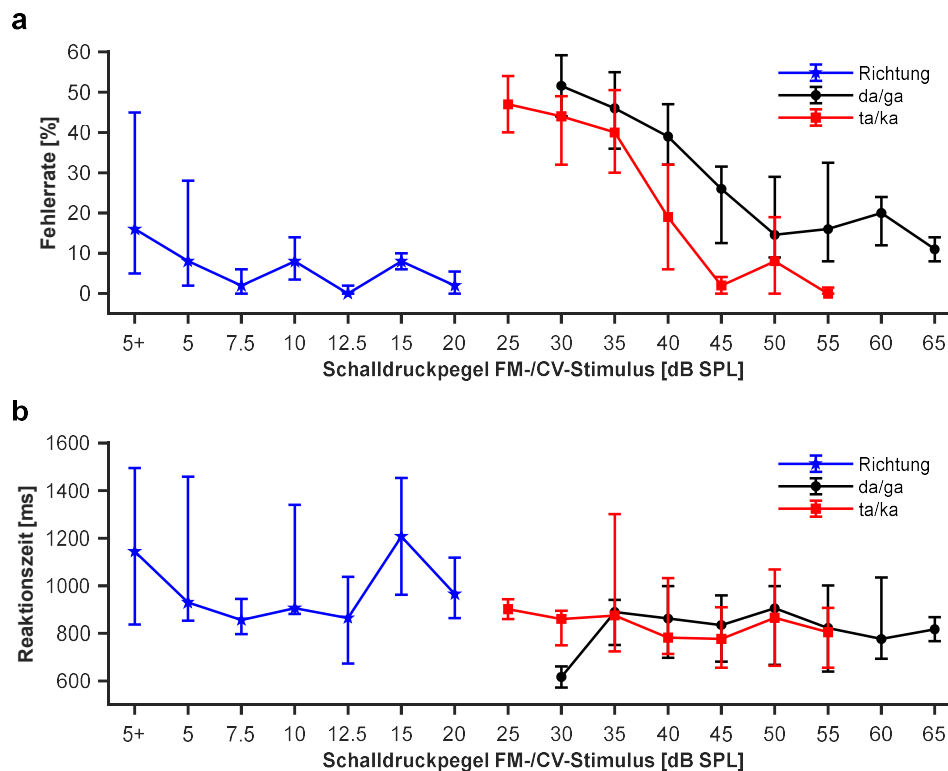


Abbildung 57: Vergleich der Schalldruckpegel-Abhängigkeit der mittleren Fehlerraten und Hit-RTs aller Versuchspersonen zwischen Experiment 3, 4 und 5. Dargestellt sind die Mediane der Fehlerrate (a) und der Hit-RTs (b) aller Versuchspersonen in Abhängigkeit des Schalldruckpegels des FM- bzw. CV-Stimulus. Einzelne Kurven zeigen Experiment 3 (blau, n = 23), Experiment 4 (schwarz, n = 23) und Experiment 5 (rot, n = 19).

Um einen möglichen Zusammenhang der Lateralisierungsergebnisse aus allen drei Experimenten der zweiten Versuchsreihe zu untersuchen, wurden im Folgenden die Daten einzelner Versuchspersonen miteinander verglichen. So ließ sich direkt ermitteln, ob sich der Vorteil eines Ohres in allen Experimenten gleichermaßen ausprägte oder sich von Experiment zu Experiment unterschied. Unter Berücksichtigung des 15 %-Kriteriums konnten die Differenzen beider Ohren in den Fehlerraten und Hit-RTs für alle drei Experimente von 7 Versuchspersonen dazu herangezogen werden. Davon zeigten 4 Versuchspersonen für alle drei Experimente niedrigere Fehlerraten, wenn der FM- bzw. CV-Stimulus auf dem linken Ohr präsentiert wurde, also eine linke EA, während der Vorteil eines Ohres bei 3 Versuchspersonen variabel für jedes Experiment war (s. Abbildung 58a). Für die Hit-RTs dagegen zeigten nur 2 Versuchspersonen schnellere Hit-RTs, wenn der FM- bzw. CV-Stimulus auf dem linken Ohr präsentiert wurde, also auch eine linke EA, während der Vorteil eines Ohres bei 5 Versuchspersonen je nach Experiment variierte. (s. Abbildung 58b).

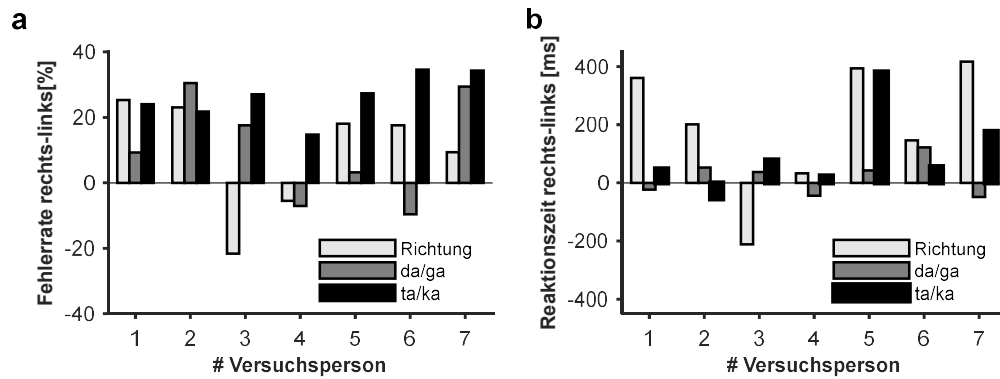


Abbildung 58: Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 7) zwischen Experiment 3, 4 und 5. Dargestellt sind die Differenzen zwischen rechtem und linkem Ohr nach Präsentation des FM- bzw. CV-Stimulus für Experiment 3 (weiß), Experiment 4 (grau) und Experiment 5 (schwarz) für (a) die Fehlerrate, (b) die Hit-RT.

Um nun die These zu untersuchen, ob FM-Stimuli als kleinstes Unterscheidungsmerkmal von menschlicher Sprache dienen können, bietet sich ein Vergleich der Lateralisierungen zwischen Experiment 3 und Experiment 4 an. So zeigten 67 % aller Versuchspersonen (n = 9) höhere Fehlerraten für die Präsentation des FM- bzw. CV-Stimulus auf dem rechtem Ohr, also eine linke EA, für 22 % variierte die Leistung eines Ohres und für 11 % (= 1 Versuchsperson) war eine rechte EA in den Fehlerraten erkennbar (s. Abbildung 59a). Für die Hit-RTs dagegen ließ sich nur für 44 % der Versuchspersonen eine linke EA für beide Experimente zeigen, für alle weiteren Versuchspersonen variierte die Leistung der Ohren je nach Experiment (s. Abbildung 59b). Ersetzt man in diesen Analysen jedoch die strittige rechte EA von Versuchsperson 7574 durch die linke EA in Experiment 1 (wie bereits oben erwähnt) ergibt sich eine linke EA für 88 % der Versuchspersonen in der Fehlerrate und für 56 % in der Hit-RT. Insgesamt war jedoch nur bei 3 bzw. 4 Versuchspersonen eine konstante linke EA in Fehlerraten und Hit-RTs über beide Experimente messbar.

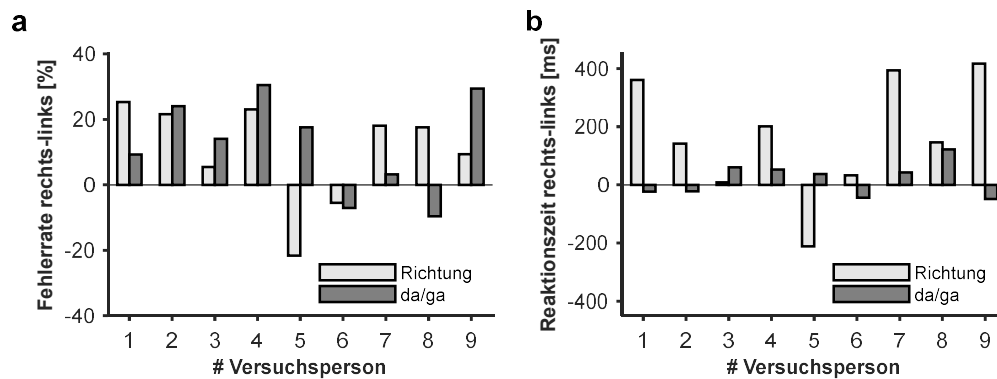


Abbildung 59: Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 9) zwischen Experiment 3 und 4. Dargestellt sind die Differenzen zwischen rechtem und linkem Ohr nach Präsentation des FM- bzw. CV-Stimulus für Experiment 3 (weiß) und Experiment 4 (grau) für (a) die Fehlerrate, (b) die Hit-RT.

Es zeigte sich somit im Vergleich der Daten ein möglicher Zusammenhang in der Lateralisierung zwischen auf- und abwärts-modulierten und „da“- und „ga“-Stimuli in den Einzeldaten der Versuchspersonen. Allerdings konnte dieser Trend nicht in den mittleren Daten über aller Versuchspersonen hinweg bestätigt werden. Dies lässt sich vor allem darauf zurückführen, dass es in Experiment 4 zu einer starken strategie-abhängigen Lateralisierung kam, wie bereits erläutert. Jedoch lässt auch dieser Vergleich der Daten keine weiteren Schlüsse über den zu Grunde liegenden Mechanismus zu.

Vergleicht man nun die Lateralisierung von FM-Modulation und „ta“- und „ka“-Stimuli miteinander, zeigten 71 % der Versuchspersonen (n = 7) eine klare linke EA in den Fehlerraten für beide Experimente (s. Abbildung 60a). Berücksichtigt man nun auch noch die strittige rechte EA der Versuchspersonen 7574 und 7579 in Experiment 3, konnte auch eine 100 %ige Übereinstimmung der Lateralisierung in den Fehlerraten für beide Experimente gezeigt werden. Auch für die Hit-RTs zeigte sich eine linke EA in 71 % bzw. 86 % aller Versuchspersonen, lediglich eine Versuchsperson zeigte unterschiedliche Lateralisierungen in einem sehr geringen Maße (s. Abbildung 60b).

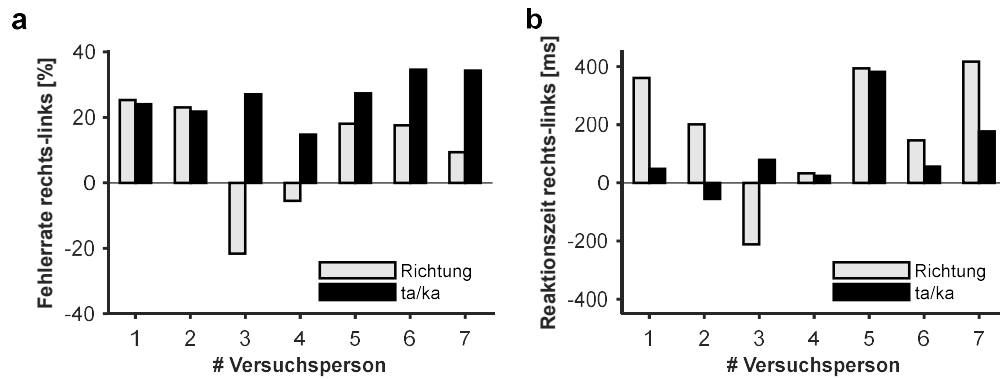


Abbildung 60: Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren der einzelnen Versuchspersonen (n = 7) zwischen Experiment 3 und 5. Dargestellt sind die Differenzen zwischen rechtem und linkem Ohr nach Präsentation des FM- bzw. CV-Stimulus für Experiment 3 (weiß) und Experiment 5 (schwarz) für (a) die Fehlerrate, (b) die Hit-RT.

Bemerkenswerterweise weisen die beiden Stimulustypen vordergründig keine klaren akustischen Gemeinsamkeiten, wie z.B. eine Auf- bzw. Abwärtsmodulation, auf. Daher ist fraglich, ob hier ein direkter Zusammenhang zwischen den gemittelten und Einzeldaten beider Experimenten hergestellt werden kann, oder ob es sich hier vielmehr um zwei getrennt voneinander auftretende Formen der Lateralisierung handelt.

Vergleicht man nun gezielt die Lateralisierung der unterschiedlichen CV-Silben in Experiment 4 und Experiment 5 anhand der Fehlerraten, lässt sich bei 53 % der Versuchspersonen (n = 15) eine linke EA erkennen, alle weiteren Versuchspersonen zeigten unterschiedliche Vorteile eines Ohres für beide Experimente (s. Abbildung 61b). Dies gilt ebenso für die Daten der Hit-RTs, hier zeigten jedoch nur 27 % der Versuchspersonen eine linke EA (s. Abbildung 61b). Insgesamt zeigten auch nur 20 % eine gleichbleibende linke EA für beide Experimente in den Fehlerraten und Hit-RTs.

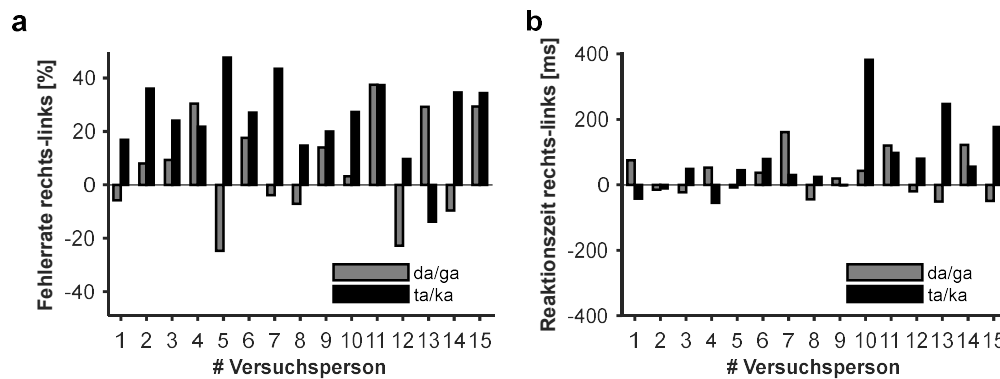


Abbildung 61: Vergleich der Differenzen der Leistungen der Ohren einzelner Versuchspersonen (n = 15) zwischen Experiment 4 und 5. Dargestellt sind die Differenzen von rechtem und linkem Ohr nach Präsentation des CV-Stimulus für Experiment 4 (grau) und Experiment 5 (schwarz) für (a) die Fehlerrate, (b) die Hit-RT.

Dies weist darauf hin, dass die verschiedenen CV-Silben bei einem Teil der Versuchspersonen auf unterschiedliche Art verarbeitet werden. Auch hier sind die Strategien der Versuchspersonen in der Unterscheidung der „da“- und „ga“-Silben wieder zu berücksichtigen. Daher lässt sich auch keine allgemeine Aussage über die Lateralisierung für CV-Silben treffen. Grundsätzlich stehen diese Ergebnisse damit im Gegensatz zu einer Vielzahl an Studien, die eine Dominanz der linken Hemisphäre für die Verarbeitung von CV-Silben zeigen konnten (s. z.B. Shankweiler und Studdert-Kennedy, 1967; Ahonniska et al., 1993, Stefanatos et al., 2008). Jedoch war die Aufgabenstellung in diesen Studien häufig die Detektion von einer CV-Silbe oder das Wiedergeben aller gehörten CV-Silben. Somit mussten die CV-Silben nicht voneinander unterschieden werden, und es war keine spezifische Unterscheidungsstrategie für die Versuchspersonen notwendig.

Bezieht man nun die VOTs der hier verwendeten CV-Silben mit in Betracht, war die linke EA für CV-Silben mit einer langen VOT („ta“ und „ka“) grundsätzlich höher als für CV-Silben mit einer kurzen VOT („da“ und „ga“). Auch in vorangegangenen Studien war die Lateralisierung, wenn auch in entgegengesetzter Richtung, bei CV-Silben mit kurzer VOT häufig stärker als mit langer VOT. Das bedeutet, dass dort meist eine rechte EA stärker für CV-Silben mit kurzer als mit langer VOT war (s. z.B. Shankweiler und Studdert-Kennedy, 1967; Studdert-Kennedy und Shankweiler, 1970; im Gegensatz dazu s. Jäncke et al., 2002).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe nur teilweise mit der bisherigen Literatur vergleichen lassen. So konnte einerseits in den Lateralisierungsdaten kein direkter Zusammenhang zwischen den FM- und „da“-/„ga“-Stimuli gezeigt werden, andererseits konnte für die Unterscheidung von CV-Stimuli eine linke anstatt einer rechten EA gezeigt werden.

4. Fazit

Mit allen Experimenten konnte gezeigt werden, dass sich das *kontralaterale* Rauschen, als eine Variante des *dichotic-listening* und somit eine rein psychophysische Methode, gut eignet, um Ergebnisse zur Lateralisation von akustischen Stimuli zu erhalten. Allerdings bleibt hierbei immer die Frage der genauen Lokalisation offen, d.h., es kann aufgrund der Fehlerrate und RTs zwar auf die Hemisphäre rückgeschlossen werden, nicht aber auf ein oder mehrere beteiligte Areale.

Grundsätzlich ist diese Methode anfällig für subjektive Einflüsse. So konnte z.B. gezeigt werden, dass sich der Vorteil eines Ohres mit dem (willentlichen) Verschieben der Aufmerksamkeit auf ein Ohr verändern kann (s. z.B. Asbjørnsen und Hugdahl, 1995, Alho et al., 1999). Dieser Effekt kann für die Experimente dieser Arbeit jedoch ausgeschlossen werden, da die Seite des zu unterscheidenden Stimulus für jeden Durchlauf zufällig ausgewählt wurde und somit regelmäßig wechselte. Die Versuchspersonen konnten somit nicht wissen, auf welcher Seite der zu unterscheidende Reiz als nächstes auftreten wird.

Auch ein Trainingseffekt über die Dauer der Experimente, der den Vorteil eines Ohres verändern kann (s. Moncrieff und Wertz, 2008), konnte für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht gezeigt werden, da sich der Vorteil eines Ohres nicht konstant über die Experimente hinweg gesteigert oder verringert hat. Zudem wurde die Anordnung der Experimentfolge in der ersten Versuchsreihe zufällig getroffen, auch dort war kein Effekt zu erkennen.

Allerdings kann beispielsweise nicht ausgeschlossen werden, dass die Kopf- bzw. Augenposition der Versuchspersonen einen Einfluss auf die Ergebnisse hatte. So konnten Asbjørnsen et al. (1990) eine größere rechte EA zeigen, wenn die Versuchspersonen geradeaus anstatt nach rechts schauten. Diesbezüglich wurden die Versuchspersonen jedoch weder vor den Messungen instruiert noch nach den Messungen befragt.

Für alle Experimente wurden deutlichere Effekte in den Fehlerraten als in den Hit-RTs erzielt. Vergleich man die hier erhobenen Daten jedoch mit RT-Unterschieden aus anderen Studien (s. z.B. Jäncke, 2002: 12,3–16,7 ms) und der angenommen interhemisphären Transferzeit von 7,6–24,9 ms (s. Aboitiz et al., 1992), liegen die absoluten mittleren Differenzen zwischen rechtem und linkem Ohr für alle Experimente mindestens in dem genannten Bereich, wenn nicht darüber. Wegen starker Streuung (zwischen Versuchspersonen) war dies allerdings statistisch nicht nachweisbar.

Zusammenfassend konnte in allen fünf Experimenten eine unterschiedliche (lateralisierte) Verarbeitung verschiedener akustischer Stimuli unter *kontralateralem* Rauschen gezeigt werden. So konnte sich der Vorteil eines Ohres bzw. einer Hemisphäre, sowohl in Abhängigkeit des Unterscheidungsparadimas (erste Versuchsreihe) als auch des Stimulustyps (zweite Versuchsreihe), verändern.

Zudem gab es zum Teil starke Unterschiede in der Effektstärke und Lateralisierung zwischen den einzelnen Versuchspersonen. Es konnte eine vorwiegende Verarbeitung der Unterscheidung von Modulationsrichtung von FM-Stimuli und der Unterscheidung von CV-Silben mit langer VOT auf der rechten Hemisphäre gezeigt werden. Für die Unterscheidungsleistung von CV-Silben mit kurzer VOT wurde für eine Teilgruppe der Versuchspersonen eine erhöhte Verarbeitungsleistung auf der rechten Hemisphäre gezeigt, während für die Unterscheidung von Stimulusdauern von FM-Stimuli beide Hemisphären gleichermaßen notwendig erscheinen.

5. Weitere mögliche Analysen und Experimente

Die hier erhobenen Daten können zusätzlich auch noch nach weiteren Kriterien ausgewertet werden. So lässt sich sowohl die Sensitivität d' für die einzelnen Stimuli als auch die Antwortendenz β für die einzelnen Versuchspersonen ermitteln. Dies ist besonders für die Unterscheidung der CV-Silben „da“ und „ga“ von hohem Interesse, um so ein neutrales Kriterium für die Unterteilung der Versuchspersonen in „da“- und „ga“-Hörer zu schaffen. Um weiterhin eventuell auftretende Unterschiede in der Verarbeitung der einzelnen Stimulustypen selbst festzustellen, können die erhobenen Fehlerraten und Hit-RTs auch auf den Vorteils eines Ohres je nach Stimulus, wie z.B. FM auf- oder abwärts, getrennt analysiert werden.

Zudem kann es aufschlussreich sein, die gleichen Versuchspersonen (nochmals) in verschiedenen Zeitabständen die selben Experimente durchführen zu lassen, um zu untersuchen, ob sich der Vorteil eines Ohres variabel gestaltet, hier gesehen bei wenigen Versuchspersonen, oder gleichbleibend ist.

Zusätzlich ist es denkbar, den Versuchspersonen klare Anweisungen bezüglich der RT/Genauigkeit, wie z.B. möglichst schnell oder korrekt zu antworten, zu geben, um eine höhere Effektstärke zu forcieren. Auch die (willentliche) Aufmerksamkeitsorientierung bei den Versuchspersonen, beispielsweise durch Anzeigen der Stimulusseite mittels eines optischen Reizes, einer klar definierten und einfachen Reihenfolge der Stimuli oder durch Fokussierung auf einen Stimulus, ist denkbar.

Außerdem können auch die gleichen Versuchspersonen in weiteren Messungen (mit höheren Stimuluspegeln) auch mit bildgebenden Verfahren, wie beispielsweise dem fMRT, gemessen werden, um mehr Aufschluss über die beteiligten Gehirnregionen zu bekommen.

Um den funktionellen Hintergrund von *dichotic-listening*-Experimenten etwas weiter zu beleuchten ist es möglich, die Versuchspersonen die gleichen Experimente ebenfalls jeweils mit der rechten und mit der linken Hand ausführen zu lassen. So lässt sich anhand der RTs untersuchen, ob diese schneller sind, wenn die Hemisphäre, die zur Stimulusunterscheidung dient und die Hemisphäre, welche die Antwortreaktion der Hand steuert, gleich sind. Konkret bedeutet dies, dass die Antwort bei Sprachstimuli mit der rechten Hand schneller sein sollte, da hierbei keine Zeit durch die Übertragung durch den *Corpus Callosum* benötigt wird (*callosal relay modell*, s. zusammenfassend z.B. Jäncke, 2002).

Für weitere Erkenntnisse lassen sich die selben Experimente auch mit anderen Gruppen von Versuchspersonen durchführen. So wäre es interessant, Linkshänder oder eine Gruppe von Versuchspersonen mit weit gestreuten Werten des *Edinburgh Handedness Inventory* zu messen, da es bisher noch variierende Daten zu einer rechten EA in *dichotic-listening*-Sprachtests und (Rechts-)Händigkeit gibt (s. vergleichend Bethmann et al., 2007).

Auch Versuchspersonen aus anderen Altersgruppen, wie Kinder oder ältere Menschen, könnten weitere verschiedene Ergebnisse aufweisen. So gibt es Hinweise darauf, dass mit zunehmendem Alter eine symmetrische Verarbeitung mehr in den Vordergrund rückt, gekoppelt mit einer schlechteren Unterscheidungsleistung von Sprachsilben mit schnellen spektro-temporalen Veränderungen (s. Bellis et al., 2000). Weiterhin ist die Durchführung der Experimente an Menschen mit einer sprachlichen Lernbeeinträchtigung, wie z.B. Legasthenie, von hohem Interesse, um mehr Erkenntnisse darüber zu erhalten, ob es auch andere Bereiche der akustischen Wahrnehmung, wie z.B. die Modulationsrichtung von FM-Stimulim betrifft (s. vergleichend Specht, 2014).

Um die Frage einer möglichen Lateralisierung der Stimulusdauer weiter zu untersuchen, ist es mit Bezug auf die *asymmetric-sampling-theory* zu überlegen, dasselbe Experiment mit sehr kurzen (z.B. 25 ms und 50 ms) bzw. langen (z.B. 800 ms und 1.000 ms) Stimuli zu wiederholen, ohne dabei jedoch die psychophysische Unterscheidungsfähigkeit der Versuchspersonen zu gefährden. Des Weiteren lässt sich diese Frage, in Anlehnung an tierexperimentelle Ansätze, auch mit der Detektion oder Unterscheidung von unterschiedlich langen Pausen in Tonfolgen untersuchen.

Da die Frage, ab wann ein Stimulus als „Sprache“ wahrgenommen wird, weiter offen bleibt, gibt es auch hier noch eine Vielzahl von Möglichkeiten für weitere Experimente. So können einerseits weitere (Gruppen von) CV-Silben gegeneinander getestet werden, um mögliche Unterschiede darzustellen. Auch die direkte Unterscheidung von CV-Stimuli mit und ohne FM-Komponente, wie z.B. „da“ gegen „ba“, bietet sich an. Des Weiteren können auch die Parameter der CV-Stimuli z.B. in ihrer Tonhöhe und -dauer variiert werden. Ebenfalls denkbar ist die Präsentation von CV-Silben, die natürlich von bekannten oder fremden Stimmen ausgesprochenen und nicht, wie in dieser Arbeit, synthetisch erzeugt werden (s. vergleichend Lattner et al., 2005).

Um die hier verwendete Versuchsanordnung weiter zu etablieren und die gewonnenen Ergebnisse weiter zu festigen, ist es zudem möglich, Unterscheidungsexperimente mit *kontralateralem* Rauschen mit kurzen Wörtern wie z.B. „Haus“ und „Maus“, Konsonant-Vokal-Konsonant-Silben oder auch Pseudowörtern (s. vergleichend Behne et al., 2006) durchzuführen. Auch ein klassischer *dichotic-listening*-Test als Referenzmessung ist denkbar.

V. Danksagung

An allererster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater PD Dr. Bernhard Gaese, vor allem für die Möglichkeit und das Vertrauen meine Doktorarbeit in dieser Form bei ihm anzufertigen, bedanken. Besonders unsere unzähligen Gespräche und Diskussionen über viele (neurowissenschaftliche) Felder hinweg haben mich, nicht nur in dieser Arbeit, weit voran gebracht. Und nicht zuletzt ist meine Begeisterung für Matlab-Programmierung ihm wesentlich geschuldet.

Herrn Prof. Dr. Paul Dierkes danke ich an dieser Stelle nochmals für die schnelle und spontane Bereitschaft meine Doktorarbeit als Zweitgutachter zu beurteilen.

Dr. André Brechmann und Dr. Nicole Angenstein ist es zu verdanken, dass diese Arbeit theoretisch durch ein *kontralaterales* Rauschen geprägt ist. Ich hoffe meine Doktorarbeit konnte euch vor allem methodisch weitere Einblicke geben und möchte euch nochmal für eure Unterstützung danken. Vor allem möchte ich mich von ganzem Herzen bei allen meinen Versuchspersonen bedanken. Ohne, dass ihr den teils langen Weg in meine Versuchskammer, oft auch mehrfach, gefunden und euch dann so geduldig meinen Geräuschen ausgesetzt habt, wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Des Weiteren möchte ich auch allen aktiven und ehemaligen Mitgliedern des Arbeitskreises für die herzliche (Wieder-) Aufnahme, die immer positiv anspornende Arbeitsatmosphäre und stete Anteilnahme danken.

Auch bei Herrn Dr. Jan Könnecke und dem gesamten Team möchte ich mich ganz herzlich für die vielfältige Unterstützung und vor allem zeitliche Flexibilität bedanken. Auch wenn mir der Gedanke des Patentamtes (noch) fern liegt, so habe ich doch auch hier unglaublich viel auf einem mir vorher völlig fremden Gebiet gelernt.

Zudem möchte ich meiner gesamten (Wahl-) Familie für die ständige (moralische) Unterstützung und auch Zuversicht in die Erfüllung meiner Pläne während der gesamten Dauer meiner Doktorarbeit danken. Für ständiges Korrigieren (nicht nur in Rechtschreibung und Grammatik) gilt vor allem Dank an meine Mutter und Katha.

Abschließender Dank gilt meinem Kollegen, Freund und Ehemann Sebastian. Danke, dass du nie an mir oder meinen Vorhaben gezweifelt, sondern mich in so vielen Bereichen unermüdlich unterstützt hast. Auch die Tatsache, dass wir auf dem Sofa so viele wissenschaftliche Diskussion führen und Matlab- und Grafikprobleme lösen können, hat diese Arbeit nicht unerheblich beeinflusst. Und auch Marie möchte ich von ganzem Herzen dafür danken, dass sie mir immer wieder zeigt, dass, auch wenn es Tage gibt, die sehr viel Energie kosten, diese an einer Vielzahl an weiteren Tagen wieder unendlich mehr zurück fließt.

VI. Literatur/Quellenverzeichnis

Aboitiz, F.; Scheibel, A.; Fisher, R.; Zaidel, E. (1992): Fiber composition of the human corpus callosum. *Brain research* 598 (1-2), S. 143–153.

Ahonniska, J.; Cantell, M.; Tolvanen, A.; Lyytinen, H. (1993): Speech Perception and Brain Laterality: The Effect of Ear Advantage on Auditory Event-Related Potentials. *Brain and Language* (45), S. 127–146.

Alho, K.; Connolly, J.; Cheour, M.; Lehtokoski, A.; Huottilainen, M.; Virtanen, J. et al. (1998): Hemispheric lateralization in preattentive processing of speech sounds. *Neuroscience Letters* 258 (1), S. 9–12.

Alho, K.; Medvedev, S.; Pakhomov, S.; Roudas, M.; Tervaniemi, M.; Reinikainen, K. et al. (1999): Selective tuning of the left and right auditory cortices during spatially directed attention. *Cognitive Brain Research* 7 (3), S. 335–341.

Alsakloul, M. (2018): Psychophysical Investigation of Lateralization for Sequence Processing in Humans. Bachelorarbeit. Goethe-Universität, Frankfurt am Main. Institut für Zellbiologie und Neurowissenschaft.

Altmann, C.; Gaese, B. (2014): Representation of frequency-modulated sounds in the human brain. *Hearing research* 307, S. 74–85.

Angenstein, N.; Brechmann, A. (2013a): Division of labor between left and right human auditory cortices during the processing of intensity and duration. *NeuroImage* 83, S. 1–11.

Angenstein, N.; Brechmann, A. (2013b): Left auditory cortex is involved in pairwise comparisons of the direction of frequency modulated tones. *Frontiers in neuroscience* 7, 115.

Angenstein, N.; Brechmann, A. (2017): Effect of sequential comparison on active processing of sound duration. *Human brain mapping* 38 (9), S. 4459–4469.

Asbjørnsen, A.; Hugdahl, K.; Hynd, G. (1990): The effects of head and eye turns on the right ear advantage in dichotic listening. *Brain and Language* 39 (3), S. 447–458.

Asbjørnsen, A.; Hugdahl, K. (1995): Attentional Effects in Dichotic Listening. *Brain and Language* (49), S. 189–201.

Bailey, P.; Von Bonin, G.; Garol, H.; McCulloch, W. (1943): Functional Organization of Temporal Lobe of Monkey (*Macaca Mulatta*) and Chimpanzee (*Pan Satyrus*). *Journal of neurophysiology* (6), S. 121–128.

Behne, N.; Scheich, H.; Brechmann, A. (2005): Contralateral White Noise Selectively Changes Right Human Auditory Cortex Activity Caused by a FM-Direction Task. *Journal of neurophysiology* 93 (1), S. 414–423.

Behne, N.; Wendt, B.; Scheich, H.; Brechmann, A. (2006): Contralateral White Noise Selectively Changes Left Human Auditory Cortex Activity in a Lexical Decision Task. *Journal of neurophysiology* (95), S. 2630–2637.

- Belin, P.; Zilbovicius, M.; Crozier, S.; Thivard, L.; Fontaine, a.; Masure, M.-C.; Samson, Y. (1998a): Lateralization of Speech and Auditory Temporal Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience* 10 (4), S. 536–540.
- Belin, P.; McAdams, S.; Smith, B.; Savel, S.; Thivard, L.; Samson, S.; Samson, Y. (1998b): The Functional Anatomy of Sound Intensity Discrimination. *J. Neurosci.* 18 (16), S. 6388–6394.
- Belin, P.; Zatorre, R.; Lafaille, P.; Ahad, P.; Pike, B. (2000): Voice-selective areas in human auditory cortex. *Nature* 403 (6767), S. 309–312.
- Belin, P.; McAdams, S.; Thivard, L.; Smith, B.; Savel, S.; Zilbovicius, M. et al. (2002): The neuroanatomical substrate of sound duration discrimination. *Neuropsychologia* 40 (12), S. 1956–1964.
- Bellis, T.; Nicol, T.; Kraus, N. (2000): Aging Affects Hemispheric Asymmetry in the Neural Representation of Speech Sounds. *J. Neurosci.* 20 (2), S. 791–797.
- Berlin, C.; Lowe-Bell, S.; Jannetta, P.; Kline, D. (1972): Central Auditory Deficits After Temporal Lobectomy. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 96 (1), S. 4–10.
- Bethmann, A.; Tempelmann, C.; de Bleser, R.; Scheich, H.; Brechmann, A. (2007): Determining language laterality by fMRI and dichotic listening. *Brain research* 1133 (1), S. 145–157.
- Bilger, R.; Matthies, M.; Hammel, D.; Demorest, M. (1990): Genetic implications of gender differences in the prevalence of spontaneous otoacoustic emissions. *Journal of speech and hearing research* 33 (3), S. 418–432.
- Binder, J.; Frost, J.; Hammeke, T.; Cox, R.; Rao, S.; Prieto, T. (1997): Human Brain Language Areas Identified by Functional Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Neuroscience* 17 (1), S. 353–362.
- Binder, J. (2000): Human Temporal Lobe Activation by Speech and Nonspeech Sounds. *Cerebral Cortex* 10 (5), S. 512–528.
- Blumstein, S.; Goodglass, H.; Tartter, V. (1975): The reliability of ear advantage in dichotic listening. *Brain and Language* 2, S. 226–236.
- Blumstein, S.; Myers, E.; Rissman, J. (2005): The perception of voice onset time: an fMRI investigation of phonetic category structure. *Journal of Cognitive Neuroscience* 17 (9), S. 1353–1366.
- Boatman, D.; Hart, J.; Lesser, R.; Honeycutt, N.; Anderson, N.; Miglioretti, D.; Gordon, B. (1998): Right hemisphere speech perception revealed by amobarbital injection and electrical interference. *Neurology* 51 (2), S. 458–464.
- Boemio, A.; Fromm, S.; Braun, A.; Poeppel, D. (2005): Hierarchical and asymmetric temporal sensitivity in human auditory cortices. *Nature neuroscience* 8 (3), S. 389–395.

- Bowen, G.; Lin, D.; Taylor, M.; Ison, J. (2003): Auditory Cortex Lesions in the Rat Impair Both Temporal Acuity and Noise Increment Thresholds, Revealing a Common Neural Substrate. *Cerebral Cortex* 13 (8), S. 815–822.
- Böye, M.; Güntürkün, O.; Vauclair, J. (2005): Right ear advantage for conspecific calls in adults and subadults, but not infants, California sea lions (*Zalophus californianus*): hemispheric specialization for communication? *The European journal of neuroscience* 21 (6), S. 1727–1732.
- Brancucci, A.; Babiloni, C.; Babiloni, F.; Galderisi, S.; Mucci, A.; Tecchio, F. et al. (2004): Inhibition of auditory cortical responses to ipsilateral stimuli during dichotic listening: evidence from magnetoencephalography. *European Journal of Neuroscience* (29), S. 2329–2336.
- Brancucci, A.; Babiloni, C.; Rossini, P.; Romani, G. (2005): Right hemisphere specialization for intensity discrimination of musical and speech sounds. *Neuropsychologia* 43 (13), S. 1916–1923.
- Brancucci, A.; D'Anselmo, A.; Martello, F.; Tommasi, L. (2008): Left hemisphere specialization for duration discrimination of musical and speech sounds. *Neuropsychologia* 46 (7), S. 2013–2019.
- Brechmann, A.; Scheich, H. (2005): Hemispheric shifts of sound representation in auditory cortex with conceptual listening. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)* 15 (5), S. 578–587.
- Broadbent, D. (1954): The role of auditory localization in attention and memory span. *Journal of Experimental Psychology* 47 (3), S. 191–196.
- Broca, P. (1865): Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bulletins de la Societe´ d'Anthropologie* (6), S. 377–393.
- Brodman, K. (1909): Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde: in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaus. Leipzig: Johann Ambrosius Barth.
- Brown, K.; Buchwald, J.; Johnson, J.; Mikolich, D. (1978): Vocalization in the cat and kitten. *Developmental psychobiology* 11 (6), S. 559–570.
- Bryden, M. (1963): Ear preference in auditory perception. *Journal of Experimental Psychology* 65 (1), S. 103–105.
- Bryden, M.; Munhall, K.; Allard, F. (1983): Attentional biases and the right-ear effect in dichotic listening. *Brain and Language* 18 (2), S. 236–248.
- Buchtel, H.; Rizzolatti, G.; Anzola, G.; Bertoloni, G. (1978): Right hemispheric superiority in discrimination of brief acoustic duration. *Neuropsychologia* 16 (5), S. 643–647.
- Campaign, R.; Minckler, J. (1976): A Note on the Gross Configurations of the Human Auditory Cortex. *Brain and Language* (3), S. 318–323.
- Celesia, G. (1976): Organization of auditory cortical areas in man. *Brain* (99), S. 403–414.

- Celsis, P.; Boulanouar, K.; Doyon, B.; Ranjeva, J.; Berry, I.; Nespoulous, J.-L.; Chollet, F. (1999): Differential fMRI responses in the left posterior superior temporal gyrus and left supramarginal gyrus to habituation and change detection in syllables and tones. *NeuroImage* 9 (1), S. 135–144.
- Chung, D.; Mason, K.; Gannon, R.; Willson, G. (1983): The ear effect as a function of age and hearing loss. *The Journal of the Acoustical Society of America* 73 (4), S. 1277–1282.
- Curry, F. (1968): A Comparison of the Performances of a Right Hemispherectomized Subject and 25 Normals on Four Dichotic Listening Tasks. *Cortex* 4 (2), S. 144–153.
- De Sanctis, P.; Molholm, S.; Shpaner, M.; Ritter, W.; Foxe, J. (2009): Right Hemispheric Contributions to Fine Auditory Temporal Discriminations: High-Density Electrical Mapping of the Duration Mismatch Negativity (MMN). *Frontiers in integrative neuroscience* 3, S. 5.
- Delattre, P.; Liberman, A.; Cooper, F. (1955): Acoustic Loci and Transitional Cues for Consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 27 (4), S. 769–773.
- Della Penna, S.; Brancucci, A.; Babiloni, C.; Franciotti, R.; Pizzella, V.; Rossi, D. et al. (2007): Lateralization of dichotic speech stimuli is based on specific auditory pathway interactions: neuromagnetic evidence. *Cerebral Cortex* 17 (10), S. 2303–2311.
- Démonet, J.-F.; Chollet, F.; Ramsay, S.; Cardebat, D.; Nespoulous, J.-L.; Wise, R. et al. (1992): The Anatomy of Phonological and Semantic Processing in Normal Subjects. *Brain* (115), S. 1753–1768.
- Dirks, D. (1964): Perception of Dichotic and Monaural Verbal Material and Cerebral Dominance For Speech. *Acta Oto-Laryngologica* 58 (1-6), S. 73–80.
- Dwyer, J.; Blumstein, S.; Ryalls, J. (1982): The role of duration and rapid temporal processing on the lateral perception of consonants and vowels. *Brain and Language* 17 (2), S. 272–286.
- Efron, R. (1974): Dichotic competition of simultaneous tone bursts of different frequency—I. Dissociation of pitch from lateralization and loudness. *Neuropsychologia* 12 (2), S. 249–256.
- Eggermont, J. (1995): Neural correlates of gap detection and auditory fusion in cat auditory cortex. *NeuroReport* (6), S. 1645–1648.
- Ehret, G. (1987): Left hemisphere advantage in the mouse brain for recognizing ultrasonic communication calls. *Nature* 325, S. 249–251.
- Evarts, E. (1952): Effect of Auditory Cortex Ablation on Frequency Discrimination on Monkey. *Journal of neurophysiology* (15), S. 443–448.
- Faes, L.; Nollo, G.; Ravelli, F.; Ricci, L.; Vescovi, M.; Turatto, M. et al. (2007): Small-sample characterization of stochastic approximation staircases in forced-choice adaptive threshold estimation. *Perception & Psychophysics* 69 (2), S. 254–262.

- Fitch, R.; Brown, C.; O'Connor, K.; Tallal, P. (1993): Functional Lateralization for Auditory Temporal Processing in Male and Female Rats. *Behavioral Neuroscience* 107 (5), S. 844–850.
- Friederici, A. (2011): The brain basis of language processing: from structure to function. *Physiological reviews* 91 (4), S. 1357–1392.
- Gaese, B.; Ostwald, J. (1995): Temporal Coding of Amplitude and Frequency Modulation in the Rat Auditory Cortex. *European Journal of Neuroscience* (7), S. 438–450.
- Gaese, B.; King, I.; Felsheim, C.; Ostwald, J.; Behrens, W. von der (2006): Discrimination of direction in fast frequency-modulated tones by rats. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology : JARO* 7 (1), S. 48–58.
- Galaaburda, A.; Sanides, F. (1980): Cytoarchitectonic organization of the human auditory cortex. *The Journal of comparative neurology* 190 (3), S. 597–610.
- Geschwind, N.; Levitsky, W. (1968): Human Brain: Left-Right Asymmetries in Temporal Speech Region. *Science* 161 (3837), S. 186–187.
- Gil-da-Costa, R.; Hauser, M. (2006): Vervet monkeys and humans show brain asymmetries for processing conspecific vocalizations, but with opposite patterns of laterality. *Proceedings. Biological sciences* 273 (1599), S. 2313–2318.
- Giraudi, D.; Salvi, R.; Henderson, D.; Hamernik, R. (1980): Gap detection by the chinchilla. *The Journal of the Acoustical Society of America* 68 (3), S. 802–806.
- Godey, B.; Atencio, C.; Bonham, B.; Schreiner, C.; Cheung, S. (2005): Functional organization of squirrel monkey primary auditory cortex: responses to frequency-modulation sweeps. *Journal of neurophysiology* 94 (2), S. 1299–1311.
- Goldstein, E. (2015): Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs. 9. Auflage. Hg. v. Karl R. Gegenfurtner. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Goldstein, M.; Abeles, M.; Daly, R.; McIntosh, J. (1970): Functional architecture in cat primary auditory cortex: tonotopic organization. *Journal of neurophysiology* 33 (1), S. 188–197.
- Gray (2010): superior temporal gyrus. File:Gray726 superior temporal gyrus.png. Unter Mitarbeit von vectorized by Mysid, coloured by was_a_bee. Online verfügbar unter https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Gray726_superior_temporal_gyrus.png, zuletzt geprüft am 18.11.2019.
- Griffiths, T.; Warren, J. (2002): The planum temporale as a computational hub. *Trends in Neurosciences* 25 (7), S. 348–353.
- Grimm, S.; Roeber, U.; Trujillo-Barreto, N.; Schröger, E. (2006): Mechanisms for detecting auditory temporal and spectral deviations operate over similar time windows but are divided differently between the two hemispheres. *NeuroImage* 32 (1), S. 275–282.

- Hall, D.; Johnsrude, I.; Haggard, M.; Palmer, A.; Akeroyd, M.; Summerfield, A. (2002): Spectral and Temporal Processing in Human Auditory Cortex. *Cerebral Cortex* 12 (2), S. 140–149.
- Harris, K.; Hoffman, H.; Liberman, A.; Delattre, P.; Cooper, F. (1958): Effect of Third-Formant Transitions on the Perception of the Voiced Stop Consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America* 30 (2), S. 122–126.
- Hauser, M.; Andersson, K. (1994): Left hemisphere dominance for processing vocalizations in adult, but not infant, rhesus monkey. Field experiments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (91), S. 3946–3948.
- Heffner, H.; Heffner, R. (1984): Temporal lobe lesions and perception of species-specific vocalizations by macaques. *Science* 226 (4670), S. 75–76.
- Heffner, H.; Heffner, R. (1986): Effect of unilateral and bilateral auditory cortex lesions on the discrimination of vocalizations by Japanese macaques. *Journal of neurophysiology* 56 (3), S. 683–701.
- Heiervang, E.; Hugdahl, K.; Steinmetz, H.; Inge Smievoll, A.; Stevenson, J.; Lund, A. et al. (2000): Planum temporale, planum parietale and dichotic listening in dyslexia. *Neuropsychologia* 38 (13), S. 1704–1713.
- Heil, P.; Rajan, R.; Irvine, D. (1992): Sensitivity of neurons in cat primary auditory cortex to tones and frequency-modulated stimuli. I: Effects of variation of stimulus parameters. *Hearing research* 63 (1-2), S. 108–134.
- Heimrath, K.; Kuehne, M.; Heinze, H.-J.; Zaehle, T. (2014): Transcranial direct current stimulation (tDCS) traces the predominance of the left auditory cortex for processing of rapidly changing acoustic information. *Neuroscience* 261, S. 68–73.
- Heimrath, K.; Breitling, C.; Krauel, K.; Heinze, H.-J.; Zaehle, T. (2015): Modulation of pre-attentive spectro-temporal feature processing in the human auditory system by HD-tDCS. *The European journal of neuroscience* 41 (12), S. 1580–1586.
- Hellige, J. (1990): Hemispheric Asymmetry. *Annual Review of Psychology* 41 (1), S. 55–80.
- Hickok, G.; Poeppel, D. (2000): Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends in Cognitive Sciences* 4 (4), S. 131–138.
- Hickok, G.; Poeppel, D. (2004): Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition* 92 (1-2), S. 67–99.
- Hickok, G.; Poeppel, D. (2007): The cortical organization of speech processing. *Nature reviews. Neuroscience* 8 (5), S. 393–402.
- Hickok, G.; Poeppel, D. (2015): Neural basis of speech perception. *Handbook of clinical neurology* 129, S. 149–160.
- Hind, J. (1953): An Electrophysiological Determination of Tonotopic Organization in Auditory Cortex of Cat. *Journal of neurophysiology* (16), S. 475–489.

- Hopkins, W.; Marino, L.; Rilling, J.; MacGregor, L. (1998): Planum temporale asymmetries in great apes as revealed by magnetic resonance imaging (MRI). *NeuroReport* 9 (12), S. 2913–2918.
- Horiwaka, J.; Ito, S.; Hosowaka, Y.; Homma, T.; Murata, K. (1988): Tonotopic Representation in the Rat Auditory Cortex. *Proceedings of the Japan Academy* (64), 260-263.
- Howard, M.; Volkov, I.; Abbas, P.; Damasio, H.; Ollendieck, M.; Granner, M. (1996): A chronic microelectrode investigation of the tonotopic organization of human auditory cortex. *Brain research* 724 (2), S. 260–264.
- Hsieh, I.-H.; Fillmore, P.; Rong, F.; Hickok, G.; Saberi, K. (2012): FM-selective networks in human auditory cortex revealed using fMRI and multivariate pattern classification. *Journal of Cognitive Neuroscience* 24 (9), S. 1896–1907.
- Hugdahl, K.; Brønnick, K.; Kyllingsbrk, S.; Law, I.; Gade, A.; Paulson, O. (1999): Brain activation during dichotic presentations of consonant-vowel and musical instrument stimuli. A 15 O-PET study. *Neuropsychologia* 37 (4), S. 431–440.
- Hund-Georgiadis, M.; Lex, U.; Friederici, A.; Cramon, D. von (2002): Non-invasive regime for language lateralization in right- and left-handers by means of functional MRI and dichotic listening. *Experimental brain research* 145 (2), S. 166–176.
- Ilvonen, T.; Kujala, T.; Tervaniemi, M.; Salonen, O.; Näätänen, R.; Pekkonen, E. (2001): The processing of sound duration after left hemisphere stroke: Event-related potential and behavioral evidence. *Psychophysiology* 38 (4), S. 622–628.
- Inouchi, M.; Kubota, M.; Ferrari, P.; Roberts, T. (2002): Neuromagnetic auditory cortex responses to duration and pitch changes in tones: cross-linguistic comparisons of human subjects in directions of acoustic changes. *Neuroscience Letters* (331), S. 138–142.
- Ison, J. (1982): Temporal acuity in auditory function in the rat: Reflex inhibition by brief gaps in noise. *Journal of Comparative and Physiological Psychology* 96 (6), S. 945–954.
- Jamison, H.; Watkins, K.; Bishop, D.; Matthews, P. (2006): Hemispheric specialization for processing auditory nonspeech stimuli. *Cerebral Cortex* 16 (9), S. 1266–1275.
- Jäncke, L. (2002): Does "callosal relay" explain ear advantage in dichotic monitoring? *Laterality* 7 (4), S. 309–320.
- Jäncke, L.; Wüstenberg, T.; Scheich, H.; Heinze, H.-J. (2002): Phonetic perception and the temporal cortex. *NeuroImage* 15 (4), S. 733–746.
- Kaltwasser, M.-T. (1990): Acoustic signaling in the black rat (*Rattus rattus*). *Journal of comparative psychology* 104 (3), S. 227–232.
- Kannan, P.; Lipscomb, D. (1974): Letter: Bilateral hearing asymmetry in a large population. *The Journal of the Acoustical Society of America* 55 (5), S. 1092–1094.
- Karasseva, T. (1972): The role of the temporal lobe in human auditory perception. *Neuropsychologia* 10 (2), S. 227–231.

- Kelly, J.; Whitfield, I. (1971): Effects of Auditory Cortical Lesions on Discriminations of Rising and Falling Frequency-Modulated Tones. *Journal of neurophysiology* (34), S. 802–816.
- Kelly, J.; Rooney, B.; Phillips, D. (1996): Effects of Bilateral Auditory Cortical Lesions on Gap-Detection Thresholds in the Ferret (*Mustela putorius*). *Behavioral Neuroscience* 110 (3), S. 542–550.
- Khalfa, S.; Micheyl, C.; Veuille, E.; Collet, L. (1998): Peripheral auditory lateralization assessment using TEOAEs. *Hearing research* 121 (1-2), S. 29–34.
- Kimura, D. (1961a): Cerebral dominance and the perception of verbal stimuli. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie* 15 (3), S. 166–171.
- Kimura, D. (1961b): Some effects of temporal-lobe damage on auditory perception. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie* 15 (3), S. 156–165.
- König, R.; Sieluzycycki, C.; Simserides, C.; Heil, P.; Scheich, H. (2008): Effects of the task of categorizing FM direction on auditory evoked magnetic fields in the human auditory cortex. *Brain research* 1220, S. 102–117.
- Kowalski, N.; Versnel, H.; Shamma, S. (1995): Comparison of responses in the anterior and primary auditory fields of the ferret cortex. *Journal of neurophysiology* 73 (4), S. 1513–1523.
- Lackner, J.; Teuber, H.-L. (1973): Alterations in auditory fusion thresholds after cerebral injury in man. *Neuropsychologia* 11 (4), S. 409–415.
- Langers, D.; Backes, W.; van Dijk, P. (2007): Representation of lateralization and tonotopy in primary versus secondary human auditory cortex. *NeuroImage* 34 (1), S. 264–273.
- Lattner, S.; Meyer, M.; Friederici, A. (2005): Voice perception: Sex, pitch, and the right hemisphere. *Human brain mapping* 24 (1), S. 11–20.
- Lauter, J.; Herscovitch, P.; Formby, C.; Raichle, M. (1985): Tonotopic organization in human auditory cortex revealed by positron emission tomography. *Hearing research* 20 (3), S. 199–205.
- Liang, L.; Lu, T.; Wang, X. (2002): Neural representations of sinusoidal amplitude and frequency modulations in the primary auditory cortex of awake primates. *Journal of neurophysiology* 87 (5), S. 2237–2261.
- Libermann, A.; Mattingly, I. (1989): A Specialization for Speech Perception. *Science* 243 (4890), S. 489–494.
- Licklider, J.; Kryter, K. (1942): Frequency localization in the auditory cortex of the monkey. *Federal Proceedings*, 1-51.

- Liégeois-Chauvel, C.; Giraud, K.; Badier, J.-M.; Marquis, P.; Chauvel, P. (2001): Intracerebral Evoked Potentials in Pitch Perception Reveal a Functional Asymmetry of the Human Auditory Cortex. *Annals of the New York Academy of Sciences*, S. 117–132.
- List, A.; Justus, T. (2007): Auditory priming of frequency and temporal information. Effects of lateralised presentation. *Laterality* 12 (6), S. 507–535.
- Luo, H.; Boemio, A.; Gordon, M.; Poeppel, D. (2007): The perception of FM sweeps by Chinese and English listeners. *Hearing research* 224 (1-2), S. 75–83.
- Majkowski, J.; Bochenek, Z.; Bochenek, W.; Knapik-Fijałkowska, D.; Kopeć, J. (1971): Latency of averaged evoked potentials to contralateral and ipsilateral auditory stimulation in normal subjects. *Brain research* 25 (2), S. 416–419.
- Mäkelä, J.; Hari, R.; Linnankivi, A. (1987): Different analysis of frequency and amplitude modulations of a continuous tone in the human auditory cortex: A neuromagnetic study. *Hearing research* 27 (3), S. 257–264.
- Malpeli, J. (1999): Reversible inactivation of subcortical sites by drug injection. *Journal of Neuroscience Methods* 86 (2), S. 119–128.
- Mathiak, K.; Hertrich, I.; Lutzenberger, W.; Ackermann, H. (2000): Encoding of temporal speech features (formant transients) during binaural and dichotic stimulus application. *Cognitive Brain Research* 10 (1-2), S. 125–131.
- McFadden, D. (1993): A speculation about the parallel ear asymmetries and sex differences in hearing sensitivity and otoacoustic emissions. *Hearing research* 68 (2), S. 143–151.
- Mercado, E.; Orduña, I.; Nowak, J. (2005): Auditory categorization of complex sounds by rats (*Rattus norvegicus*). *Journal of comparative psychology* 119 (1), S. 90–98.
- Merzenich, M.; Brugge, J. (1973): Representation of the cochlear partition on the superior temporal plane of the macaque monkey. *Brain research* 50 (2), S. 275–296.
- Merzenich, M.; Knight, R.; Roth, L. (1975): Representation of cochlea within primary auditory cortex in the cat. *Journal of neurophysiology* 38 (2), S. 231–249.
- Michel, F.; Mauguire, F.; Duquesnel, J. (1984): Listening with One or Two Hemispheres: Verbal Dichotic Testing after Intracarotid Barbiturate Injection. *Neuropsychologia* 24 (2), S. 271–276.
- Mills, L.; Rollman, G. (1979): Left Hemisphere Selectivity For Processing Duration In Normal Subjects. *Brain and Language* 7, S. 330–335.
- Molholm, S.; Martinez, A.; Ritter, W.; Javitt, D.; Foxe, J. (2005): The neural circuitry of pre-attentive auditory change-detection. An fMRI study of pitch and duration mismatch negativity generators. *Cerebral Cortex* 15 (5), S. 545–551.
- Moncrieff, D.; Wertz, D. (2008): Auditory rehabilitation for interaural asymmetry: preliminary evidence of improved dichotic listening performance following intensive training. *International Journal of Audiology* 47 (2), S. 84–97.

- Moody, D.; May, B.; Cole, D.; Stebbins, W. (1986): The role of frequency modulation in the perception of complex stimuli by primates. *Experimental biology* 45 (3), S. 219–232.
- Myers, E.; Blumstein, S. (2008): The neural bases of the lexical effect: an fMRI investigation. *Cerebral Cortex* 18 (2), S. 278–288.
- Nelken, I.; Versnel, H. (2000): Responses to linear and logarithmic frequency-modulated sweeps in ferret primary auditory cortex. *European Journal of Neuroscience* 12 (2), S. 549–562.
- Nenadic, I.; Gaser, C.; Volz, H.-P.; Rammsayer, T.; Hager, F.; Sauer, H. (2003): Processing of temporal information and the basal ganglia. New evidence from fMRI. *Experimental brain research* 148 (2), S. 238–246.
- Ohl, F.; Schulze, H.; Scheich, H.; Freeman, W. (2000): Spatial representation of frequency-modulated tones in gerbil auditory cortex revealed by epidural electrocorticography. *Journal of Physiology-Paris* 94 (5-6), S. 549–554.
- Ohl, F.; Scheich, H.; Freeman, W. (2001): Change in pattern of ongoing cortical activity with auditory category learning. *Nature* 412 (6848), S. 733–736.
- Okada, K.; Hickok, G. (2006): Identification of lexical-phonological networks in the superior temporal sulcus using functional magnetic resonance imaging. *NeuroReport* 17 (12), S. 1293–1296.
- Okamoto, H.; Kakigi, R. (2015): Hemispheric asymmetry of auditory mismatch negativity elicited by spectral and temporal deviants: a magnetoencephalographic study. *Brain topography* 28 (3), S. 471–478.
- Oldfield, R. (1971): The Assessment and Analysis of Handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia* (9), S. 97–113.
- O'Leary, D.; Andreasen, N.; Hurtig, R.; Hichwa, R.; Watkins, G.L.; Boles Ponto, L. et al. (1996): A Positron Emission Tomography Study of Binaurally and Dichotically Presented Stimuli: Effects of Level of Language and Directed Attention. *Brain and Language* 53 (1), S. 20–39.
- Oscar-Berman, M.; Zurif, E.; Blumstein, S. (1975): Effects of unilateral brain damage on the processing of speech sounds. *Brain and Language* 2, S. 345–355.
- Pardo, P.; Sams, M. (1993): Human auditory cortex responses to rising versus falling glides. *Neuroscience Letters* 159 (1-2), S. 43–45.
- Penhune, V.; Zatorre, R.; MacDonald, J.; Evans, A. (1996): Interhemispheric Anatomical Differences in Human Primary Auditory Cortex: Probabilistic Mapping and Volume Measurement from Magnetic Resonance Scans. *Cerebral Cortex* (6), S. 661–672.
- Petersen, M.; Beecher, M.; Zoloth, S.; Moody, D.; Stebbins, W. (1978): Neural lateralization of species-specific vocalizations by Japanese macaques (*Macaca fuscata*). *Science* 202 (4365), S. 324–327.

- Petersen, S.; Fox, P.; Posner, M.; Mintum, M.; Raichle, M. (1988): Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature* 331 (18), S. 585–589.
- Pfeifer, Richard Arwed (1920): Myelogenetisch-anatomische Untersuchungen über das kortikale Ende der Hörleitung. 37 Bände. Leipzig: Teubner (Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klasse der Sächsischen Akademie der Wissenschaften, 2).
- Pizzamiglio, L.; de Pascalis, C.; Vignati, A. (1974): Stability of dichotic listening test. *Cortex* 10 (2), S. 203–205.
- Plomp, R. (1964): Rate of Decay of Auditory Sensation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 36 (2), S. 277–282.
- Poeppel, D. (2003): The analysis of speech in different temporal integration windows. Cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'. Review. *Speech Communication* 41 (1), S. 245–255.
- Poeppel, D. (2004): Auditory lexical decision, categorical perception, and FM direction discrimination differentially engage left and right auditory cortex. *Neuropsychologia* 42 (2), S. 183–200.
- Poremba, A.; Mallony, M.; Saunders, Richard, C.; Carson, Richard, E.; Herscovitch, P.; Mishkin, M. (2004): Species-specific calls evoke asymmetric activity in the monkey's temporal poles. *Nature* 427 (6973), S. 448–451.
- Porter, B.; Rosenthal, T.; Ranasinghe, K.; Kilgard, M. (2011): Discrimination of brief speech sounds is impaired in rats with auditory cortex lesions. *Behavioural brain research* 219 (1), S. 68–74.
- Price, C.; Wise, R.; Ramsay, S.; Friston, K.; Howard, D.; Patterson, K.; Frackowiak, R. (1992): Regional response differences within the human auditory cortex when listening to words. *Neuroscience Letters* 146 (2), S. 179–182.
- Prilop, L.; Gutschalk, A. (2017): Auditory-cortex lesions impair contralateral tone-pattern detection under informational masking. *Cortex* 95, S. 1–14.
- Rademacher, J.; Caviness, V.; Steinmetz, H.; Galaaburda, A. (1993): Topographical Variation of the Human Primary Cortices: Implications for Neuroimaging, Brain Mapping, and Neurobiology. *Cerebral Cortex* 3 (4), S. 313–329.
- Rasmussen, T.; Milner, B. (1977): The Role of Early Left-Brain Injury in Determining Lateralization of Cerebral Speech Functions. *Annals of the New York Academy of Sciences* 229, S. 335–369.
- Reiterer, S.; Erb, M.; Droll, C.; Anders, S.; Ethofer, T.; Grodd, W.; Wildgruber, D. (2005): Impact of task difficulty on lateralization of pitch and duration discrimination. *NeuroReport* 16 (3), S. 239–242.
- Reiterer, S.; Erb, M.; Grodd, W.; Wildgruber, D. (2008): Cerebral Processing of Timbre and Loudness: fMRI Evidence for a Contribution of Broca's Area to Basic Auditory Discrimination. *Brain Imaging and Behavior* 2 (1), S. 1–10.

- Ricketts, C.; Mendelson, J.R.; Anand, B.; English, R. (1998): Responses to time-varying stimuli in rat auditory cortex. *Hearing research* 123 (1-2), S. 27–30.
- Rimol, L.; Eichele, T.; Hugdahl, K. (2006): The effect of voice-onset-time on dichotic listening with consonant-vowel syllables. *Neuropsychologia* 44 (2), S. 191–196.
- Rinne, T.; Alho, K.; Alku, P.; Holi, M.; Sinkkonen, J.; Virtanen, J. et al. (1999): Analysis of speech sounds is left-hemisphere predominant at 100–150 ms after sound onset. *NeuroReport* 10 (5), S. 1113–1117.
- Rivier, F.; Clarke, S. (1997): Cytochrome oxidase, acetylcholinesterase, and NADPH-diaphorase staining in human supratemporal and insular cortex: evidence for multiple auditory areas. *NeuroImage* 6 (4), S. 288–304.
- Rybalko, N.; Suta, D.; Nwabueze-Ogbo, F.; Syka, J. (2006): Effect of auditory cortex lesions on the discrimination of frequency-modulated tones in rats. *The European journal of neuroscience* 23 (6), S. 1614–1622.
- Rybalko, N.; Suta, D.; Popelár, J.; Syka, J. (2010): Inactivation of the left auditory cortex impairs temporal discrimination in the rat. *Behavioural brain research* 209 (1), S. 123–130.
- Sally, S.; Kelly, J. (1988): Organization of auditory cortex in the albino rat: sound frequency. *Journal of neurophysiology* 59 (5), S. 1627–1638.
- Schall, U.; Johnston, P.; Todd, J.; Ward, P.; Michie, P. (2003): Functional neuroanatomy of auditory mismatch processing. An event-related fMRI study of duration-deviant oddballs. *NeuroImage* 20 (2), S. 729–736.
- Schwartz, J.; Tallal, P. (1980): Rate of Acoustic Change May Underlie Hemispheric Specialization for Speech Perception. *Science* 21 (207), S. 1380–1381.
- Scott, S. (2000): Identification of a pathway for intelligible speech in the left temporal lobe. *Brain* 123 (12), S. 2400–2406.
- Scott, S.; McGettigan, C. (2013): Do temporal processes underlie left hemisphere dominance in speech perception? *Brain and Language* 127 (1), S. 36–45.
- Shamma, S.; Fleshman, J.; Wiser, P.; Versnel, H. (1993): Organization of response areas in ferret primary auditory cortex. *Journal of neurophysiology* 69 (2), S. 367–383.
- Shankweiler, D.; Studdert-Kennedy, M. (1967): Identification of Consonants and Vowels Presented to Left and Right ear. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 19 (1), S. 59–63.
- Siniscalchi, M.; Quaranta, A.; Rogers, L. (2008): Hemispheric specialization in dogs for processing different acoustic stimuli. *PloS one* 3 (10), e3349.
- Speaks, C.; Niccum, N. (1977): Variability of the ear advantage in dichotic listening. *Journal of the American Audiology Society* 3 (1), S. 52–57.
- Speaks, C.; Carney, E.; Niccum, N.; Johnson, C. (1981): Stimulus dominance in dichotic listening. *Journal of speech and hearing research* 24 (3), S. 430–437.

- Specht, K. (2014): Neuronal basis of speech comprehension. *Hearing research* 307, S. 121–135.
- Springer, S. (1973): Hemispheric specialization for speech opposed, by contralateral noise. *Perception & Psychophysics* 13 (3), S. 391–393.
- Springer, S.; Sidtis, J.; Wilson, D.; Gazzaniga, M. (1978): Left Ear Performance in Dichotic Listening Following Commissurotomy. *Neuropsychologia* (16), S. 305–312.
- Stefanatos, G.; Joe, W.; Aguirre, G.; Detre, J.; Wetmore, G. (2008): Activation of human auditory cortex during speech perception: effects of monaural, binaural, and dichotic presentation. *Neuropsychologia* 46 (1), S. 301–315.
- Steinmetz, H.; Rademacher, J.; Huang, Y.; Hefter, H.; Zilles, K.; Thron, A.; Freund, H.-J. (1989): Cerebral Asymmetry: MR Planimetry of the Human Planum Temporale. *Journal of Computer Assisted Tomography* 13 (6), S. 996–1005.
- Studdert-Kennedy, M.; Shankweiler, D. (1970): Hemispheric Specialization for Speech Perception. *The Journal of the Acoustical Society of America* 48 (2), S. 579–594.
- Studdert-Kennedy, M.; Shankweiler, D.; Pisoni, D. (1972): Auditory and phonetic processes in speech perception: Evidence from a dichotic study. *Cognitive Psychology* 3 (3), S. 455–466.
- Tian, B.; Rauschecker, J. (1998): Processing of frequency-modulated sounds in the cat's posterior auditory field. *Journal of neurophysiology* 79 (5), S. 2629–2642.
- Tregellas, J.; Davalos, D.; Rojas, D. (2006): Effect of task difficulty on the functional anatomy of temporal processing. *NeuroImage* 32 (1), S. 307–315.
- Tzourio-Mazoyer, N.; Mazoyer, B. (2017): Variations of planum temporale asymmetries with Heschl's Gyri duplications and association with cognitive abilities: MRI investigation of 428 healthy volunteers. *Brain structure & function* 222 (6), S. 2711–2726.
- van Ruijsevelt, L.; Washington, S.; Hamaide, J.; Verhoye, M.; Keliris, G.; van der Linden, A. (2017): Song Processing in the Zebra Finch Auditory Forebrain Reflects Asymmetric Sensitivity to Temporal and Spectral Structure. *Frontiers in neuroscience* 11, S. 549.
- von Economo, C.; Horn, L. (1930): Über Windungsrelief, Maße und Rindenarchitektonik der Supratemporalfläche, ihre individuellen und ihre Seitenunterschiede. *Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie* 130 (1), S. 678–757.
- Voss, H.; Tabelow, K.; Polzehl, J.; Tchernichovski, O.; Maul, K.; Salgado-Commissariat, D. et al. (2007): Functional MRI of the zebra finch brain during song stimulation suggests a lateralized response topography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (25), S. 10667–10672.

- Voyer, D.; Techentin, C. (2009): Dichotic listening with consonant–vowel pairs: The role of place of articulation and stimulus dominance. *Journal of Phonetics* 37 (2), S. 162–172.
- Wada, J.; Rasmussen, T. (1960): Intracarotid Injection of Sodium Amytal for the Lateralization of Cerebral Speech Dominance. Experimental and Clinical Observations. *Journal of Neurosurgery* (17), S. 266–282.
- Wagner, E.; Klump, G.; Hamann, I. (2003): Gap detection in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*). *Hearing research* 176 (1-2), S. 11–16.
- Walton, J.; Frisina, R.; Ison, J.; O'Neill, W. (1997): Neural correlates of behavioral gap detection in the inferior colliculus of the young CBA mouse. *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 181 (2), S. 161–176.
- Weisz, N.; Wienbruch, C.; Hoffmeister, S.; Elbert, T. (2004): Tonotopic organization of the human auditory cortex probed with frequency-modulated tones. *Hearing research* 191 (1-2), S. 49–58.
- Wernicke, Carl (1874): Der aphasische Symptomencomplex: eine psychologische Studie auf anatomischer -basis. Breslau: Max Cohn & Weigert.
- Wetzel, W.; Wagner, T.; Ohl, F.; Scheich, H. (1998a): Categorical discrimination of direction in frequency-modulated tones by Mongolian gerbils. *Behavioural brain research* 91 (1-2), S. 29–39.
- Wetzel, W.; Ohl, F.; Wagner, T.; Scheich, H. (1998b): Right auditory cortex lesion in Mongolian gerbils impairs discrimination of rising and falling frequency-modulated tones. *Neuroscience Letters* 252 (2), S. 115–118.
- Wetzel, W.; Ohl, F.; Scheich, H. (2008): Global versus local processing of frequency-modulated tones in gerbils: an animal model of lateralized auditory cortex functions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (18), S. 6753–6758.
- Whitfield, I.; Evans, E. (1965): Responses of Auditory Cortical Neurons to Stimuli of Changing Frequency. *Journal of neurophysiology* 28, S. 655–672.
- Winter, P.; Ploog, D.; Latta, J. (1966): Vocal repertoire of the squirrel monkey (*Saimiri sciureus*), its analysis and significance. *Exp Brain Res* 1 (4), S. 359–384.
- Zaehle, T.; Wüstenberg, T.; Meyer, M.; Jäncke, L. (2004): Evidence for rapid auditory perception as the foundation of speech processing: a sparse temporal sampling fMRI study. *The European journal of neuroscience* 20 (9), S. 2447–2456.
- Zatorre, R.; Evans, A.; Meyer, E.; Gjedde, A. (1992): Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science* 256 (5058), S. 846–849.
- Zatorre, R.; Belin, P. (2001): Spectral and Temporal Processing in Human Auditory Cortex. *Cerebral Cortex* 11 (10), S. 946–953.
- Zhang, L.; Tan, A.; Schreiner, C.; Merzenich, M. (2003): Topography and synaptic shaping of direction selectivity in primary auditory cortex. *Nature* 424 (6945), 201-205.

Zurif, E.; Ramier, A. (1972): Some effects of Unilateral Brain Damage on the Perception of Dichotically Presented Phoneme Sequences and Digits. *Neuropsychologia* (10), S. 103–110.

VII. Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Name: Ann-Kathrin Riegel-Betz, geb. Riegel
 Geburtsdatum/-ort: 25. Mai 1987 in Bad Hersfeld

Akademische Laufbahn

- Seit 03/2013 **Promotionsstudium im Fachbereich Biowissenschaften**, Institut für Zellbiologie und Neurowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt a. M.
 Thema: „Lateralisierte Verarbeitung von einfachen akustischen Reizen als Grundlage der Spracherkennung beim Menschen“
 Planung, Entwicklung und Durchführung von psychophysischen Versuchen am Menschen; Programmierung und Durchführung der quantitativen/statistischen und graphischen Auswertung; Literaturrecherche; Projektpräsentation auf in- und ausländischen Fachtagungen und Arbeitsgruppen; Planung und Betreuung von Bachelorarbeiten; Verfassung und Lektorat wissenschaftlicher Texte
- 10/2010-10/2012 **Masterstudium Interdisciplinary Neuroscience**, Goethe-Universität, Frankfurt a. M. (Abschlussnote 1,2)
 Thema Masterarbeit: „Effects of inactivating the rat auditory cortex on stimulus perception“
- 10/2007-07/2010 **Bachelorstudium Biowissenschaften**, Goethe-Universität, Frankfurt a. M. (Abschlussnote 2,1)
 Thema Bachelorarbeit: „Endogene Verschiebung der räumlichen Aufmerksamkeit bei Ratten“
- 06/2006 **Abitur**, Modellschule Obersberg, Bad Hersfeld, (Abschlussnote 2,0)

Berufliche Erfahrungen und Lehrtätigkeit

- Seit 01/2014 **Office Managerin**, Könecke Naujok Rechtsanwälte und Steuerberater Partnerschaftsgesellschaft mbB, Frankfurt a. M.
Etablierung einer elektronischen Datenverwaltung; Homepage-administration; Finanzmanagement; Personalwesen; Termin- und Fristenkoordination

12/2018-08/2019 Elternzeit
- Seit 08/2018 **Referentin**, naturwissenschaftlicher Workshop, Sommerakademie des Schülerstipendiums „grips gewinnt“, Joachim-Herz-Stiftung
Konzipierung und praktische Vorbereitung von 30-stündigen Workshops; Seminarleitung, inkl. Vorträge über verschiedene naturwissenschaftliche Inhalte zum jeweiligen Schwerpunktthema (z.B. „Mut“ und „Energie“); tägliche Betreuung von ca. 20 Jugendlichen/Stipendiat*innen; Vorbereitung und Anleitung von Experimenten (zur Durchführung in Kleingruppen)
- 03/2013-09/2013 **Wissenschaftliche Hilfskraft**, Goethe-Universität, Frankfurt a. M.
Planung und Durchführung einer Vorstudie: Methodenetablierung zur permanenten Implantation von Führungskanülen in das Rattengehirn mit anschließender pharmakologischer Inaktivierung (kombiniert mit Verhaltensexperimenten), Perfusion und Histologie; Betreuung einer Bachelorarbeit
- 10/2010-03/2012 **Studentische Hilfskraft**, Goethe-Universität, Frankfurt a. M.
Unterstützende Labortätigkeit im Rahmen von Forschungsprojekten in den Bereichen Tierpflege, Kleintieroperation, Histologie
- 06/2010-03/2013 **Kursbetreuung (Tutorin)**, Goethe-Universität, Frankfurt a. M.
Anleitung und Betreuung von Kleingruppen (4–10 Student*innen) im Rahmen der I.–IV. Semesterpraktika: „Struktur und Funktion der Organismen“, „Diversität der Organismen und Lebensräume“, „Neurobiologie I & II, Kurs Makroskopische Hirnanatomie“; Korrektur von Leistungsnachweisen (z.B. Protokollen); Klausurvorbereitung
- 07/2006-04/2007 **Praktika im Medizinbereich**
Patientenbetreuung; OP-Assistenz (Unfallchirurgische Praxis B. Hennes, Bad Hersfeld); Assistenz im Pflegebereich (Marienhospital, Düsseldorf)
- 08/2005-04/2003 **Verlagspraktika**, Dr. Dietrich Steinkopff Verlag (Medizinverlag), Darmstadt
Autorenkorrespondenz; Manuskriptkorrekturen; Vorbereitung von Fachveranstaltungen

Soziales Engagement

- 12/2013-
03/2017 **Studentische Vertretung des Frauen-/Gleichstellungsrates**,
Fachbereich Biowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt a. M.
Vorbereitung und Durchführung von Veranstaltungen; aktive
Teilnahme an universitären Sitzungen; Entwurf von Aktionsplänen
- 01/2009-
11/2012 **Kinder- und Jugendbetreuung**, Evangelische Kirchengemeinde
Nied, Niddaschule, Frankfurt a. M.
Gruppen- und Einzelbetreuung von Kindern und Jugendlichen mit
Lernschwäche und Migrationshintergrund im Rahmen von
Hausaufgabenassistenz und Klausurvorbereitung; pädagogische
Freizeitgestaltung

Stipendien

- 02/2017 **Reisekostenstipendium der FAZIT-Stiftung** zum „40th Annual
Meeting of the Association for Research in Otolaryngology“,
Baltimore, USA
- 03/2015 **Reisekostenstipendium aus dem Fond für Gleichstellung**,
Fachbereich Biowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt a. M.
zum „11th Göttingen Meeting of the German Neuroscience Society“,
Göttingen

Sprachkenntnisse und weitere Qualifikationen

Deutsch (Muttersprache), Englisch (fließend in Wort und Schrift), Latinum
Felasa-Zertifikat B

Publikationen

- Riegel-Betz, A.-K. and Gaese, B. (2017): Behavioral Performance in FM Tone Perception is Lateralized for Direction Discrimination but Not Duration Discrimination in Humans. 40th Annual Meeting of the Association for Research in Otolaryngology, Baltimore, USA, #396
- Riegel, A.-K. and Gaese, B. (2015): Optimizing temporary inactivation methods to selectively define the importance of different rat auditory cortical areas. 11th Göttingen Meeting of the German Neuroscience Society, Göttingen, T18-9C
- Riegel, A.-K. and Gaese, B. (2013): Rat auditory cortical functioning and different aspects of performance in frequency discrimination tasks. 10th Göttingen Meeting of the German Neuroscience Society, Göttingen, T18-2B